НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 13, выпуск 3(48), 2016

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 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
С. А. Зинченко

Перевод на английский язык
Д. И. Иванов

Верстка
А. А. Стуканова

Редактор сайта
Л. А. Стрелкова

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

Нестеров Валерий Леонидович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, 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 15.11.2016.
Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 18,75. Уч.-изд. л. 12,0. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 1044. Цена свободная.

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

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY Vol. 13, Is. 3(48) – 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «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 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
S. Zinchenko

English translation
D. Ivanov

Layout
A. Stukanova

Online content editor
L. Strelkova

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

Valeriy Nesterov, D.Eng., Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, 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, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А. В. Кабанов, Н. А. Жемчугова
Исследование организационно-технологических моделей переустройства железнодорожных сортировочных станций 293

О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний, Т. В. Богачев
Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического разграничения 302

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

В. П. Бельтюков, А. В. Андреев
Особенности определения стоимости жизненного цикла верхнего строения пути на участках с разными условиями эксплуатации 314

В. П. Бельтюков, А. А. Третьяков
Комплексная оценка потребности в промежуточных ремонтах пути 321

Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев
Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна 328

И. А. Иванов, Д. П. Кононов, С. В. Урушев, А. В. Якушев
Остаточные напряжения в цельнокатаных колесах после упрочняющей обработки 337

В. В. Кондратов, В. А. Петров, С. С. Ковалинский
Расчётно-экспериментальные исследования динамического взаимодействия пролётного строения и опор железнодорожного моста 344

И. О. Кузнецова, С. С. Ваничева, М. В. Фрезе, А. А. Долгая, Т. М. Азаев, Х. Р. Зайнулабидова
Применение фрикционно-подвижных болтовых соединений для обеспечения сейсмостойкости строительных конструций мостов и других сооружений 353

В. И. Моисеев, Т. А. Комарова, А. В. Жебанов
Проблема железнодорожных перевозок летних марок дизельного топлива при низких температурах воздуха 361

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев
Определение механических свойств стали пружин рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов 370

Д. В. Седых
Идентификация топологий рельсовых цепей в отраслевом формате технической документации на устройства СЦБ 377

М. С. Чусовитин, К. С. Малышев
Испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале 388

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

С. О. Вихарев, Е. Т. Мирончиков

Экспериментальная проверка методики построения цифровых водяных знаков, устойчивых к атаке «вырезание» 396

В. В. Гарбарук, В. Н. Фоменко

Учет априорной инфорации о параметрев методе наибольшего правдоподобия 403

Н. В. Климова, Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, И. Р. Романова

Стабилизация отправления контейнерных блок-поездов по расписанию на станциях примыкания тыловых логистических терминалов в транспортном узле 410

А. А. Корниенко, С. В. Диасамидзе

Подход к структурированию метрик сложности для выявления дефектов безопасности программного обеспечения 421

Н. В. Никонова

Особенности задания воздействия и расчета нелинейных систем сейсмоизоляции 430

УДК 69.003:65

А. В. Кабанов, Н. А. Жемчугова

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕУСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Дата поступления: 25.05.2016
Решение о публикации: 12.09.2016

Цель: Создать метод расчета фронта работ подрядной строительной организации и организационно-технологические схемы их выполнения с минимизацией ущерба перерабатывающей способности реконструируемой железнодорожной станции. Усовершенствовать организационно-технологическое проектирование строительных работ по реконструкции железнодорожных сортировочных станций. **Методы:** Применены теория поточного строительства, методы системного анализа, теория экономической эффективности капитальных вложений, теория расписаний. Использован программный комплекс Microsoft Project. Все исследования проведены в рамках совершенствования организационно-технологического проектирования работ по реконструкции железнодорожных станций. **Результаты:** Назначены формообразования комплексов работ – строительных потоков, этапов работ, циклов, узлов, имеющих самостоятельную эксплуатационную готовность. Разработаны варианты календарных графиков реконструкции сортировочных станций. Рассчитано рациональное распределение во времени капитальных вложений каждого этапа. Определены технико-экономические показатели вариантов реконструкции при разной перерабатывающей способности станций. Рассчитан эффективный вариант организации комплексного потока реконструкции по критерию максимально возможной перерабатывающей способности станции в период строительно-монтажных работ Для совершенствования организационно-технологического проектирования разработана классификация строительных потоков реконструкции железнодорожных сортировочных станций. Для разработки календарных графиков и автоматизированной выборки необходимых показателей адаптирован прикладной программный комплекс Microsoft Project. **Практические результаты:** Промежуточный прием законченных объектов в проектах производства работ по реконструкции сортировочной станции снизит риск замораживания капитальных вложений.

Сортировочная станция, строительный поток, реконструкция, организационно-технологическая схема, капитальные вложения, снижение затрат, высокая перерабатывающая способность.

***Alexander V. Kabanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, avkabanov07@inbox.ru; **Nadezhda A. Zhemchugova**, postgraduate student, dguchila@rambler.ru (Petersburg State Transport University) A STUDY OF ORGANISATIONAL-ENGINEERING MODELS FOR RECONSTRUCTION OF RAILWAY MARSHALLING YARDS

Objective: To develop a method for calculating the scope of work of a building contractor, and the organisational-engineering schemes of its fulfilment which minimise the damage to processing capability of a railway station under reconstruction. To improve organisational and production engineering of building works in reconstruction of railway marshalling yards. **Methods:** Applied were sequenced-flow construction theory, systemic analysis methods, economical efficiency of capital investments theory, and scheduling theory. Microsoft Project software was used. All the studies were conducted as part of improving the organisational and production engineering of works in reconstruction of railway

stations. **Results:** Forming of sets of operations was set – spreads, operational stages, cycles, node points which possess independent operational capability. Graphic schedule options for reconstruction of railway marshalling yards were developed. Rational temporal distribution of capital investments into each stage was calculated. Technical and economic performance indices for reconstruction options were set for various station estimated capacities. An efficient option for organisation of integrated reconstruction flow is calculated by the criterion of maximum possible station capacity for the duration of building and assembly works. In order to improve the organisational and process engineering, a classification of spreads of reconstruction of railway marshalling yards was developed. For development of graphic schedules and automated sampling of required indices, applied software system Microsoft Project was adapted. **Practical importance:** Interim acceptance of completed objects in projects of performance of works in reconstruction of railway marshalling yards would reduce the risk of freezing capital investments.

Railway marshalling yard, spread, reconstruction, organisational and engineering scheme, capital investment, cost cutting, high capacity.

В современных условиях освоения интермодальных транспортных коридоров [1] к реконструкции и переустройству железнодорожных сортировочных станций предъявляются высокие требования, определяемые их технической оснащенностью. Завершено строительство важнейшей сортировочной станции Лужская-Сортировочная; проведена реконструкция станции Санкт-Петербург-Сортировочная.

В ближайшие годы объем переработки вагонов ($N_п$) на таких станциях составлял до 7–8 тыс. вагонов/сутки [2, 3, 7]. Переустройство сортировочных станций связано с нарушением их эксплуатационной деятельности, что ведет к дополнительным затратам, поэтому совершенствование методов организации строительных работ, сокращение эксплуатационных расходов в период реконструкции, а также сроков и стоимости строительства весьма актуальны.

В условиях большой сложности данного типа объектов, специфики возведения различных объектов инфраструктуры станции, организационно-технологической зависимости между исполнителями – специализированными подрядными строительными организациями – основным критерием оптимальности является максимальный ввод в действие производственных мощностей при минимальных издержках. Организационно-технологическое моделирование строительства в этом случае исходит из принципа гарантированного результата.

Для исследования авторы проработали материалы календарного планирования реконструкции железнодорожных станций в подрядных строительных организациях ОАО «РЖДстрой». Новый научный подход заключается в развитии положений поточного строительства и в разработке классификации строительных потоков применительно к организации работ по реконструкции сортировочных станций. Впервые исследована зависимость изменения эксплуатационных показателей реконструируемой станции в условиях ведения работ от максимально возможного фронта работ подрядчика.

Формирование системы комплексных строительных потоков реконструкции железнодорожной сортировочной станции

При росте размеров и интенсивности вагонопотоков возникает проблема наращивания технической оснащенности и развития станции в соответствии с увеличением объемов работ. В этих условиях разработка эффективных вариантов инвестиционных капиталовложений в техническую оснащенность станции требует новых научно-технических решений.

Сортировочные железнодорожные станции представляют собой транспортные перерабатывающие комплексы, регулирующие пропуск вагонопотока по направлениям. Основой таких комплексов является сортировочная система, состоящая из последовательного расположения парков приема (ПП); сортировочного и параллельного или последовательного расположения отправочных (ПО) или передаточных парков [5].

Реконструкция таких станций проектируется комплексными потоками (рис. 1). Объемы работ для комплексных потоков группируются по элементам сортировочной системы.

Анализ строительства, переустройства и реконструкции железнодорожных станций позволил выделить следующие основные свойства и признаки, которыми следует руководствоваться при формировании комплексных потоков (рис. 1):

• тип железнодорожной станции (участковая, промежуточная, узловая и т. д.);

• схема ввода в эксплуатацию:

– полный ввод;

– частичный;

– эксплуатация в процессе дальнейшего строительства;

• степень технологической и организационной завершенности работ, например этап;

• подготовка или предоставление фронта работ для последующих объектов;

• доминирующие работы и объекты (сквозная синхронизация видов работ и объектов);

• тип структурно-конструктивной обособленности объектов, входящих в станцию;

• группировка работ и объектов по отраслям;

• виды инфраструктуры станции (пассажирское, грузовое, энергетическое хозяйство и пр.);

• принадлежность работ или объектов определенному (профильному) исполнителю (субподрядчику) работ;

• характер разрабатываемой организационно-технологической документации (технологическая карта, проект организации стро-

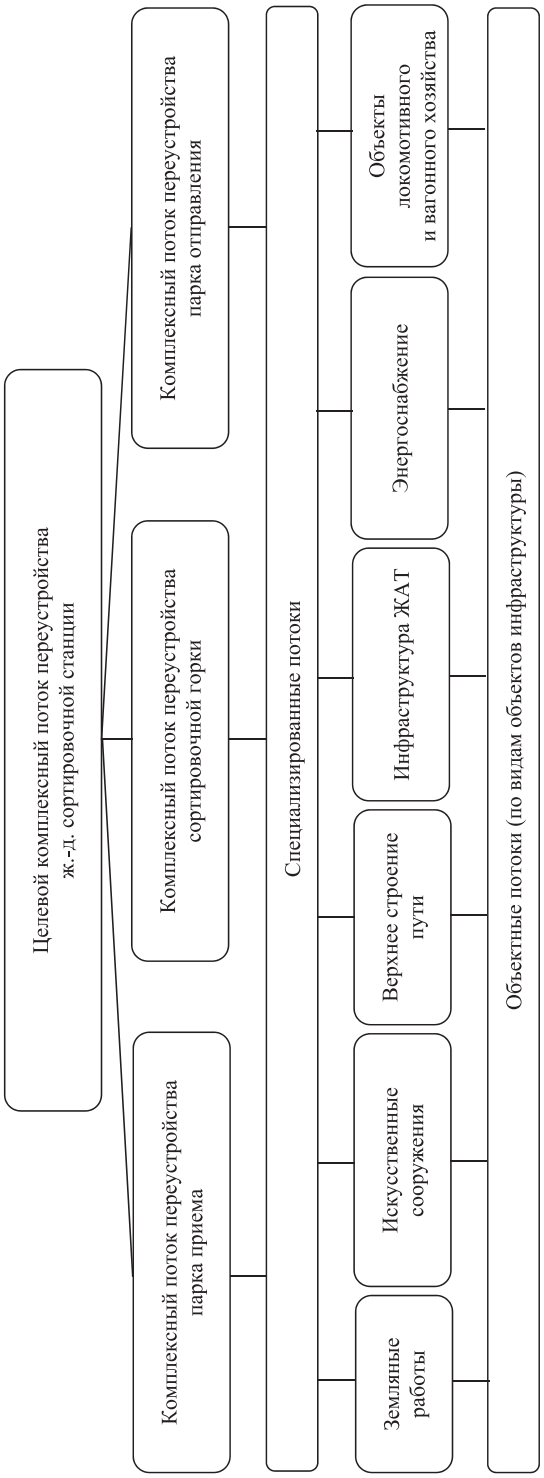


Рис. 1. Формирование комплексных потоков переустройства железнодорожной сортировочной станции

ительства (ПОС), проект производства работ, проект организации работ и т. д.);

• схема предъявления к оплате заказчику выполненных объемов работ;

• требования проектной организации (например, в рамках глав сводной сметы или по мере выпуска проектной документации);

• произвольный набор работ (как вариант);

• схема по информационным массивам;

• схема, учитывающая особенность работы подрядной организации;

• набор работ, соответствующий плановому горизонту (на весь срок строительства, на планируемый год, поквартально и т. д.).

Определение фронтов работ комплексных потоков

Фронты работ комплексных потоков формируются в соответствии со схемой переустройства станции. Проекты переустройства и реконструкции железнодорожных станций предусматривают варианты группировки объема работ во фронты: для поэтапного ввода и скоростной (см. таблицу). Решения принимаются на стадии технико-экономического обоснования и разработки проекта [5].

Поэтапный ввод в эксплуатацию предусматривает промежуточную сдачу элементов, имеющих самостоятельную эксплуатационную готовность (формообразование комплексов работ этапа проектирования – ФКР-проект), задолго до окончания работ по всей станции [6, 10, 11]. За счет этого достигаются эффект от рационального распределения капитальных вложений и снижение издержек подрядных строительных организаций, связанных с концентрацией ресурсов на данном объекте.

Метод скоростного строительства применяется, если целесообразно организовать работу на широком фронте (практически с закрытием станции) с учетом конкретных территориальных и социально-экономических условий, а также возможностей подрядных строительных организаций [13, 14]. Однако в этом случае капитальные вложения замораживаются на весь период строительства.

Ввиду того, что большинство современных сортировочных станций реконструируется в сложных, стесненных условиях, предпочтение отдается поэтапному способу.

Организационно-технологическое проектирование ведут подрядные строительные организации на основе решений ПОС, иногда совместно с детализацией по рабочей документации для каждого этапа [4, 8, 9, 15–17]. Из-за большой стоимости объектов на этапах модели организации работ следует разрабатывать с учетом минимизации ущерба от временного замораживания капитальных

Организационные способы реконструкции сортировочных станций

Способ	Способ ввода	Особенности	Фронт работ
Поэтапный	Ввод в эксплуатацию промежуточных элементов	Рациональное распределение капиталов $К_{рац} = \Sigma К_{tстр} \cdot \eta_t$	В пределах этапа строительства
Скоростной	Ввод по окончании работ по всем этапам	Замораживание капитальных вложений $\Gamma_з = \frac{\sum_n k_i \cdot t_i}{\sum_n k_i}$	На широком фронте

Примечания. $К_{рац}$ – капитальные вложения, осуществляемые через t лет после исходного года; η_t – коэффициент приведения отдаленных затрат для соответствующего года; $\Gamma_з$ – средний срок замораживания средств, лет; k_i – капитальные вложения, не дающие экономического эффекта до окончания строительства (по каждому году $t_{стр}$); t_i – сроки по годам.

вложений в пределах этапа (рис. 2). Для этого следует рассматривать различные сочетания схем ввода элементов (варианты моделей 1, 2, 3 на рис. 2), входящих в сортировочную станцию. Производятся соответствующие корректировка и варьирование последовательностью ввода формообразований комплексов работ этапа, принятых на стадиях проектирования ($ФКР_{проект}$) и производства работ ($ФКР_{подр}$):

$$ФКР^{этапа}_{проект} \Rightarrow ФКР^{этапа}_{подр}.$$

В пределах каждого этапа строительства для большей окупаемости капитальных вложений работа организуется комплексными и межузловыми потоками. Формируются возможные варианты организационно-технологических моделей. Для этого используется интегрированная с аналитическими системами трестов железнодорожного строительства программа Microsoft Project (MSP, MSProject). Это дает возможность по выходной проектно-сметной документации взаимодействовать с базами данных, электронными таблицами, создавать текстовую и аналитическую документацию, работать в корпоративных сетях.

При этом переустройство станции, как правило, происходит без прекращения их эксплуатации. Эта особенность создает дополнительные трудности:

• часть работ приходится выполнять с перерывом для движения поездов – в «окна»;

• предъявляются дополнительные требования по технике безопасности и безопасности движения поездов;

• уменьшается емкость фронта строительных работ.

При этом порядок переустройства станционных путей должен предусматривать первоочередной ввод в действие путей, от которых зависит дальнейшее развертывание фронта работ по переустройству станции [12]. В ходе разработки при необходимости сохранения пропускной и перерабатывающей способности станции можно предусмотреть укладку временных путей, стрелочных переводов, устройство обходов, а также переключение и выключение отдельных парков, путей и т. п.

В каждый этап следует включать полный комплекс работ для усиления пропускной способности станции или ее отдельных элементов. Так, на этапе укладки новых или удлинения существующих приёмоотправочных путей должны предусматриваться работы по укладке стрелочных переводов и съездов для выхода с этих путей на главные и вытяжные пути; при укладке сортировочных путей – по укладке съездов на вытяжные пути, при сооружении развязки подходов к станции – по переустройству горловин станции, обеспечивающих включение новых подходов.

Определение рациональной величины фронта работ

Организационно-технологическое проектирование реконструкции сортировочной станции начинается с определения фронтов развертывания комплексных строительных потоков и расчета необходимых ресурсов. Фронт работ – это объемно-пространственная характеристика строительного потока. Как указывалось выше, в условиях реконструкции железнодорожной сортировочной станции объемы предоставляемых под реконструкцию работ и объектов могут различаться от минимально возможных – с целью сохранения максимальной перерабатывающей способности – до полного закрытия станции, т. е. 100%-го предоставления объемов фронта работ.

Чтобы определить рациональный объем фронтов работ, при которых работа станции достаточно эффективна, исследована зависимость перерабатывающей способности сортировочной станции ($N_п$, тыс. ваг./сут.) от процента выделения фронтов работ F. F представляет собой отношение объема формообразований комплексов работ (в сметной стоимости), имеющих самостоятельное эксплуатационное значение (этапа, потока, узла)

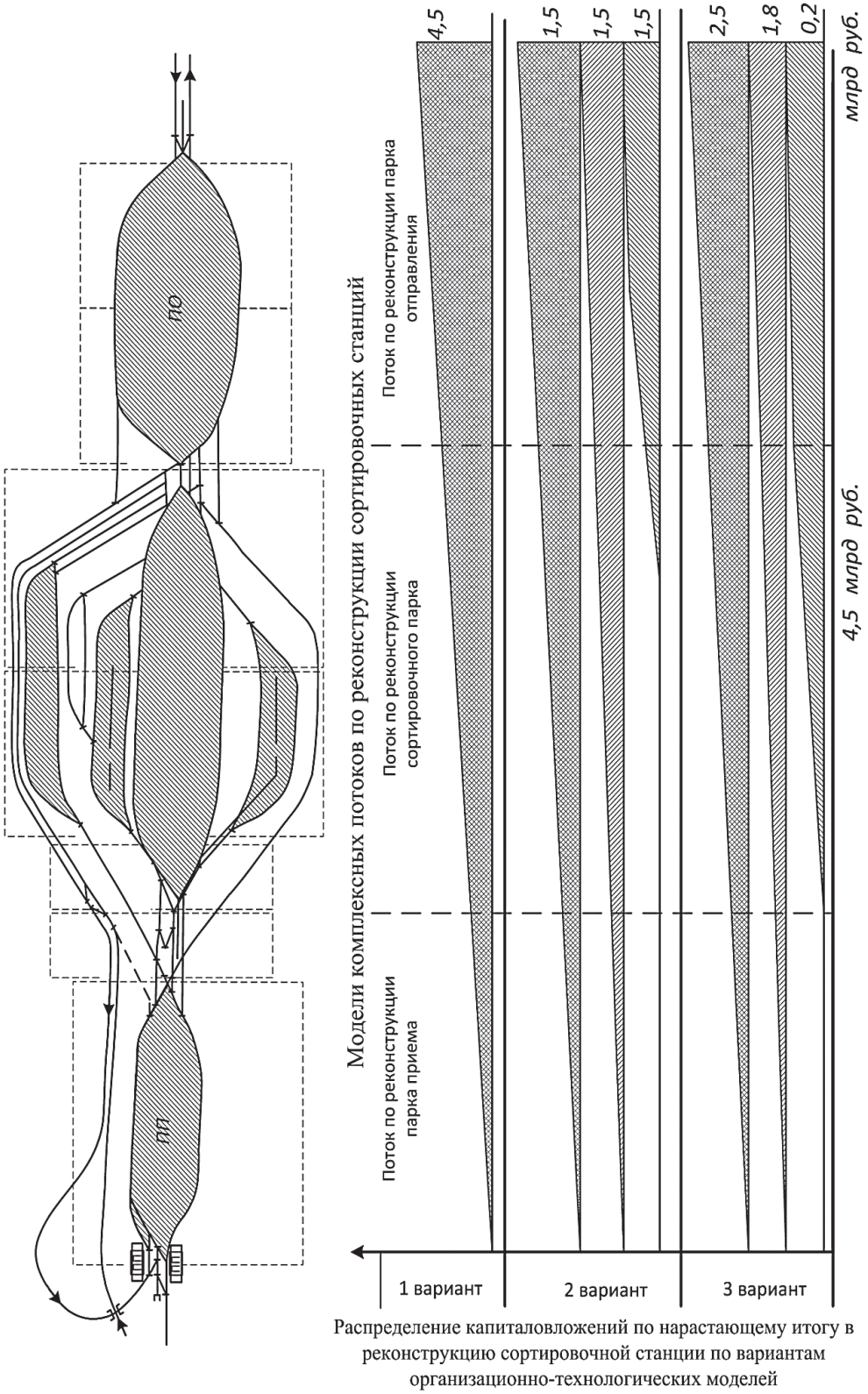


Рис. 2. Варианты организационно-технологических схем переустройства сортировочной станции

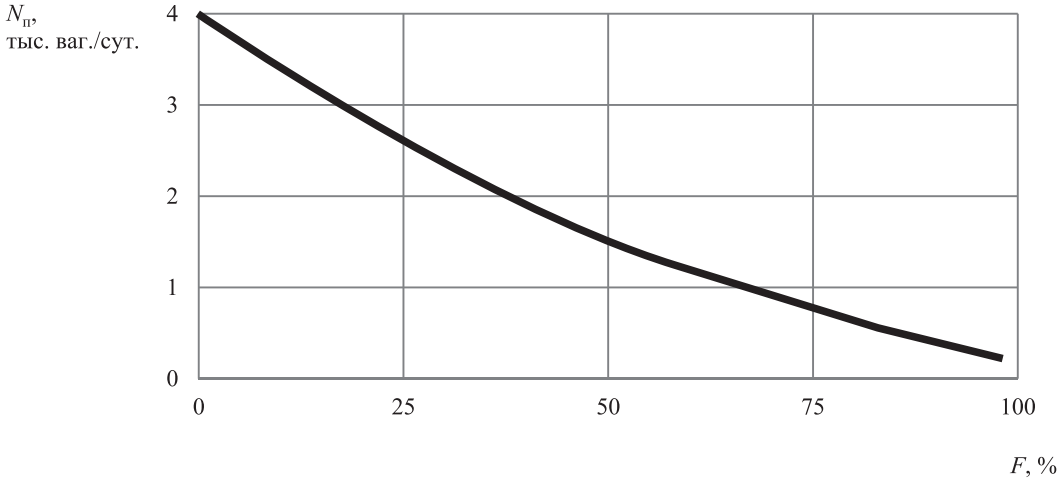


Рис. 3. Зависимость перерабатывающей способности ($N_п$) железнодорожной сортировочной станции от объема выделяемых фронтов работ (F) на развертывание строительных потоков

в пределах станции, к общему объему работ (этапа) по переустройству станции:

$$F = \Sigma \frac{Q_{\text{ФКР}_i}}{Q_i},$$

где $Q_{\text{ФКР}}$ – объем формообразований комплексов работ, потока в сметной стоимости; Q_i – общий объем работ этапа по переустройству станции.

При разработке организационно-технологических моделей реконструкции станции рациональный вариант организации комплексного потока определяется по наиболее высоким показателям перерабатывающей способности сортировочной станции (без ее полного закрытия) в период строительно-монтажных работ (рис. 3).

Заключение

Дальнейшее совершенствование организационно-технологического проектирования реконструкции станционных комплексов следует начинать с определения и классификации работ, строительных потоков на объекты, узлы, этапы, обладающие высокой степенью устойчивости по отношению к изменениям условий строительства. Высокая степень устойчивости обеспечивается безостановочной работой станции и минимизацией ущерба перерабатывающей способности станции в период производства работ. Исследования, приведенные в данной статье на примерах реконструкции сортировочных станций Северо-Запада (Санкт-Петербург-Сортировочная Московская; Лужская Сортировочная), показали, что в проектах производства работ рекомендуется разбивать полный объем работ реконструкции на этапы, включающие 30–50 % (рис. 3) объектов реконструируемой станции. Это позволяет сохранить эффективную перерабатывающую способность и эффективность работы подрядных строительных организаций.

Библиографический список

1. Алексеев Ю. В. Развитие и реконструкция социально-транспортной инфраструктуры мегаполиса. Надземные автомагистрали над железной дорогой / Ю. В. Алексеев. – М. : АСВ, 2011. – 328 с.

2. Болотный В. Я. Переустройство железнодорожных станций / В. Я. Болотный, М. К. Брехов. – М. : Транспорт, 1982. – 172 с.

3. Болотный В. Я. Совершенствование схем и технологии работы железнодорожных станций : учеб. пособие для вузов / В. Я. Болотный. – М. : Транспорт, 1986. – 280 с.

4. Будников М. С. Основы поточного строительства / М. С. Будников и др. – Киев : Будівильник, 1961. – 361 с.

5. Инструкция по содержанию технической документации на устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) ЦШ-617-10. – 2010. – 47 с.

6. Инструкция о порядке разработки, согласования и утверждения проектной документации на строительство объектов, финансируемое ОАО «РЖД» от 27.10.2005 г. № 1701 р (в ред. распоряжений ОАО «РЖД» от 12.10.2009 г. № 2076 р, от 13.08.2010 г. № 1748 р). – 30 с.

7. 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.

8. Олейник П. П. Организация строительного производства / П. П. Олейник. – М. : АСВ, 2010. – 576 с.

9. Олейник П. П. Методы определения продолжительности строительства объектов / П. П. Олейник, В. И. Бродский // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 12. – С. 31–33.

10. Правила приемки в эксплуатацию законченных строительством усилением, реконструкцией объектов федерального железнодорожного транспорта (утв. МПС РФ 25.12.2000 г. № ЦУКС). – 799 с.

11. Прокудин И. В. Организация строительства и реконструкция железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / И. В. Прокудин, Э. С. Спиридонов, И. А. Грачев и др. ; под. ред. И. В. Прокудина. – М. : УМЦ ЖДТ, 2008. – 736 с.

12. Распоряжение «О мерах по дальнейшему повышению качества ремонтно-путевых работ» (утв. 18.05.2009 г. № 1019 р).

13. Распоряжение «Об утверждении требований к составлению сметной документации при разработке проектной и рабочей документации на строительство объектов ОАО „РЖД“» (утв. 12.10.2009 г. № 2076 р).

14. Распоряжение «Об этапах капитального ремонта пути и искусственных сооружений путевого хозяйства ОАО „РЖД“» (утв. ОАО «РЖД» 31.10.2007 г. № 2072 р).

15. СНиП 3.01.01-85. Организация строительного производства.

16. СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

17. СП 48.13330.2011. Организация строительства.

References

1. Alekseyev Yu. V. Razvitiye i rekonstruktsiya sotsialno-transportnoy infrastruktury megapolisa. Nadzemnyye avtomagistrali nad zheleznoy dorogoy [Development and Reconstruction of Social and Transport Infrastructure of a Megalopolis. Elevated Motorways over Railways]. Moscow, ASV, 2011. 328 p.

2. Bolotnyy V.Ya. & Brekhov M. K. Pereustroystvo zheleznodorozhnykh stanstiy [Reconstruction of Railway Stations]. Moscow, Transport, 1982. 172 p.

3. Bolotnyy V.Ya. Sovershenstvovaniye skhem i tekhnologii raboty zheleznodorozhnykh stantsiy: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Perfecting Schemes and Operation Technology of Railway Stations: University Course Guide]. Moscow, Transport, 1986. 280 p.

4. Budnikov M. S. et al. Osnovy potochnogo stroitelstva [Sequenced-Flow Construction Principles]. Kiev, Budivylnyk, 1961. 361 p.

5. Instruction for keeping technical documentation for signalling arrangement TsSh-617-10. 2010. 47 p.

6. Instruction on development, clearance and approval of design documentation for building objects funded by Russian Railways JSC, issued Oct. 27, 2005 № 1701r (in versions approved by Russian Railways JSC orders on Oct. 12, 2009 N 2076r and on Aug. 13, 2010 г. N 1748r). 30 p.

7. Kabanov A. V. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo – Industrial and Civil Construction*, 2014, no. 10, pp. 108-111.

8. Oleynik P. P. Organizatsiya stroitelnogo proizvodstva [Organisation of Construction Operations]. Moscow, ASV, 2010. 576 p.

9. Oleynik P. P. & Brodskiy V. I. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo – Industrial and Civil Construction*, 2012, no. 12, pp. 31-33.

10. Rules for commissioning of federal rail transport objects completed in construction, strengthen-

ing, reconstruction (approved by Russian Federation Transport Ministry order Dec. 12, 2000, N TsUKS). 799 p.

11. Prokudin I. V., Spridonov E. S., Grachev I. A., Kolos A. F. & Terletskiy S. K. Organizatsiya stroitelstva i rekonstruktsiya zheleznykh dorog: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Organisation of Construction and Reconstruction of Railways: Course Book for Railway Universities]; ed. I. V. Prokudin. Moscow, UMTs ZhDT, 2008. 736 p.

12. Order "On Measures for Further Improvements in Quality of Track Repair Operations" (approved May 18, 2009, N 1019r).

13. Order "On Approving Requirements for Drawing Up Cost Estimation Documents in Development of Project and Operational Documentation for Building Russian Railways JSC Objects" (approved Oct. 12, 2009, N 2076r).

14. Order "On Stages of Full Repair of the Track and Track Infrastructure of Russian Railways JSC" (approved by Russian Railways JSC Oct. 31, 2007, N 2072r).

15. Building Code SNiP 3.01.01-85. Organizatsiya stroitelnogo proizvodstva [Organisation of Construction Operations].

16. Building Code SNiP 11-02-96. Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitelstva. Osnovnyye polozheniya [Engineering Surveys for Construction. Basic Principles].

17. Set of Rules SP 48.13330.2011. Organizatsiya stroitelstva [Organisation of Construction].

*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 656.22 + 06

О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний, Т. В. Богачев

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАГОНОПОТОКОВ ОПЕРАТОРСКОЙ КОМПАНИИ В ПРИПОРТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛАХ МЕТОДОМ ЭКОНОМИКО–ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ

Дата поступления: 30.06.2016
Решение о публикации: 21.09.2016

Цель: Сформулировать предложения для улучшения показателей использования подвижного состава (груженых и порожних рейсов) операторской компании при перевозках грузов в международных коридорах в припортовой транспортно-технологической системе. **Методы:** Проанализированы публикации данного направления исследований, применена модификация методов геометрического и экономико-географического моделирования для разграничения сфер влияния станций нахождения вагонов собственности операторской компании**. Результаты:** Получено теоретическое обоснование территориальной картины олиго(дуо)полистического рынка грузовых перевозок в рассматриваемом регионе. Сформулирован алгоритм распределения подвижного состава со станций погрузки на припортовые станции с целью сокращения продолжительности оборота вагона. В среде системы аналитических вычислений построена географическая модель раздела рынка подвижного состава по видам грузовых перевозок для станций, использующая аналитические кривые. **Практическая значимость:** Снижение эксплуатационных расходов на перевозку груженых вагонов на припортовых станциях в зависимости от длины маршрута дает экономический эффект для совокупности региональных распределительных станций нахождения вагонов собственности операторской компании.

Железнодорожная инфраструктура, транспортный узел, международный транспортный коридор, операторская компания, оборот вагона, порожний рейс, коэффициент эффективности участка, экономико-географический метод, алгебраические кривые, метод наименьших квадратов, олигополистический рынок, дуополия.

***Oleg N. Chislov**, D. Sci. (Eng.), associate professor, department chair, o_chislov@mail.ru; **Viktor A. Bogachev**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), associate professor, bogachev-va@yandex.ru; **Vyacheslav M. Zadorozhniy**, assistant, zadorozniy91@mail.ru (Rostov State Transport University); **Taras V. Bogachev**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), associate professor, bogachev73@yandex.ru (Rostov State University of Economics) OPERATOR COMPANY WAGGON FLOW DISTRIBUTION IN PORT TRANSPORT HUBS BY ECONOMIC AND GEOGRAPHICAL DELINEATION METHODS

Objective: To make proposals for improving usage indices of rolling stock (loaded and empty runs) of an operator company when transporting freight through international corridors in a port transport and technology system. **Methods:** Publications of this type of studies were analysed, geometrical and economic and geographical simulation methods were modified to delineate spheres of influence of location stations of operator company-owned waggons. **Results:** Theoretical justification was obtained for a territorial picture of an oligo-duopolistic market of freight transportation in the region under consideration. An algorithm was formulated for distribution of rolling stock from loading stations to port stations to reduce waggon round-trip time. A geographic simulation for division of rolling-stock market by types of freight transportation for stations was built with the use of analytical curves in an analytical calculations system environment. **Practical importance:** Reduction of operating costs for transportation

of loaded waggons at port stations depending on the route length provides economic effect for the group of regional distribution stations where operator company-owned waggons are located.

Rail infrastructure, transport hub, international transport corridor, operator company, waggon round-trip time, empty run, section efficiency coefficient, economic and geographical method, algebraic curves, least-squares method, oligopolistic market, duopoly.

Северо-Кавказская железная дорога (СКЖД) – филиал ОАО «РЖД» – обеспечивает транспортировку грузов в сообщении с южнороссийскими глубоководными портами и является важнейшим инфраструктурным объектом Южного федерального округа. С одной стороны, снижение объемов перевозок по завершении XXII Олимпийских и XI Паралимпийских зимних игр в Сочи отразилось на размере загрузки СКЖД, пик которой пришелся на время спортивной стройки. С другой стороны, обострение отношений с Украиной вызвало переориентацию экспортного грузопотока в обход ее территории на порты юга России, что увеличило грузопоток в этом направлении несмотря на общее снижение объемов отправления грузов по железной дороге. Немаловажную роль имеет тот факт, что через территорию юга России проходят международные транспортные коридоры «Север – Юг» и Транссиб.

Несмотря на положительные тенденции роста объемов грузоперевозок в порты Азово-Черноморского бассейна остаются проблемы из-за ограничения пропускных способностей железнодорожных линий, брошенных на подходах к портам поездов, нерационального подбора судовых партий, из-за низкой производительности портового подъемно-транспортного оборудования, сложности управления груженными и порожними вагонопотоками. Последняя проблема непосредственно связана с приватным подвижным составом и с его собственниками. В полном рейсе приватного грузового вагона его груженое плечо подчинено общему технологическому темпу доставки груза в порт (исключение – форс-мажорные обстоятельства неприема грузов), а порожний рейс уже подчинен интересам собственника, которые не всегда совпадают с интересами перевозчика. Из-за этого пути припортовых станций заполняются отстаиваемыми вагонами нерационально [3]. Поэтому актуальна задача найти рациональные методы прогрессивного распределения вагонопотоков на полигоне припортовой железной дороги.

Операторские компании в припортовой транспортно-технологической системе

Под оператором железнодорожного подвижного состава понимается юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, имеющие вагоны, контейнеры на праве собственности или ином праве, участвующие на основе договора с перевозчиком в перевозочном процессе с использованием указанных вагонов, контейнеров [8, 14].

На СКЖД работают около 1150 операторов и собственников подвижного состава, общий парк которых составляет более 70 тысяч вагонов [6]. Из них 10 крупных компаний-операторов (включая АО «ПГК», «ФГК», «НефтеТрансСервис», ООО «Газпромтранс», «Новая перевозочная компания», ЗАО «Русагротранс», «Спецэнерготранс» и другие) владеют около 77% этого подвижного состава; 70 средних компаний – 17%; более тысячи мелких операторских компаний, имеющих от нескольких единиц до ста вагонов, – около 6%. Например, среднесуточное количество вагонов на полигоне дороги в собственности основных операторов составляют: АО «ФГК» – 105 вагонов, ООО «Газпромтранс» – 88, АО «СГтранс» – 38, ООО «ЛУКОЙЛ-Транс» – 20,

ЗАО «Русагротранс» – 16, АО «ПГК» – 10 вагонов [4, 5].

Важными шагами для повышения эффективности использования подвижного состава и пропускной способности инфраструктуры стали разработка ОАО «РЖД» договора-оферты на услуги управления порожними вагонами по обезличенной технологии – «технологический аутсорсинг», а также создание консолидированного вагонного парка. В соответствии с данной технологией вагон после выгрузки технологически обезличивается, и перевозчик получает возможность построить оптимальную логистику для подачи порожнего вагона под погрузку с соблюдением нормативов по расходам на порожний пробег [10].

Однако существенных изменений в продвижении порожних вагонов и разгрузки инфраструктуры не последовало, возможно, в силу рекомендательного характера ЕСТП, отсутствия синхронизации участников перевозочного процесса, недостаточного информационного взаимодействия, осложнения экономической ситуации в стране в целом и на рынке оперирования в частности и др. [11, 15].

Необходима заинтересованность владельцев подвижнóго состава в его эффективном использовании, в сокращении оборота вагона, в оптимизации движения не только груженных, но и порожних вагонопотоков и их быстрый возврат к перевозочной деятельности. Для этого используются как традиционные экономико-математические методы управления вагонопотоками, так и предлагаемый в данной статье адаптированный метод экономико-географического разграничения.

Управление вагонопотоками операторской компании (на примере Ростовского филиала АО «ФГК»)

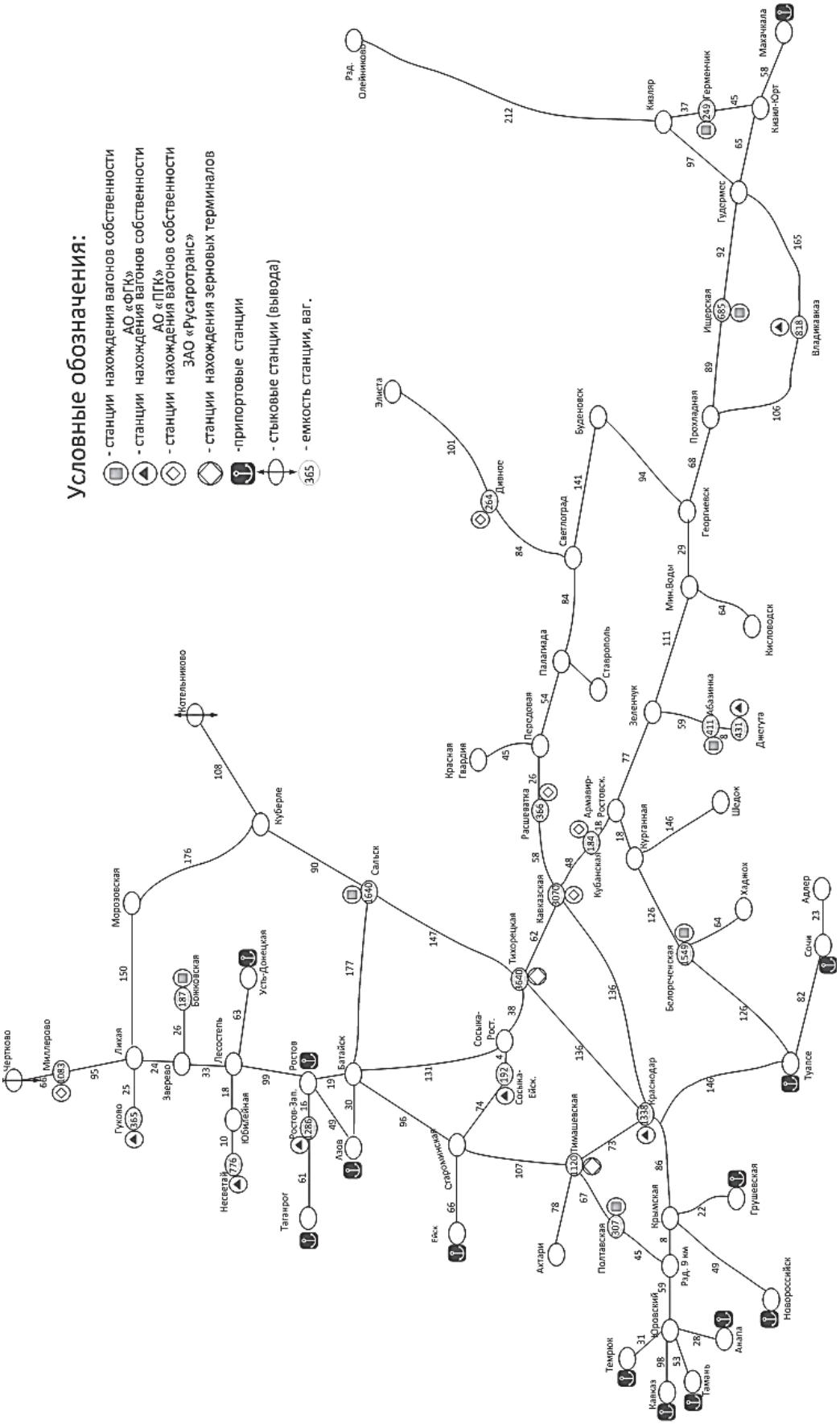
Ростовский филиал Акционерного общества «Федеральная грузовая компания» (АО «ФГК» – дочернее общество ОАО «РЖД») создан по решению совета директоров ОАО «РЖД» 26.08.2010 г. и является одним из крупнейших грузовых железнодорожных операторов в России [12]. Вагонный парк АО «ФГК» насчитывает 180 тыс. единиц подвижного состава разного типа: 137 тыс. полувагонов, свыше 24,5 тыс. единиц крытых, 10 тыс. платформ и около 3 тыс. единиц прочего подвижного состава. Доля АО «ФГК» в структуре всего вагонного парка сети составляет 18 %.

Основной вид деятельности АО «ФГК» – предоставление собственного подвижного состава под перевозки, кроме того, оно оказывает транспортно-экспедиционные и иные услуги, в том числе круглосуточное диспетчерское наблюдение, экспедирование и контроль грузов в железнодорожном и мультимодальном сообщениях, тарифообразование, маркетинговое и юридическое сопровождение. Компания осуществляет как повагонные, так и маршрутные отправки по всей России. В основном вагоны АО «ФГК» перевозят кокс, железную руду, машины и оборудование, лом черных металлов, цветные и черные металлы, удобрения, химикаты, строительные грузы, промышленное сырье, гранулированные шлаки, огнеупоры, цемент, лесные грузы, промтовары и др.

На рис. 1 представлена модель полигона припортовой железной дороги с учетом рыночной деятельности основных операторских компаний – АО «ФГК», АО «ПГК» и ЗАО «Русагротранс» [7, 9].

Основной критерий эффективного управления вагонными парками компании – оборот вагона, который может рассматриваться как величина, состоящая из порожнего и груженого рейса.

Согласно изменениям в ФЗ «Устав железнодорожного транспорта РФ» [13], вступившим в действие 01.04.2015 г., возрастает ответственность всех сторон перевозочного процесса, в том числе финансовая. Таким образом, нормированию времени оборота порожнего вагона следует уделять особое внимание, так как этот показатель влияет на использование основных средств и является одним из основных показателей, характеризующих использование вагонного парка.


Условные обозначения:
- станции нахождения вагонов собственности АО «ФГК»
- станции нахождения вагонов собственности АО «ПГК»
- станции нахождения вагонов собственности ЗАО «Русагротранс»
- станции нахождения зерновых терминалов
- припортовые станции
- стыковые станции (вывода)
- емкость станции, ваг.
Черново
Миллерово
Лихая
Гуково
Зверево
Морозовская
Бойковская
Лесостепь
Усть-Донецкая
Юбилейная
Несветай
Ростов
Ростов-Зап.
Таганрог
Котельниково
Куберле
Сальск
Батайск
Азов
Ростов-Сортировочный
Ростов-Пассажирский
Ростов-Главный
Ростов-Товарный
Ростов-Восточный

В работе [15] представлена методика распределения порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе, позволяющая направленно оптимизировать процесс возвращения вагонов к станциям вывода. Задача состоит в выборе маршрутов возврата порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе таким образом, чтобы общее время порожнего пробега вагонов было минимальным при известных пропускной способности железнодорожных линий полигона и размере встречных груженых вагонопотоков.

В качестве экономико-математической модели используется транспортная задача открытого типа с вводом модифицированных критериев оценки работы операторской компании и межстанционных коэффициентов маршрута перевозки.

Соответствующая целевая функция исследована в системе аналитических вычислений. Приведённые расчеты можно развить, дополнить и уточнить в количественном и качественном отношениях, введя коэффициенты существенности влияния внешних факторов. При реализации предлагаемой методики расчетов и получении статистических данных можно оценить полигон вероятностными методами.

Метод экономико-географического разграничения вагонопотоков операторской компании

Рассмотрим методику построения экономико-географической модели, дающей территориальную картину оптимизации разграничения грузовых перевозок на рынке транспортных услуг в заданном регионе. В качестве объекта исследования выбрана западная часть Северо-Кавказского транспортного региона, рассматриваемая в рамках деятельности АО «ФГК». В качестве груза приняты строительные лесоматериалы, которые могут быть доставлены с четырёх станций (складов) нахождения вагонов собственности компании: Сальск (1), Белореченская (2), Полтавская (3) и Божковская (4) в восемь станций-портов: Туапсе, Новороссийск, Темрюк, Кавказ, Ейск, Азов, Таганрог и Ростов (табл. 1).

Из представленных в табл. 1 статистических данных для всего рассматриваемого региона можно сделать вывод, что зависимость стоимости c (тыс. руб.) перевозки одного вагона со строительными лесоматериалами от длины l (км) пройденного маршрута имеет в целом выраженный линейный характер (рис. 2).

ТАБЛИЦА 1. Стоимость перевозки полувагона операторской компании АО «ФГК» с лесоматериалами от станции погрузки до припортовой станции

Станция погрузки	Туапсе		Новороссийск		Темрюк		Кавказ		Ейск		Таганрог		Азов		Ростов	
	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.	l, км	c, тыс. руб.
Сальск	429	29,4	418	27,7	467	33,2	533	32,2	339	24,8	262	23,8	207	25,6	196	21,8
Белореченская	126	21,6	345	26,4	394	31,9	460	30,9	480	29,2	486	31,1	435	33	424	28,4
Полтавская	261	20,3	102	15	135	19,8	201	18,5	240	17,4	351	22,1	300	24,1	289	19,5
Божковская	581	29,6	531	27	564	31,7	630	28	321	19,9	241	19	189	22	157	16,3

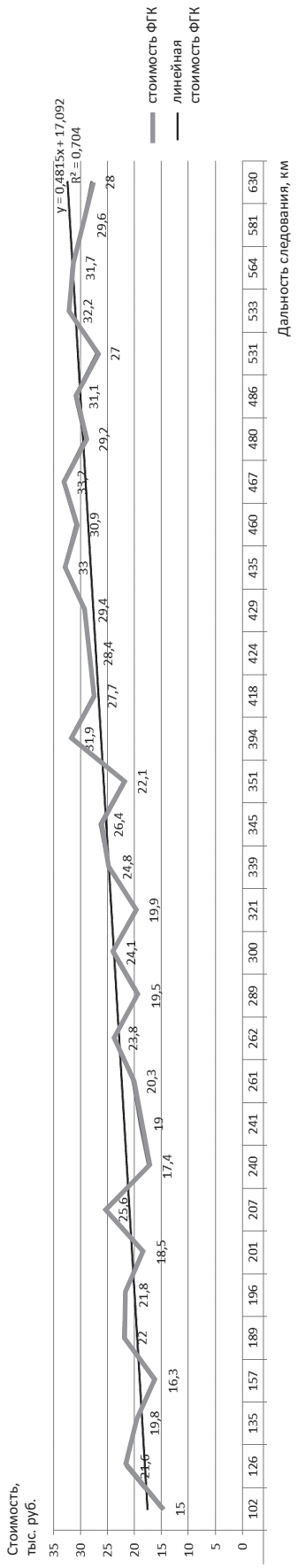


Рис. 2. Зависимость стоимости перевозок лесоматериалов от дальности следования вагона

Для решения задачи в табл. 2 выполнено ранжирование статистических данных из табл. 1 в порядке длины маршрутов дальности следования вагонов до припортовых станций от каждой из четырёх рассматриваемых станций нахождения вагонов.

В результате обработки численных данных табл. 2 методом наименьших квадратов для каждой станции найдено соответствующее аналитическое выражение зависимости стоимости перевозок c, тыс. руб., от расстояния l, км:

- Сальск $c = 18,11 + 0,02l$;
- Белореченская $c = 19,06 + 0,02l$;
- Полтавская $c = 13,73 + 0,02l$;
- Божковская $c = 14,95 + 0,02l$.

С точки зрения анализа грузовых перевозок в рассматриваемом регионе представляет интерес выяснение причины, почему при длине l пройденного маршрута для всех станций коэффициенты практически совпадали. Различия в стоимости перевозок между станциями проявились лишь в свободных членах найденных выражений.

Следующий шаг – построение евклидовой геометрической модели рассматриваемого олиго(дуо)полистического рынка грузовых перевозок. Результат этого построения служит теоретическим основанием для создания реальной маршрутизационной картины грузоперевозок в данном регионе для АО «ФГК».

Общие математические основы и методика построения указанной модели в системе аналитических вычислений разработаны в [1]. В отличие от предложенного в [1] подхода, в нашем исследовании окончательно будут фигурировать фактические расстояния перевозок грузов компании по железнодорожной сети.

В работе [1] показано, что при рассмотрении евклидова расстояния между объектами в случае дуополии (в данной работе – при рассмотрении любой пары станций) «территории влияния» станций разделяются алгебраической кривой 4-го порядка – овалом

ТАБЛИЦА 2. Ранжирование данных расстояний и стоимости перевозок

Порт	Станция							
	Сальск		Белореченская		Полтавская		Божковская	
n	*l*	*c*	*l*	*c*	*l*	*c*	*l*	*c*
1	196	21,8	126	21,6	102	15	157	16,3
2	207	25,6	345	26,4	135	19,8	189	22
3	262	23,8	394	31,9	201	18,5	241	19
4	339	24,8	424	28,4	240	17,4	321	19,9
5	418	27,7	435	33	261	20,3	531	27
6	429	29,4	460	30,9	289	19,5	564	31,7
7	467	33,2	480	29,2	300	24,1	581	29,6
8	533	32,2	486	31,1	351	22,1	630	28

Декарта. Обращение к системе компьютерной алгебры для решения задачи рыночного распределения грузоперевозок подразумевает использование аналитических, вычислительных, графических и анимационных возможностей и позволяет эффективно и наглядно оптимизировать географическое разграничение.

Введём на плоской географической карте рассматриваемого региона декартову систему координат, выбрав начало системы в месте расположения станции Сальск (крупная узловая станция). Это предположение носит условный характер и объясняется доминированием указанной станции среди рассматриваемых по ёмкости путевого развития. Оси абсцисс и ординат расположены, соответственно, с запада на восток и с юга на север.

При построении геометрической модели рынка грузовых перевозок исходим из того, что критерием разграничения «территорий влияния» станций нахождения вагонов является стоимость перевозки грузов с этих станций. Аналитические выражения стоимости перевозки *c* (тыс. руб.) от длины *l* (км) пройденного маршрута имеют следующий вид:

$$c_k(l) = p_k + ql; \;\; k = 1, 2, 3, 4.$$

То, что полученные коэффициенты *q* при длине *l* пройденного маршрута оказались практически одинаковыми для всех рассматриваемых станций, геометрически означает, что их «территории влияния» разграничены между собой кривыми 2-го порядка – ветвями гипербол [1, 2]. Если рассматривать некую пару станций независимо от других, то вся плоскость разбивается на две части ветвью гиперболы, фокусы которой находятся в этих станциях. При этом указанная ветвь расположена ближе к той станции, у которой больше значение p_k.

Например, коэффициент $p_4 = 14,95$ станции Божковской больше соответствующего коэффициента $p_3 = 13,73$ станции Полтавской. Соответственно, в евклидовой геометрической модели «территории влияния» этих двух станций разграничиваются ветвью гиперболы, изображённой на рис. 3а. Аналогично для дуополии Белореченская – Божковская с $p_2 = 19,06$ и $p_4 = 14,95$, соответственно, территории грузовых перевозок разделяются ветвью гиперболы, изображённой на рис. 3б.

Геометрическая картина присутствия в модели рынка грузовых перевозок всех четырёх станций представляется $C_4^2 = 6$ кривыми. Однако в результате введения числовых данных настоящей задачи в систему компьютерной алгебры получаются изображения только пяти ветвей гипербол.

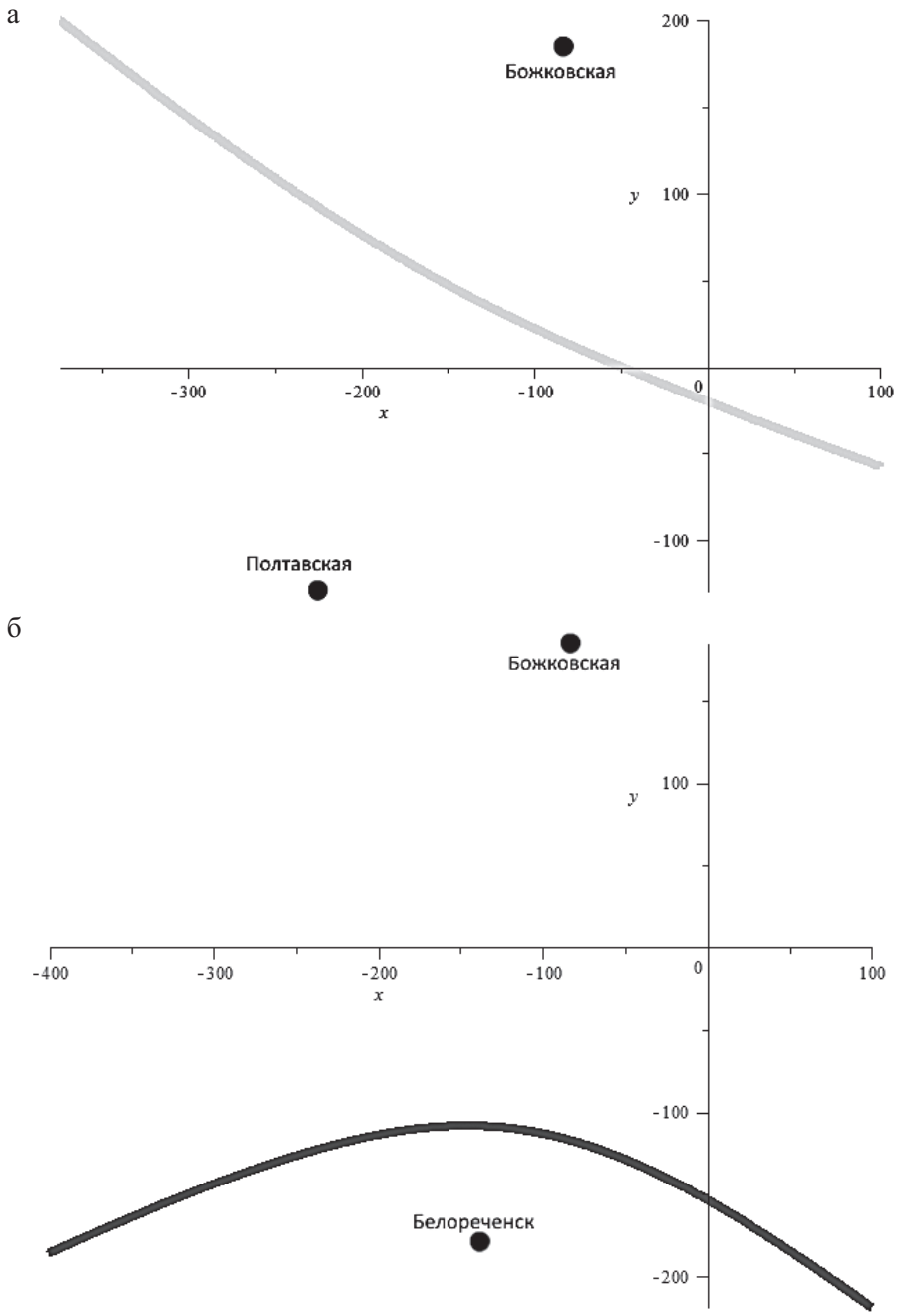


Рис. 3. Схема разграничения «территорий влияния» двух станций:
а) Божковская – Полтавская; б) Белореченская – Божковская

Данный факт объясняется тем, что при выполнении неравенства

$$p_2 - p_3 > Lq,$$

где L – евклидово расстояние между рассматриваемыми станциями, вся плоскость оказывается «территорией влияния» станции с меньшим коэффициентом p_3 [1]. В данном случае L=148, $p_2 - p_3 = 5,33$ и $Lq = 148 \cdot 0,02 = 2,96$. Таким образом, указанное неравенство выполняется с большим запасом.

Так как $p_2 = 19,06$ станции Белореченской значительно больше $p_3 = 13,73$ станции Полтавской (т. е. экономичность грузовых перевозок со ст. Белореченская ниже, чем со

ст. Полтавской), в дуополии Белореченская – Полтавская вся плоскость оказывается «территорией влияния» второй станции.

Полная евклидова экономико-географическая схема рассматриваемого олиго(дуо)полического рынка разграничения грузоперевозок приведена на рис. 4.

В результате «территория влияния» станции Сальск представляет собой область, ограниченную ветвями гипербол «б» и «в» и оказывается весьма незначительной.

Ни одна из рассматриваемых станций-портов не может быть отнесена к ней с точки зрения экономичности перевозок.

«Территория влияния» станции Божковской ограничена ветвями гипербол «д» и «в» и существенно больше предыдущей. Ограниченная ветвями гипербол «д» и «б» «территория влияния» станции Полтавской показывает, что эта станция доминирует с точки зрения экономичности на рынке перевозок в рассматриваемом регионе.

Корректировка географической маршрутизационной модели перевозок грузов операторской компании

В условиях реальной транспортной сети, когда конфигурация соединительных железнодорожных линий не обязательно состоит из прямолинейных отрезков и их протяженность между исследуемыми станциями определяется местными условиями, возможна корректировка «идеальной» геометрической евклидовой модели.

Возможная корректировка выполняется последовательным перебором расстояний перевозок до станций назначения, начиная от расположенных ближе всего к линиям

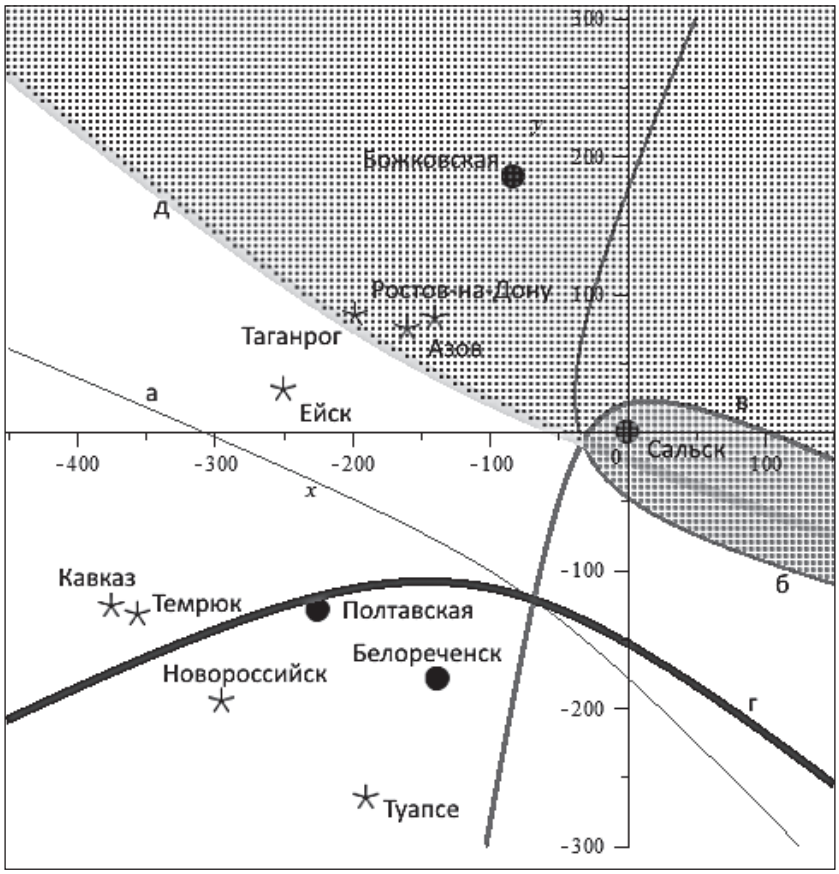


Рис. 4. Схема экономико-географического разграничения грузоперевозок операторской компании олиго(дуо)полистического транспортного рынка

раздела территорий между рассматриваемыми станциями нахождения вагонов. В результате получается реальная географическая маршрутизационная модель оптимизированного разграничения грузовых перевозок.

Например, рассмотрим припортовую станцию Таганрог, которая оказывается почти на линии, разделяющей «территории влияния» в геометрической модели дуополии станций Полтавская – Божковская (рис. 4). Длина кратчайшего железнодорожного маршрута от ст. Полтавская до ст. Таганрог составляет 351 км, а от ст. Божковская – 241 км. Пользуясь полученными для каждой станции аналитическими зависимостями стоимости c (тыс. руб.) перевозки от длины l (км) пройденного маршрута, получим:

$$c_{\text{П}} = 13,73 + 0,02 \cdot 351 = 20,75;$$
$$c_{\text{Бож}} = 14,95 + 0,02 \cdot 241 = 19,77.$$

В результате $c_{\text{Бож}} = 19,77 < 20,75 = c_{\text{П}}$. Таким образом, расположение припортовой ст. Таганрог по отношению к станциям Полтавской и Божковской в географической маршрутизационной модели совпадает с её расположением по отношению к этим станциям в «идеальной» геометрической модели. Корректировки не требуется.

Для припортовой ст. Туапсе длина соединительной линии со ст. Белореченской составляет 126 км. Пользуясь соответствующими формулами для станций Белореченской и Полтавской, получим:

$$c_{\text{Бел}} = 19,06 + 0,02 \cdot 126 = 21,58;$$
$$c_{\text{П}} = 13,73 + 0,02 \cdot 261 = 18,95.$$

Так как $c_{\text{П}} = 18,95 < 21,58 = c_{\text{Бел}}$, корректировки также не требуется.

Выводы

В современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта необходима эффективная и экономически обоснованная система управления грузоперевозками на основе детального анализа плана возврата порожнего вагонопотока, корректировки показателей работы с учетом развития инфраструктуры, новых логистических решений и методов распределения приватных вагонных парков в части как гружёного, так и порожнего рейса.

Исследования показали, что применение метода экономико-географического разграничения положения подвижного состава операторской компании для перевозок грузов от сетевых до припортовых станций на основе сформированной географической маршрутизационной схемы западной части Северо-Кавказского транспортного региона позволяет сократить транспортные издержки на 6–8 % и повысить конкурентоспособность компании в условиях олиго(дуо)полии.

Библиографический список

1. Богачев В. А. Использование информационных технологий при изучении математических дисциплин. Комплексный анализ. Теория операторов. Математическое моделирование / В. А. Богачев, Т. В. Богачев. – Владикавказ : Изд-во ВНЦ РАН, 2006.

2. Богачев В. А. Системы аналитических вычислений при изучении рынков сбыта в условиях олигополии / В. А Богачев, Т. В. Богачев // Вестн. РГУПС. – 2014. – № 2. – С. 112–116.

3. Бородин А. Ф. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли приватных вагонов / А. Ф. Бородин, Е. А. Сотников // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 8–19.

4. Задорожний В. М. Анализ степени использования подвижного состава операторских компаний на полигоне Северо-Кавказской железной дороги / В. М. Задорожний // Современные аспекты транспортной логистики : сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2014. – С. 127–132.

5. Задорожний В. М. Организация работы операторских компаний в системе южнопортовых

транспортных коридоров / В. М. Задорожний // Современные концепции научных исследований : сб. науч. работ. – М., 2014. – С. 142–146.

6. ПГК принимает участие в транспортном форуме «ЮгТранс-2014». – URL : http://myrailway.ru/news/pgk-prinimaet-uchastie-v-transportnom-forume-yugtrans-2014 (дата обращения 23.07.2014).

7. Первая грузовая компания. – URL : http://www.pgkweb.ru (дата обращения 15.06.2016).

8. Постановление правительства РФ от 25.07.2013 г. № 626 «Об утверждении Положения об основах правого регулирования деятельности операторов железнодорожного подвижного состава и их взаимодействия с перевозчиками».

9. Русагротранс. – URL : http://www.rusagrotrans.ru (дата обращения 15.06.2016).

10. Технологический аутсорсинг, предложенный ОАО «РЖД», позволяет повысить эффективность использования подвижного состава и инфраструктуры. – URL : http://ru.railfgk.ru/mediacenter/media/23062014 (дата обращения 08.10.2015).

11. ФГК и «РЖД» не будут продлевать договор об управлении порожними вагонами. – URL : http://press.rzd.ru/smi/public/ru?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&id=285342 (дата обращения 08.10.2015).

12. Федеральная грузовая компания. – URL : http://ru.railfgk.ru (дата обращения 15.06.2016).

13. Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (ред. от 06.04.2015) «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации».

14. Хусаинов Ф. И. Демонополизация железнодорожного транспорта и развитие системы операторских компаний : моногр. / Ф. И. Хусаинов. – Саратов, 2009. – 322 с.

15. Числов О. Н. Методы прогрессивного распределения порожних вагонопотоков в припортовой транспортно-технологической системе / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. М. Задорожний, Т. В. Богачев // Вестн. РГУПС. – 2015. – № 4 (60). – С. 92–103.

References

1. Bogachev V. A. & Bogachev T. V. Ispolzovaniye informatsionnykh tekhnologiy pri izuchenii matematicheskikh distsiplin. Kompleksnyy analiz. Teoriya operatorov. Matematicheskoye modelirovaniye [Application of Information Technologies in Studying Mathematical Disciplines. Complex Analysis. Operator Theory. Mathematical Simulation]. Vladikavkaz, Izdatelstvo VNTs RAN, 2006.

2. Bogachev V. A. & Bogachev T. V. *Vestnik RGUPS – Rostov State Transport Univ. Bull.*, 2014, no. 2, pp. 112-116.

3. Borodin A. F.& Sotnikov Ye. A. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transp.*, 2011, no. 3, pp. 8-19.

4. Zadorozhniy V. M. Analiz stepeni ispolzovaniya podvizhnogo sostava operatorskikh kompaniy na poligone Severo-Kavkazskoy zheleznoy dorogi [Analysis of the Utilisation Factor of Operator Companies' Rolling Stock in the Domain of the North Caucasus Railway]. *Sovremennyye aspekty transportnoy logistiki: Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Modern Aspects of Transport Logistics: Coll. Papers of the Int. Sci. and Practical Conference]*. Khabarovsk, Izdatelstvo DVGUPS, 2014. Pp. 127-132.

5. Zadorozhniy V. M. Organizatsiya raboty operatorskikh kompaniy v sisteme yuzhnoportovykh transportnykh koridorov [Organisational Management of Operator Companies in the System of Sourthern Port Transport Corridors]. *Sovremennyye kontseptsii nauchnykh issledovaniy: sbornik nauchnykh rabot [Modern Conceptions of Scientific Research: Coll. Sci. Papers]*. Moscow, 2014. Pp. 142-146.

6. PGK prinimayet uchastiye v transportnom forume "YugTrans-2014" [Freight One JSC takes part in YugTrans-2014 transport forum], available at: http://myrailway.ru/news/pgk-prinimaet-uchastie-v-transportnom-forume-yugtrans-2014.

7. Pervaya gruzovaya kompaniya [Freight One JSC], available at: http://www.pgkweb.ru.

8. Russian Federation government order № 626 issued on Jul. 25, 2013 „Ob utverzhdenii Polozheniya ob osnovakh pravovogo regulirovaniya deyatelnosti operatorov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i ikh vzaimodeystviya s perevozchikami" [On Approving Basic Provisions for Legal Regulation of Operation of Railway Rolling Stock Operators and Their Interaction with Transport Operators].

9. Rusagrotrans, available at: http://www.rusagrotrans.ru.

10. Tekhnologicheskiy autsorsing, predlozhennyy OAO «RZhD», pozvolyayet povysit effektivnost ispolzovaniya podvizhnogo sostava i infrastruktury [Technological Outsourcing Proposed by the Russian Railways JSC Allows to Increase Efficiency of Utilisation of Rolling Stock and Infrastructure], available at: http://ru.railfgk.ru/mediacenter/media/23062014.

11. FGK i „RZhD“ ne budut prodlevat dogovor ob upravlenii porozhnimi vagonami [Federal Freight JSC and Russian Railways Will Not Extend a Contract for Operation of Empty Waggons], available at: http://press.rzd.ru/smi/public/ru?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&id=285342.

12. Federal Freight JSC, available at: http://ru.railfgk.ru.

13. Federal law N 18-FZ issued on Jan. 10, 2003 (revised on Apr. 6, 2015) „Ustav zheleznodorozhnogo transporta Rossiyskoy Federatsii“ [Statute for the Railway Transport of the Russian Federation].

14. Khusainov F.I. Demonopolizatsiya zheleznodorozhnogo transporta i razvitiye sistemy operatorskikh kompaniy: monografiya [Demonopolisation of the Railway Transport and Development of the Operator Company System: A Monograph]. Saratov, 2009. 322 p.

15. Chislov O.N., Bogachev V.A., Zadorozhniy V.M. & Bogachev T.V. *Vestnik RGUPS – Rostov State Transp. Univ. Bull.*, 2015, no. 4 (60), pp. 92-103.

*ЧИСЛОВ Олег Николаевич – доктор техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, o_chislov@mail.ru; БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, bogachev-va@yandex.ru; ЗАДОРОЖНИЙ Вячеслав Михайлович – ассистент, zadorozniy91@mail.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения); БОГАЧЕВ Тарас Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент, bogachev73@yandex.ru (Ростовский государственный экономический университет).

УДК 625.172

В. П. Бельтюков, А. В. Андреев

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ НА УЧАСТКАХ С РАЗНЫМИ УСЛОВИЯМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Дата поступления: 19.04.2016
Решение о публикации: 23.06.2016

Цель: Определить стоимость технического обслуживания и ремонтов пути с учетом понятия о стоимости жизненного цикла объекта; срок службы верхнего строения пути из условия минимума стоимости жизненного цикла. **Методы:** Использован статистический метод обработки данных автоматизированных систем управления. Применено моделирование жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути. **Результаты:** На основе отраслевой нормативной документации методологии «УРРАН» разработана методика определения стоимости межремонтного цикла, сформулирован метод определения стоимости технического обслуживания и ремонтов, установлен примерный диапазон сроков службы из условия минимальной стоимости технического обслуживания и ремонтов. Рассчитана минимальная стоимость технического обслуживания и ремонтов пути на разных этапах межремонтного цикла. **Практическая значимость:** Рассмотренный метод определения стоимости технического обслуживания и ремонтов закладывает основу принятия управленческих решений при определении стратегии содержания железнодорожного пути и выбора его оптимальных конструкций в разных условиях эксплуатации.

Железнодорожный путь, жизненный цикл, стоимость жизненного цикла, межремонтный цикл, техническое обслуживание пути, ремонт пути, условия эксплуатации, верхнее строение пути.

Vladimir P. Beltyukov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, bw@peterlink.ru; ***Andrey V. Andreyev**, assistant, oddman@bk.ru (Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES OF LIFE CYCLE COST CALCULATION OF TRACK SUPERSTRUCTURE ON SECTIONS WITH DIFFERENT OPERATIONAL CONDITIONS

Objective: To calculate the cost of track maintenance and repair taking into account the concept of an object's life cycle cost, and service life of track superstructure proceeding from the condition of minimum life cycle cost. **Methods:** Statistical method of processing automated control systems data was used. Modelling of rail track superstructure life cycle was applied. **Results:** On the basis of industry-specific regulatory documents for URRAN methodology, a method for assessing inter-repair cycle cost was developed, a method for assessing maintenance and repair costs was formulated, and approximate range of service life length was set from a condition of minimum cost of maintenance and repair. Minimum cost of track maintenance and repair at different stages of inter-repair cycle was calculated. **Practical importance:** The method for assessing maintenance and repair costs which was considered in the paper forms basis for taking managerial decisions in determining strategy for rail track maintenance and for choosing best possible designs under different operating conditions.

Railroad track, life cycle, life cycle cost, inter-repair cycle, track maintenance, track repair, operating conditions, track superstructure.

Вопрос оптимального выбора конструкции пути затрагивает все этапы его жизненного цикла, но наиболее важен он для этапа владения объектом (его технического содержания) [2]. Чем чаще производятся техническое обслуживание и ремонты (ТО и Р) пути, тем дороже стоит весь цикл. Также частые работы означают, что те элементы конструкции, которые были использованы на этапе укладки, недостаточно надежны. При этом каждый элемент мог работать дольше, но их объединение в общую конструкцию укорачивает жизненный цикл верхнего строения пути (ВСП). Это означает, что рассматривать конструкцию пути нужно в целом, учитывая специфику параметров отдельных частей.

Важным параметром при анализе жизненного цикла пути является его стоимость. Стоимость жизненного цикла пути – совокупность взаимосвязанных, последовательных процессов установления требований, создания, применения и утилизации объекта, происходящих в течение времени с этапа создания концепции объекта до этапа его утилизации. Исходными данными для нахождения стоимости жизненного цикла являются затраты на этапах цикла [1]. Затраты зафиксированы в финансовых документах. Их анализируют и включают в расчет стоимости жизненного цикла.

Жизненный цикл элементов ВСП включает пять этапов:

• разработку проекта капитального ремонта (реконструкции);

• приобретение элементов ВСП;

• сборку рельсошпальной решетки и укладку ВСП [8];

• техническое обслуживание и ремонт пути [4];

• замену ВСП.

Рассмотрим межремонтный цикл верхнего строения железнодорожного пути, который начинается с приобретения материалов и сборки рельсошпальной решетки и укладки ее в путь, продолжается во время её эксплуатации и заканчивается разборкой путевой решетки [6, 9]. Общую стоимость жизненного цикла на всех этих этапах с учетом утилизации материалов можно обозначить как стоимость межремонтного цикла (СМЦ) [13].

Расчет стоимости технического обслуживания и ремонтов пути

СМЦ будет определяться как сумма стоимости материалов и затрат на трех этапах (сборки, ТО и Р и замены) [3]. При этом следует учитывать, что на этапе разборки решетки часть элементов (шпалы, рельсы, скрепления) оставляют для дальнейшего использования, а другую часть утилизируют. Затраты на вновь используемые материалы ВСП считаются отдельно и называются возвратной стоимостью.

Таким образом, СМЦ находят по формуле

$$\text{СМЦ} = \text{С}_{\text{мат}} + \text{С}_{\text{сб}} + \text{С}_{\text{ТОиР}} + \text{С}_{\text{ут}} - \text{С}_{\text{взр}},$$

где $\text{С}_{\text{мат}}$ – стоимость материалов; $\text{С}_{\text{сб}}$ – стоимость сборки рельсошпальной решетки и укладки ВСП; $\text{С}_{\text{ТОиР}}$ – стоимость ТО и Р пути; $\text{С}_{\text{ут}}$ – стоимость утилизации ВСП; $\text{С}_{\text{взр}}$ – возвратная стоимость материалов ВСП.

С точки зрения выбора стратегии содержания и оптимизации конструкции пути большой интерес представляет стоимость ТО и Р пути. Именно на этом этапе изнашиваются элементы ВСП, которые влияют на срок его службы.

В отраслевых стандартах [11] приведена формула для нахождения стоимости на этапе владения объектом. В случае рассмотрения элементов ВСП этап владения заменяется на этап ТО и Р пути. Таким образом, стоимость работ по ТО и Р пути будет определяться по формуле

$$\text{С}_{\text{ТОиР}} = \text{З}_{\text{ЕВ}} + \text{З}_{\text{Э}} + \text{З}_{\text{пл.ТОиР}} + \text{З}_{\text{непл.ТОиР}}, \quad (1)$$

где $\text{З}_{\text{ЕВ}}$ – единовременные затраты на ввод в эксплуатацию; $\text{З}_{\text{Э}}$ – затраты на эксплуата-

цию; $З_{пл.ТОиР}$ – затраты на плановое ТО и Р; $З_{непл.ТОиР}$ – затраты на неплановое ТО и Р.

Пренебрегая единовременными затратами на ввод в эксплуатацию, отнесенными к этапу укладки рельсошпальной решетки, и затратами на эксплуатацию, приведем формулу (1) к виду

$$С_{ТОиР} = З_{пл.\ ТОиР} + З_{непл.ТОиР}$$

либо

$$С_{ТОиР} = З_{ТО} + З_{Р},$$

где $З_{ТО}$ – затраты на плановое и неплановое техническое обслуживание пути; $З_{р}$ – затраты на ремонты пути.

Затраты на ТО и Р при организации исследования можно получить из калькуляций исполнителей работ [15]. При этом затраты на ремонты являются единовременными, а на техническое обслуживание – постоянными с тенденцией возрастания по закону Вейбулла [10]. Сама тенденция возрастания затрат при техническом обслуживании обусловлена возрастанием интенсивности отказов в путевом хозяйстве. В отраслевых стандартах [12] приведены виды и степени отказов в путевом хозяйстве.

Определение минимальной стоимости ТО и Р для конструкций ВСП

Критерий оптимального выбора элементов ВСП – достижение минимальной стоимости межремонтного цикла. Чтобы найти минимальную величину затрат на этапе эксплуатации пути, нужно проследить за динамикой прироста затрат на техническое обслуживание и за величиной восстановительных начислений на ремонты пути.

Для примера определения минимальной стоимости ТО и Р взят анализ динамики прироста затрат на текущее содержание пути за последние пять лет на участках с разными типовыми условиями эксплуатации бесстыкового пути с железобетонными шпалами, рельсами типа Р65 и скреплениями типа КБ. Восстановительную стоимость ремонтов определяли по формуле из технических условий [5, 14] как отношение стоимости ремонтов и длительности межремонтного цикла. Стоимость ТО и Р определяется на каждый миллион тонно-километров брутто провозимого груза в течение межремонтного цикла. Для определения срока наступления минимального значения стоимости ТО и Р тоннаж приравнен к определенной временно́й отметке через показатель грузонапряженности исходя из выражения

$$t = \frac{Т}{Г},$$

где t – время с начала межремонтного цикла, год; Г – грузонапряженность на участке, млн ткм бр/км в год; Т – пропущенный тоннаж, млн ткм бр.

В качестве участков с разными типовыми условиями эксплуатации в исследовании рассматривались скоростные участки (скорость выше 140 км/ч), особогрузонапряженные (грузонапряженность выше 100 млн ткм бр), участки с высокой долей пассажирского движения (количество пассажирских поездов более 30 шт. в сутки), участки с кривыми малого (менее 350 м) и среднего (350–650 м) радиуса, перевальные участки (уклон выше 15 ‰ в сочетании с кривыми малых радиусов) и участки с продолжительностью зимнего периода пять и семь месяцев [7].

Грузонапряженность для различных типовых условий эксплуатации принималась среднесетевой для рассматриваемых участков. Расчет производили по формуле

$$\overline{Г} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Г \cdot l}{\sum_{i=1}^{n} l},$$

где Г – грузонапряженность на участке, млн ткм бр/км в год; l – длина рассматриваемого участка, км; n – количество рассматриваемых участков, шт.

В табл. 1 приведены показатели грузонапряженности для участков с разными типовыми условиями эксплуатации.

В табл. 2 указаны основные характеристики расчета стоимости ТО и Р и пример расчета для первой тысячи миллионов тонно-

ТАБЛИЦА 1. Среднесетевая грузонапряженность для участков с разными условиями эксплуатации

Участки	Грузонапряженность, млн ткм бр/км в год
Особогрузонапряженные	114,78
С высокой долей пассажирского движения	32,8
Скоростные	25,37
С продолжительностью зимнего периода 5 месяцев	53,28
С продолжительностью зимнего периода 7 месяцев	17,73
С кривыми среднего радиуса	46,61
С кривыми малого радиуса	20,18
Перевальные	44,43

ТАБЛИЦА 2. Расчет стоимости ТО и Р

Периодичность капитальных ремонтов (реконструкций, модернизаций), при которых достигается минимальная стоимость ТО и Р		Затраты на техническое обслуживание пути $З_{ТО}$, млн руб.	Затраты на ремонты пути $З_{Р}$, млн руб.	Стоимость ТО и Р $С_{ТОиР}$, млн руб.
Лет	Млн ткм брутто			
0,44	50	0,12	34,57	34,69
0,87	100	0,18	17,29	17,47
1,31	150	0,24	11,52	11,76
1,74	200	0,30	8,64	8,94
2,18	250	0,36	6,91	7,27
2,61	300	0,42	5,76	6,18
3,05	350	0,48	4,94	5,42
3,48	400	0,55	4,32	4,87
3,92	450	0,62	3,84	4,46
4,36	500	0,70	3,46	4,16
4,79	550	0,78	3,14	3,92
5,23	600	0,86	2,88	3,74
5,66	650	0,94	2,66	3,60
6,10	700	1,02	2,47	3,49
6,53	750	1,11	2,30	3,41
6,97	800	1,20	2,16	3,36
7,41	850	1,30	2,03	3,33
7,84	900	1,40	1,92	3,32
8,28	950	1,49	1,82	3,31
8,71	1000	1,60	1,73	3,33

километров брутто пропущенного тоннажа на особогрузонапряженном участке пути.

На основе расчетных таблиц построены графики зависимостей затрат от пропущенного тоннажа и срока службы пути (см. рисунок).

На рисунке штриховой линией показан график возрастания затрат на техническое обслуживание, пунктиром – график зависимости годовых восстановительных отчислений от периодичности ремонтов, сплошной линией – стоимость ТО и Р в целом. Точкой отмечена минимальная стоимость ТО и Р пути.

На основе этих графиков можно сделать вывод о сроке наступления минимальной затратности. В табл. 3 указаны сроки наступления

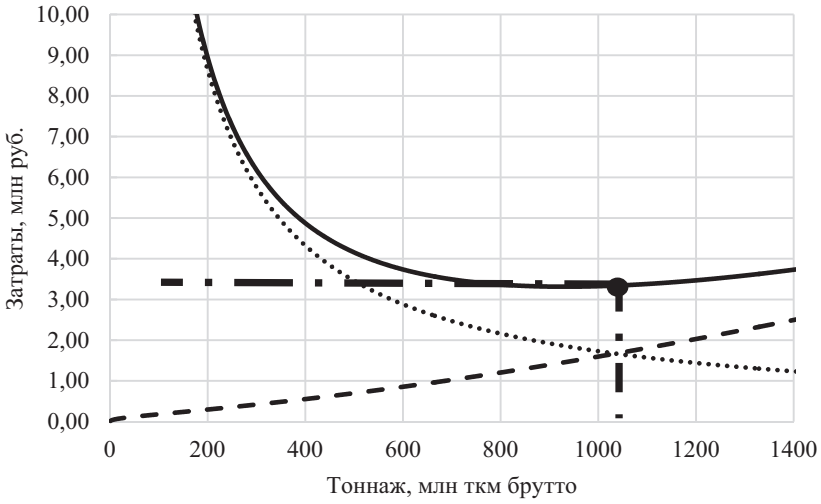


График зависимости затрат от тоннажа при расчете стоимости технического обслуживания и ремонтов пути для особогрузонапряженных участков

ТАБЛИЦА 3. Расчетные показатели стоимостей ТО и Р для участков с различными условиями эксплуатации

Участки	Периодичность капитальных ремонтов (реконструкций, модернизаций), при которых достигается минимальная стоимость ТО и Р		Затраты на техническое обслуживание пути $З_{ТО}$, млн руб.	Затраты на ремонты пути $З_{Р}$, млн руб.	Стоимость ТО и Р $С_{ТОиР}$, млн руб.
	Лет	Млн ткм брутто			
ОГ	8,1	931	1,46	1,86	3,31
ПД	14,0	459	1,12	1,08	2,20
СД	13,9	353	1,91	1,08	2,99
З5	10,4	556	1,03	1,44	2,47
З7	11,7	208	4,26	1,28	5,50
СР	10,1	471	1,02	1,49	2,51
МР	12,5	253	0,82	1,20	2,02
ПУ	10,6	473	2,53	1,41	3,95

Примечания. ОГ – особогрузонапряженные участки; ПД – участки с высокой долей пассажирского движения; СД – участки скоростного движения; З5 – участки с продолжительностью зимнего периода пять месяцев; З7 – участки с продолжительностью зимнего периода семь месяцев; СР – участки с кривыми среднего радиуса; МР – участки с кривыми малого радиуса; ПУ – перевальные участки.

экстремума затратности для различных условий эксплуатации и показатели стоимостей ТО и Р.

На основе табл. 3 можно сделать вывод, что минимальная стоимость ТО и Р для особогрузонапряженных участков наступает уже на 9-й год после начала эксплуатации, а для участков скоростного движения – на 14-й год. Эти различия можно объяснить интенсивностью работы участков с большой грузонапряженностью и малыми нагрузками при осуществлении скоростного движения, что приводит к большому износу элементов ВСП в первом случае и меньшим выходам материалов ВСП – во втором.

Заключение

На основе отраслевой нормативной документации методологии «УРРАН» разработана методика определения стоимости межремонтного цикла, сформулирован метод определения стоимости технического обслуживания и ремонтов, установлен примерный диапазон сроков службы из условия минимальной стоимости технического обслуживания и ремонтов. Рассчитана минимальная стоимость технического обслуживания и ремонтов пути на разных этапах межремонтного цикла.

Библиографический список

1. Андреев А. В. Методика определения стоимости жизненного цикла конструкции пути с учетом прогнозирования технического состояния пути / А. В. Андреев // «Путь XXI века» : сб. науч. трудов междунар. науч.-метод. конф. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 188–193.

2. Ашпиз Е. С. Железнодорожный путь : учеб. / Е. С. Ашпиз, А. И Гасанов, Б. Э. Глюзберг и др. ; под ред. Е. С. Ашпиза. – М. : УМЦ ЖДТ, 2013. – 544 с.

3. Бельтюков В. П. Выбор оптимальной конструкции пути в зависимости от стоимости жизненного цикла / В. П. Бельтюков // Проблемы взаимодействия пути и подвижного состава : тр. междунар. науч.-практич. конф., Днепропетровск, 18–19 сент. 2013 г. – Днепропетровск : ДИИТ, 2013. – С. 60–61.

4. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2791 р от 29.12.2012 г.

5. О внесении изменений и дополнений в Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 101р от 21.01.2015 г.

6. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги» : распоряжение ОАО «РЖД» № 3212 р от 31.12.2015 г.

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России № 286 от 21.12.2010 г.

8. Распоряжение о нормативных сроках выполнения капитального ремонта ОАО «РЖД» № 2539р от 12.12.2012 г.

9. Ремонтные схемы и нормативы периодичности реконструкции (модернизации) и ремонтов балластного пути на высокоскоростных линиях (более 200 до 250 км/час) : распоряжение ОАО «РЖД» № 2804 р от 19.12.2013 г.

10. Симонюк И. А. Исследование изменения технического состояния рельсовой колеи в период между ремонтами при различных конструкциях пути и условиях эксплуатации / И. А. Симонюк // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1. – С. 151–157.

11. СТО РЖД 02.037-2011. Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД». Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 28 с.

12. СТО РЖД 02.041-2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Системы, устройства и оборудование путевого хозяйства. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 27 с.

13. СТО РЖД 02.044-2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 2011. – 41 с.

14. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодо-

рожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 75р от 18.01.2013 г.

15. Экономика строительства : учеб. / под ред. И. С. Степанова. – М. : Юрайт, 1997. – 620 с.

References

1. Andreyev A.V. Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla konstruktsii puti s uchetom prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti [Method for Assessing Track Design Life Cycle Cost Accounting for Forecast of Track Technical Condition. *"Put XXI veka": sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [21st Century Track: Coll. Papers of Int. Sci. and Practical Conf.]*. St. Petersburg, PGUPS, 2013. Pp. 188-193.

2. Ashpiz Ye. S., Gasanov A. I., Glyuzberg B. E. et al. Zheleznodorozhnyy put: uchebnik [Railroad Track: Course Book]; ed. Ye. S. Ashpiz. Moscow, UMTs ZhDT, 2013. 544 p.

3. Beltyukov V. P. Vybor optimalnoy konstruktsii puti v zavisimosti ot stoimosti zhiznennogo tsikla [Selection of Optimum Track Design Depending on Life Cycle Cost]. *Problemy vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava: Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Problems in Interaction between Track and Rolling Stock: Proc. of Int. Sci. and Practical Conf.]*, Dnipropetrovsk, September 18–19, 2013. Dnipropetrovsk, DIIT, 2013. Pp. 60-61.

4. Instruction on Running Maintenance of Railroad Track: Russian Railways JSC order No. 2791r issued on December 29, 2015.

5. On Changes and Amendments to Technical Conditions for Works on Reconstruction (Modernisation) and Repair of Railroad Track: Russian Railways JSC order No. 101r issued on January 21, 2015.

6. Statutes on Track Facilities Maintenance System of Russian Railways JSC (Approved by the Order of Russian Railways JSC No. 3212r on December 31, 2015). Moscow, Russian Railways JSC, 2015.

7. Rules of Technical Operation of Russian Federation's Railways: Russian Transport Ministry order No. 286 issued on December 21, 2010.

8. Russian Railways JSC Order on Standard Terms for Full Repairs No. 2539r issued on December 12, 2012.

9. Repair Diagrams and Frequency Guidelines for Reconstruction (Modernisation) and Repairs of Ballast Track on High-Speed Lines (Between 200 and 250 km/h): Russian Railways JSC Order No. 2804r issued on December 19, 2013.

10. Simonyuk I. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ*., 2013, Is. 1, pp. 151-157.

11. Russian Railways JSC Company Standard 02.037-2011. Life Cycle Cost Management of Systems, Equipment and Facilities of Russian Railways JSC. Management of Resources on Life Cycle Stages, Risks and Reliability Analysis (URRAN). Moscow, Izdatelstvo standartov, 2011. 28 p.

12. Russian Railways JSC Company Standard 02.041-2011. Management of Resources on Life Cycle Stages (URRAN). Systems, Facilities and Track Infrastructure Equipment. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2011. 27 p.

13. Russian Railways JSC Company Standard 02.044-2011. Management of Resources, Risks and Reliability on Life Cycle Stages (URRAN). Terms and Definitions. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2011. 41 p.

14. Technical Conditions for Works on Reconstruction (Modernisation) and Repair of Railroad Track: Russian Railways JSC order No. 75r issued on January 18, 2013.

15. Ekonomika stroitelstva: uchebnik [Construction Economy: Course Book]; ed. I. S. Stepanov. Moscow, Yurayt, 1997. 620 p.

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, bw@peterlink.ru; *АНДРЕЕВ Андрей Викторович – ассистент, oddman@bk.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.172

В. П. Бельтюков, А. А. Третьяков

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТИ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕМОНТАХ ПУТИ

Дата поступления: 29.03.2016
Решение о публикации: 31.08.2016

Цель: Разработать комплексное системное решение по оценке потребности в ремонте пути в рамках жизненного цикла между капитальными ремонтами, а также критерии оценки потребности в техническом обслуживании и ремонте пути с разделением критериев по ключевым конструкционным, эксплуатационным, природно-климатическим факторам; улучшить интегральные методы оценки параметров технического состояния верхнего строения пути и статистическую отчетность о его эксплуатации. **Методы:** Использован статистический метод обработки данных автоматизированных систем управления путевой инфраструктурой. Применена классификация путевых работ в зависимости от вида обслуживаемого элемента конструкции пути и потенциально потребного промежуточного ремонта. Стоимость жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути моделировалась в интервале между капитальными ремонтами. **Результаты:** Рассмотрена возможность оценки потребности в промежуточных ремонтах железнодорожного пути на основе анализа статистической отчетности о выполненных путевых работах, данных диагностики, собранных из автоматизированных систем управления путевой инфраструктурой. **Практическая значимость:** Рассмотренный подход дает системное решение оценки потребности в промежуточных ремонтах пути: при оценке потребности в ремонте рассчитываются интегральные показатели технико-экономического состояния верхнего строения железнодорожного пути, выполняются оптимизационное моделирование стоимости жизненного цикла железнодорожного пути для выбора экономически эффективной стратегии его содержания, а также комплексная оценка эксплуатируемой инфраструктуры с указанием потребных мер управляющего воздействия. Источником проведения расчетов служит статистическая отчетность об эксплуатации верхнего строения железнодорожного пути и результаты его диагностики. Описываемые методики предполагают проведение автоматизированных расчетов на уровне дирекций инфраструктуры.

Железнодорожный путь, комплексная оценка, промежуточный ремонт, стоимость жизненного цикла, критерии назначения ремонтов.

Vladimir P. Beltyukov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, bw@peterlink.ru; ***Aleksandr A. Tretyakov**, postgraduate student, eskalran@mail.ru (Petersburg State Transport University)
COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF A NEED IN INTERIM TRACK REPAIRS

Objective: To develop comprehensive systemic solution for assessment of the need for track repair within life cycle between full repairs, as well as criteria for assessment of the need for track maintenance and repair, with criteria distributed by key design, operational, and natural-environment and climatic factors; to improve integral methods of evaluation of parameters of technical condition of track superstructure and statistical reporting of its operation. **Methods:** Statistical method for processing data of the automated track infrastructure control systems was applied. Classification of track work based on the serviced track infrastructure element and potentially required interim repair was applied. Life cycle cost of rail track structure was modelled in the interval between full repairs. **Results:** Possibility of estimating the need in interim rail track repairs was considered, based on analysis of statistical reports

on completed track work and diagnostics data collected from automated track infrastructure control systems. **Practical importance:** The considered approach gives a systemic solution to estimation of the need for interim track repairs. When estimating the need for repair, integral indices of technical and economic state of rail structure are calculated, optimisation modelling of rail track life cycle cost is conducted to choose economically efficient strategy of its maintenance, as is comprehensive assessment of operated infrastructure with required measures of controlling actions listed. Sources for calculation were statistical reports on operation of rail track structures and results of their diagnostics. Methods described suppose automated calculations on the level of infrastructure directorates.

Rail track, comprehensive assessment, interim repair, life cycle cost, repair prescription criteria.

При обслуживании путевой инфраструктуры с целью обеспечения перевозочного процесса в целом (в частности, для обеспечения специализированных видов перевозок – тяжеловесных, высокоскоростных и т. д.) определяющее влияние оказывают качество и своевременность промежуточных ремонтов железнодорожного пути. Вовремя выполненные промежуточные ремонты снижают интенсивность расстройства пути после окончания периода нормальной эксплуатации.

Комплексная оценка объектов инфраструктуры для планово-предупредительных ремонтов: актуальность и трудности

Основная трудность в планировании промежуточных ремонтов пути состоит в предупреждении начала интенсивного расстройства пути после окончания периода нормальной эксплуатации. При этом частота отказов и неисправностей, развивающихся в пути от наработки, различна на путях с разными конструкцией и условиями эксплуатации. Соответственно, количество накопленных неисправностей на данных путях также различается [7].

При обосновании общего правила для планирования промежуточных ремонтов пути необходимо определиться:

• с параметрами, которые наиболее полно характеризуют состояние пути, требующего промежуточного ремонта;

• механизмом учета разнородных параметров состояния пути, описывающих неисправное состояние;

• критериями достижения предельного состояния пути.

В совокупности перечисленные проблемы формируют методологию комплексной оценки объектов путевой инфраструктуры. В Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I изучают деградационные процессы железнодорожного пути на основании статистической отчетности о его эксплуатации [3], чтобы выявить закономерности и зависимости, объясняющие его работу в различных условиях.

Анализ данных по выполненным путевым работам, статистики об одиночной замене материалов верхнего строения пути, результатов поездок путеизмерителей показывает, что техническое состояние пути (накопление неисправностей при наработке) меняется нелинейно. Эти зависимости можно описать математически с использованием теории вероятности применительно к восстанавливаемым техническим системам [2].

Для каждого элемента конструкции пути характерны индивидуальные:

• внешний вид зависимости накопления неисправностей от наработки [8];

• гамма-процентный ресурс [4];

• затраты на устранение единичной неисправности;

• итоговые потребные затраты на техническое обслуживание элемента конструкции.

В совокупности на техническое обслуживание пути расходуются средства, которые

могут быть статистически описаны и с некоторой степенью вероятности спрогнозированы на определенный период в будущем.

Не менее значимой составляющей стоимости жизненного цикла железнодорожного пути по сравнению с текущим содержанием являются затраты на ремонт пути. Вместе они составляют затраты жизненного цикла конструкции пути, связанные с наработкой до ресурса. Эта величина, отнесенная к сроку службы пути, представляет собой средние ежегодные расходы на проведение технического обслуживания и ремонтов пути [1, 12–15].

Именно эта величина – стоимость жизненного цикла, приходящаяся на один год эксплуатации пути, – является эффективным критерием оптимизации. Если выстроить систему технического обслуживания и ремонтов с обеспечением минимума средней стоимости жизненного цикла пути за один год, то в период между капитальными ремонтами будет гарантирована безопасная эксплуатация с наименьшими из возможных затрат на обслуживание пути.

Оценка потребности в промежуточных ремонтах пути

В одной из работ авторов, посвященной анализу применения расчетов стоимости жизненного цикла к оптимизации содержания пути, основное внимание сосредоточено на оценке исчерпания ресурса конструкции пути для назначения капитальных ремонтов пути [11]. Схожий подход можно использовать для планирования промежуточных ремонтов пути. Рассмотрим реализуемые в настоящее время промежуточные ремонты и их предназначение согласно «Техническим условиям» [10]:

• средний ремонт (восстановление дренирующих и прочностных свойств балластной призмы и обеспечение равноупругости подрельсового основания);

• подъемочный ремонт (восстановление надежности работы скреплений и предотвращение угона пути);

• планово-предупредительный ремонт (восстановление равноупругости подшпального основания выправкой пути и уменьшение степени неравномерности отступлений в положении рельсовых нитей по уровню и в плане, а также просадок пути);

• сплошная смена рельсов и элементов стрелочных переводов (замена выработавших ресурс элементов между капитальными ремонтами или реконструкциями).

Своевременный промежуточный ремонт предотвращает переход железнодорожного пути в предельное состояние. Для этого ремонты пути планируются по данным о выполненном техническом обслуживании и по результатам мониторинга состояния пути [6]. Необходимо доказать, что промежуточный ремонт сделать дешевле, чем продолжать интенсивное техническое обслуживание.

Назначение промежуточных ремонтов указывает на состав работ по техническому обслуживанию, по затратам на которые можно оценить близость предельного состояния. Для оценки можно использовать данные о прогнозируемых работах (тех, для которых установлена связь с наработкой до ресурса), о работах, не связанных напрямую с наработкой тоннажа и зависящих от локальных условий (конструкционных, эксплуатационных, климатических). В совокупности эти затраты формируют часть стоимости жизненного цикла железнодорожного пути, а значит, должны рассматриваться наравне с прочими параметрами состояния пути.

Для оценки потребности в промежуточных ремонтах пути можно применить методику расчета интегрального показателя, который оценивает потребность в капитальном ремонте пути по параметрам технического состояния и по расходам на техническое обслуживание [1, 11].

В основу расчета показателя потребности в капитальном ремонте пути (показатель КИСП) заложено сравнение фактических значений параметров технического состояния пути с критериями, полученными на основе расчетов стоимости жизненного цикла пути. Среди

мер управляющего воздействия по показателю КИСП можно рекомендовать капитальный ремонт пути, сохранение, увеличение, уменьшения затрат на техническое обслуживание пути (см. рисунок).

В зоне уменьшения затрат некоторые значения показателя КИСП могут превышать пороговые значения для пути на деревянных или железобетонных шпалах. Для этой зоны характерны:

• малое число накопленных неисправностей по прогнозируемым параметрам технического состояния пути (объемам одиночного изъятия материалов верхнего строения пути и предотказам рельсовой колеи);

• низкие значения потребных прогнозируемых затрат технического обслуживания пути;

• непропорционально высокие значения фактических затрат технического обслуживания пути.

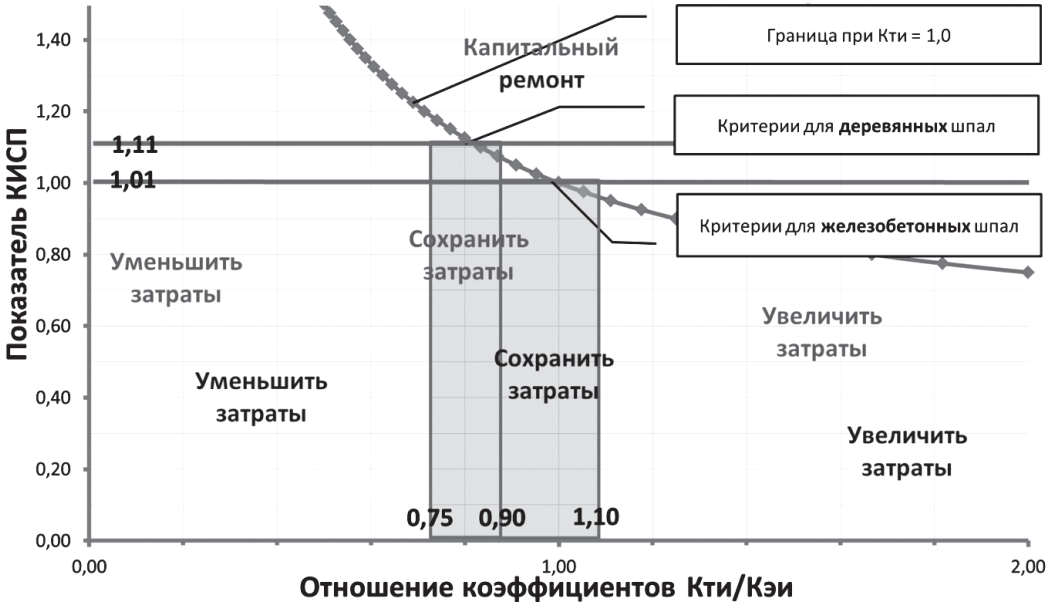
Фактически на данных участках хорошее состояние пути достигается значительными затратами на его техническое обслуживание. Однако это явный признак потребности в промежуточном ремонте.

В таблице приведены группы работ технического обслуживания, затраты на проведение которых следует анализировать для оценки потребности в промежуточных ремонтах пути [5].

Исследования и расчеты выполнены по среднесетевой статистической отчетности, собранной по участкам наиболее характерных эксплуатационных условий, т. е. в основе лежит вероятностный подход. Поэтому за классический сценарий работы пути принимается типовой среднесетевой вариант. На его основе определяются граничные состояния системы «железнодорожный путь с потребностью промежуточного ремонта пути».

Таким образом, для каждого типового среднесетевого варианта (с индивидуальными особенностями конструкции и эксплуатации, влияние которых может в значительной мере повлиять на работу железнодорожного пути [9]) могут быть сформированы индивидуальные критерии оценки потребности в промежуточном ремонте. Решение принимается на основе сравнения обобщенных интегральных показателей, рассчитанных на конкретном участке пути, с критериями типового среднесетевого варианта.

Для расчетов локальной статистической отчетности по отдельным участкам железнодорожного пути требуются актуальные данные,



Критерии оценки потребности в техническом обслуживании по показателям состояния пути

Работы по техническому обслуживанию, подлежащие анализу при планировании промежуточных ремонтов пути

Элемент	Работы технического обслуживания, анализируемые при оценке потребности в ремонте			
	Средний ремонт	Подъемочный ремонт	Планово-предупредительный ремонт	Сплошная смена рельсов
Рельсы	Обслуживание стыков (разгонка, правка, наплавка, подбивка и т. д.)	Разгонка стыковых зазоров	–	Вертикальный и боковой износ головки рельса
				Шлифовка рельсов
				Лубрикация рельсов
				Дефекты контактно-усталостного характера, дефектные рельсы в пути
Шпалы	Одиночная смена шпал	Одиночная смена шпал	–	–
Скрепления	Смена элементов скреплений (костылей, клемм, подкладок, изоляторов и т. д.)	Смена элементов скреплений	–	–
		Восстановление работоспособности скреплений (затяжка болтов, добивка костылей, поправка противоугонов и т. д.)		
Балласт	Ликвидация выплесков в пути	–	Ликвидация выплесков в пути	–
	Досыпка балласта в ящики, планировка откосов, подрезка балласта		Борьба с пучинами и последующая ликвидация отводов	
			Подбивка балласта	
Колея	Предотказы в профиле и по уровню	Предотказы по ширине колеи и в плане	Предотказы в плане, в профиле и по уровню	Предотказы по ширине колеи (по боковому износу рельсов)

что напрямую связано с качеством автоматизации диагностики.

Заключение

Планирование ремонтов пути упрощается с уменьшением используемых для этого критериев, но для многоэлементной системы, которой является железнодорожный путь, по умолчанию не может быть простого решения, если учитывать природно-климатическое и эксплуатационное воздействие.

Ключевым критерием при оптимизации содержания пути по стоимости жизненного

цикла является средняя стоимость жизненного цикла, приходящаяся на один год.

Для комплексной оценки железнодорожного пути с целью планирования промежуточных ремонтов по стоимости жизненного цикла следует анализировать:

• данные мониторинга состояния пути для оценки исчерпания технического ресурса железнодорожного пути;

• отчетность об объемах и видах выполненных работ по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

За эталонный сценарий изменения технического состояния пути по мере наработки до исчерпания ресурса рационально использовать типовые среднесетевые модели работы пути, рассчитанные для типовых условий эксплуатации.

Значения критериев потребности технического обслуживания и ремонтов пути должны отличаться на путях с разными условиями эксплуатации и конструкциями основных узлов.

Библиографический список

1. Бельтюков В. П. Использование стоимости жизненного цикла для оптимизации технического обслуживания верхнего строения железнодорожного пути / В. П. Бельтюков, А. А. Третьяков // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС. – 2015. – Вып. 3. – С. 42–47.

2. Бельтюков В. П. Разработка методик прогнозирования технического состояния пути, затрат на содержание пути и оптимизации содержания пути по экономическим критериям / В. П. Бельтюков // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-практ. конф. 2 июня 2011 г., Санкт-Петербург / под ред. проф. Л. С. Блажко. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 25–33.

3. Бельтюков В. П. Среднесрочное планирование работ по ремонту верхнего строения пути / В. П. Бельтюков // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 23–25.

4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М., 1990.

5. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути (с изм. на 21 янв. 2008 г.). № ЦП-774. – М. : Транспорт, 2000. – 224 с.

6. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги» (утв. расп. ОАО «РЖД» № 3212 р от 31.12.2015 г.). – М. : ОАО «РЖД», 2015.

7. Сеньковский А. А. Интенсивность накопления деформаций и совершенствование системы диагностики железнодорожного пути : дис. … канд. техн. наук : 05.22.06 / А. А. Сеньковский. – М., 2000. – 171 с.

8. Симонюк И. А. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ : дис. … канд. техн. наук : 05.22.06 / И. А. Симонюк. – СПб., 2014. – 148 с.

9. Сычева А. В. Моделирование работы железнодорожного пути с учетом динамических воздействий и различных свойств грунта и насыпи : дис. … канд. техн. наук : 01.02.04 / А. В. Сычева. – М., 2013. – 138 с.

10. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 75р от 18.01.2013 г.

11. Третьяков А. А. Использование комплексного индекса состояния пути при определении потребности в капитальных ремонтах / А. А. Третьяков // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3 (44). – С. 207–215.

12. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь : учеб. для вузов / Г. М. Шахунянц. – 3-е изд. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.

13. Шахунянц Г. М. Проектирование железнодорожного пути / Г. М. Шахунянц, В. Ф. Яковлев, Ю. Д. Волошко и др. ; под ред. Г. М. Шахунянца. – М. : Транспорт, 1977. – 317 с.

14. Шахунянц Г. М. Работа пути и расходы на его содержание / Г. М. Шахунянц // Сб. науч. тр. МИИТ. – 1976. – Вып. 491. – С. 3–67.

15. Шахунянц Г. М. Технико-экономические расчеты в путевом хозяйстве железных дорог /

Г. М. Шахунянц. – М. : Трансжелдориздат, 1939. – 244 с.

References

1. Beltyukov V. P. & Tretyakov A. A. Ispolzovaniye stoimosti zhiznennogo tsikla dlya optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya verkhnego stroyenoiya zheleznodorozhnogo puti [Application of Life Cycle Cost to Optimisation of Maintenance of Railroad Track Superstructure]. *Proyektirovaniye razvitiya regionalnoy seti zheleznykh dorog: sbornik nauchnykh trudov [Project Development of Regional Rail Network: Coll. Sci. Papers]*; ed. V. S. Shvartsfeld. Khabarovsk: Izdatelstvo DVGUPS, 2015, Is. 3. Pp. 42-47.

2. Beltyukov V. P. Razrabotka metodik prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti, zatrat na soderzhaniye puti i optimizatsii soderzhaniya puti po ekonomicheskim kriteriyam [Development of Methods for Forecasting Technical Track Condition, Track Operating Expenses and Optimisation of Track Maintenance by Economic Criteria]. *"Put XXI veka": sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [21st Century Track: Coll. Papers of International Sci. and Practical Conf.] July 2, 2011, St Petersburg*; ed. L. S. Blazhko. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2012. Pp. 25-33.

3. Beltyukov V. P. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2013, no. 2, pp. 23-25.

4. GOST 27.002–89 Nadezhnost v tekhnike [Reliability in Engineering]. Main Concepts. Terms and Definitions. Moscow, 1990.

5. Instruction on Running Maintenance of Railroad Track (As Amended on January 21, 2008) no. TsP-774. Moscow, Transport, 2000. 224 p.

6. Statutes on Track Facilities Maintenance System of Russian Railways JSC (Approved by the Order of Russian Railways JSC No. 3212r on December 31, 2015). Moscow, Russian Railways JSC, 2015.

7. Senkovskiy A. A. Intensivnost nakopleniya deformatsiy i sovershenstvovaniye sistemy diagnostiki zheleznodorozhnogo puti [Intensity of Strain Accumulation and Improving Track Diagnostics System]. Moscow, 2000. 171 p.

8. Simonyuk I. A. Prognozirovaniye intensivnosti nakopleniya ostatochnykh deformatsiy verkhnego stroyeniya zheleznodorozhnogo puti dlya srednesrochnogo planirovaniya putevykh rabot [Forecasting Intensity of Development of Residual Deformation of Railroad Track Superstructure for Mid-Term Planning of Track Work]. St. Petersburg, 2014. 148 p.

9. Sycheva A. V. Modelirovaniye raboty zheleznodorozhnogo puti s uchetom dinamicheskikh vozdeystviy i razlichnykh svoystv grunta i nasypi [Simulation of Railroad Track Operation Accounting for Dynamic Impacts and Different Soil and Banked Ground Properties]. Moscow, 2013. 138 p.

10. Technical Conditions for Works on Reconstruction (Modernisation) and Repair of Railroad Track: Russian Railways JSC order No. 75r on January 18, 2013.

11. Tretyakov A. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ*., 2015, Is. 3 (44), pp. 207-215.

12. Shakhunyants G.M. Zheleznodorozhnyy put: uchebnik dlya vuzov [Railroad Track: Univ. Coursebook]. 3rd ed. Moscow, Transport, 1987. 479 p.

13. Shakhunyants G. M., Yakovlev V. F., Voloshko Yu. D. et al. Proyektirovaniye zheleznodorozhnogo puti [Designing Railroad Track]; ed. G. M. Shakhunyants. Moscow, Transport, 1977. 317 p.

14. Shakhunyants G. M. *Sbornik nauchnykh trudov MIIT – MIIT Coll. Papers*, 1976, Is. 491, pp. 3-67.

15. Shakhunyants G. M. Tekhniko-ekonomicheskiye raschety v putevom khozyaystve zheleznykh dorog [Technical and Economic Calculations in Railroads' Track Facilities]. Moscow, Transzheldorizdat, 1939. 244 p.

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, bw@peterlink.ru *ТРЕТЬЯКОВ Александр Александрович – аспирант, eskalran@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.141, 625.123

Л. С. Блажко, С. Н. Чуян, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВНОЙ ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Дата поступления: 04.07.2016
Решение о публикации: 04.10.2016

Цель: Обобщить опыт применения и устройства защитных подбалластных слоев для снижения интенсивности накопления остаточных деформаций земляного полотна в уровне основной площадки. Обозначить задачи, требующие скорейшего решения для повышения качества производства работ по устройству подбалластного защитного слоя. **Методы:** Использован метод теоретического анализа в части использования различных материалов и технологий, направленных на изменение свойств грунтов основной площадки земляного полотна железнодорожного пути. **Результаты:** Определена область эффективного применения защитных подбалластных слоев с учетом эксплуатационных особенностей участка железнодорожного пути. Сформулированы задачи, требующие обоснованного решения в организации производства капитальных путевых работ с использованием современной высокопроизводительной техники и контроля их качества**. Практическая значимость:** На основании многочисленных экспериментов, проведенные в разные годы учеными ПГУПС на участках пути, находящихся в различных эксплуатационных условиях, определена связь между уровнями напряжений в элементах железнодорожного пути и используемыми защитными подбалластными слоями.

Напряжение, деформация, геоматериалы, подбалластный защитный слой, земляное полотно, путеремонтный комплекс АНМ-800R.

Lyudmila S. Blazhko, D. Sci. (Eng.), professor; **Sergey N. Chuyan**, Cand. Sci. (Eng.), **Vladislav B. Zakharov**, Cand. Sci. (Eng.), ***Yevgeniy V. Chernyayev**, Cand. Sci. (Eng.), kaf_jdp@mail.ru (Petersburg State Transport University) ANALYSIS OF METHODS FOR INCREASING SOIL BEARING CAPACITY OF SUPPORTING SUBGRADE

Objective: To summarise the experience of application and setting up safety sub-ballast layers for reduction of intensity of development of residual deformation of earthwork in the roadbed level. To set out tasks that require urgent solution to improve the quality of works conducted for setting up sub-ballast safety layer. **Methods:** Method of theoretical analysis as regards the use of various materials and technologies aimed at changing the qualities of soils of supporting subgrade of railroad track. **Results:** The field of efficient application of safety sub-ballast layers was determined with the account for operational peculiarities of a rail track section. Tasks which require justified solution in organisation of capital trackworks with the use of modern high-powered equipment and quality control thereof. **Practical importance:** On the basis of numerous experiments conducted by Petersburg State Transport University (PGUPS) researchers over a number of years on track sections experiencing different operational conditions, connection was established between stress levels in rail track elements and sub-ballast safety layers being used.

Strain, deformation, geomaterials, sub-ballast safety layer, earth work, track-repair system AHM-800R.

В стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года заявлено: «Эффективное функционирование железнодорожного транспорта Российской Федерации играет исключительную роль в создании условий для модер-

низации, перехода на инновационный путь развития и устойчивого роста национальной экономики, способствует созданию условий для обеспечения лидерства России в мировой экономической системе» [12].

При модернизации железнодорожного транспорта предусматриваются обеспечение необходимой пропускной способности на основных направлениях перевозок, перевозок инновационным подвижным составом с исключением из эксплуатации подвижного состава с истекшим сроком службы, коренная модернизация объектов инфраструктуры, разработка и внедрение новых требований к технике и технологиям, строительство новых железнодорожных линий для динамичного расширения железнодорожной сети.

Безотказную работу конструкции железнодорожного пути при максимально возможном сроке эксплуатации в межремонтный период обеспечивает комплексное развитие железнодорожного транспорта. Состояние верхнего строения пути (ВСП) определяет качество услуги, которую перевозчик ОАО «РЖД» предоставляет заказчику. Поскольку на ряде длительно эксплуатируемых направлений необходимо реализовать программы развития грузовых перевозок с повышенными осевыми нагрузками, весом и длиной поезда, появляется задача не допустить превышения значения напряжений в элементах конструкции железнодорожного пути при взаимодействии с подвижны́м составом.

Влияние геосинтетических материалов на уровень напряжений в элементах конструкции железнодорожного пути

Для обеспечения требуемых показателей несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна при повышенных осевых нагрузках или при возрастающем вибродинамическом воздействии от движения высокоскоростных поездов используется одно из наиболее действенных решений – подбалластный защитный слой, в том числе армированный геоматериалами [2, 4–6]. Сегодня на сети железных дорог России применяются различные геосинтетические материалы, классифицируемые по цели применения (армирование, разделение, фильтрация и др.), по месту расположения в конструкции железнодорожного пути (основная площадка земляного полотна, рабочая зона, откосы и др.), по конструктивному элементу (плиты, геотекстиль, георешетки и др.) и по химическому составу материала. Специалисты кафедры «Железнодорожный путь» ПГУПС выполнили натурные эксперименты на путях общего пользования при типовых условиях эксплуатации линии Санкт-Петербург – Москва II главный путь перегон Тосно – Ушаки Октябрьской железной дороги, чтобы определить эффективность использования ряда геосинтетических материалов (георешетки Fortrak, Tenax, геоячейки «Геокаркас», геокомпозита Enkagrid TRC) для снижения интенсивности накопления остаточных деформаций в рабочей зоне земляного полотна в уровне основной площадки [1, 9]. Результаты показали, что использование в конструкции пути геоматериалов уменьшает уровень как вертикальных, так и горизонтальных напряжений в подрельсовом сечении по сравнению с опытным участком аналогичной конструкции, на котором геоматериалы не использовались. Например, если применять многослойные конструкции (2 слоя георешетки Fortrak), то вертикальные напряжения снижаются в 1,2 раза. При этом вертикальные напряжения перераспределяются по поперечному сечению: наибольшие напряжения зафиксированы в сечении у торца шпалы и по оси пути.

Горизонтальные напряжения в подрельсовом сечении уменьшаются по сравнению с контрольным участком в 1,2 раза при укладке георешеток Tenax в 1 слой и более чем в 2 раза – при укладке геокомпозита Enkagrid TRC и при использовании геоячеек «Геокаркас», а перераспределяются горизонтальные напряжения за счет их уменьшения по оси рельса и торцу шпалы и роста по оси пути.

Анализ напряженного состояния грунтов земляного полотна в уровне основной площадки с георешетками Fortrak, Tenax, уложенных в подбалластную зону в один слой, и с георешеткой Fortrak, уложенной в два слоя, показал, что один слой георешеток Tenax лучше выполняет функцию армирования, нежели георешетка Fortrak. Укладка последней в два слоя нецелесообразна из-за необходимости существенно изменять технологию производства работ и из-за общего удорожания за счет увеличения объема работ и материалов.

Учитывая, что георешетка Tenax более жесткая и лучше армирует грунт, чем георешетка Fortrak, можно утверждать, что для равномерного распределения подвижной нагрузки по основной площадке земляного полотна необходимо применять геоматериалы с показателями более высокой жесткости.

Если грунты основной площадки земляного полотна армированы геоматериалами, то снижается влияние как скорости поездов, т. е. вибродинамического воздействия, так и осевых нагрузок, определяющих уровень вертикальных и горизонтальных напряжений, как следствие, уменьшается интенсивность накопления остаточных деформаций в земляном полотне вообще и в уровне основной площадки в частности. Стоит отметить, что наибольший эффект достигается при соблюдении технологии укладки и правильном подборе свойств геоматериала для конкретных эксплуатационных, природно-климатических и инженерно-геологических условий [3, 13].

Работа машины AHM-800R как решение проблемы механизации работ по устройству защитного подбалластного слоя

Учитывая природно-климатические особенности района работы железнодорожного пути, а также физико-механические характеристики грунтов земляного полотна, на котором размещается ВСП, применение описанных выше методов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна ограничено. Интенсивность образования остаточных деформаций грунтов основной площадки земляного полотна, сложенного слабыми и (или) чрезмерно увлажненными грунтами земляного полотна вне зависимости от наличия или типа защитного слоя будет иметь положительную динамику развития по сравнению с земляным полотном, сложенным дренирующими грунтами. Рост деформации в уровне основной площадки земляного полотна (образование балластных углублений), в свою очередь, способствует увеличению влажности грунта земляного полотна и как следствие – снижению его несущей способности.

Предлагались разные технические решения для снижения развития деформаций в уровне рабочей зоны основной площадки земляного полотна [7, 8], в том числе цементация, битумизация, силикатизация и др. В 2008 г. на линии Санкт-Петербург – Москва перегон Торбино – Боровенка была опробована технология устройства защитного подбалластного слоя, который состоял из разделительного слоя (геотекстиля+георешетки), уложенного на грунты земляного полотна и щебеночно-песчано-гравийной смеси (ЩПГС), которую послойно уплотняли общестроительной техникой, создавая основу для устройства ВСП. Необходимость создания столь мощной конструкции было продиктовано неукоснительным обеспечением безопасности движения на экспериментальном участке пути, где проходили опытные заезды поезда «Сапсан» со скоростью до 275 км/ч. Положительная практика эксплуатации созданной конструкции определила её распространение на участках обращения как высокоскоростных поездов, так и (с дополнительным усилением объемной георешеткой) грузовых поездов повышенной массы и длины. Главной проблемой при создании таких подбалластных защитных слоев в недавнем прошлом была сложная технология их устройства. Тогда ОАО «РЖД» решило приобрести инновационную путевую машину AHM-800R производства австрий-

ской компании Plasser&Theurer для механизации устройства защитных подбалластных слоев [10, 11, 14, 15].

Производство данной путевой техники начато в 1994 г. в Австрии. В настоящее время выпущено не более 30 машин, больше всего их эксплуатируется в Китае – 8 штук. Сертификационные испытания машины AHM-800R в РФ выполнены в апреле 2013 г. на перегоне Веймарн – Вервенка Октябрьской железной дороги.

Производительность машины составляет до 70 м в час в зависимости от глубины и ширины вырезки имеющегося балластного слоя, а также от рода грунта срезаемого земляного полотна. Обслуживают машину высокопрофессиональные специалисты, которые проходят специальную подготовку в компании Plasser&Theurer. Состав одной смены 8 машинистов. В России машина работает в круглосуточные «окна» в две смены. Плановая годовая выработка машины составляет 50–70 км модернизации главных путей. Технические характеристики машины представлены в таблице.

Путевая машина AHM-800R является многофункциональным путеремонтным комплексом на железнодорожном ходу. В составе комплекса по ходу движения включены:

• установка для переработки (рециклинга) щебня, который после дробления используется как один из компонентов подбалластного защитного слоя, устраиваемого непрерывно комплексом AHM-800R в зоне основной площадки земляного полотна;

• экскаваторная секция, предназначенная для полной вырезки материала балластного слоя и срезки грунта основной площадки земляного полотна;

• приводной модуль;

• вагон-цистерна для снабжения машины водой при необходимости увлажнения ЩПГС.

Устройство подбалластного защитного слоя с частичным использованием материала балласта ремонтируемого участка выполняется в такой последовательности:

• вырезка первым баровым устройством машины загрязненного щебеночного балласта и его переработка (дробление) для дальней-

Технические характеристики машины AHM-800R

Показатель	Величина
Производительность машины (вырезка балластного материала, укладка и уплотнение щебеночно-песчано-гравийной смеси (ЩПГС), м/ч	30–70
Ширина вырезки, мм: – первым баровым устройством – вторым баровым устройством	 4000 4050–6600
Максимальная глубина вырезки ниже УГР, мм – первым баровым устройством – вторым баровым устройством	 1000 1200
Максимальная высота укладки ЩПГС за один проход в уплотненном состоянии, мм	500
Ширина отсыпаемого защитного подбалластного слоя, мм	5000
Радиус проходимых криволинейных участков пути, м	250
Максимальная скорость движения, км/ч – самоходом (без прицепной нагрузки) – транспортная, в составе поезда	 20 80

шего использования при укладке защитного подбалластного слоя;

• вырезка вторым баровым устройством машины накопленных балластных материалов и верхнего слоя земляного полотна с погрузкой в составы для засорителей;

• планировка поверхности среза земляного полотна;

• укладка на поверхность среза разделительного, и (или) армирующего, и (или) теплоизоляционного материала (геотекстиля, георешетки, геоячейки, пенополистирола и др.), определенного проектом с учетом инженерно-геологических, природно-климатических и эксплуатационных условий;

• укладка защитного подбалластного слоя из ЩПГС, его увлажнение, планировка и уплотнение специальными виброплитами машины АНМ-800R.

К неоспоримым преимуществам использования машины перед существующими технологиями модернизации железнодорожного пути с применением общестроительной техники следует отнести:

• возможность непрерывно формировать подбалластный защитный слой толщиной до 50 см без демонтажа рельсошпальной решетки, что существенно повышает производительность работ без привлечения дополнительной техники. Кроме того, для формирования защитного слоя частично применяется материал балластной призмы, предварительно измельченный и смешанный с гравийно-песчаной смесью. Все операции производятся в темпе работы машины;

• возможность в темпе работы машины увлажнять материал защитного слоя для его эффективного уплотнения виброплитами машины. Данную операцию обеспечивает применение вагона-цистерны, включенной в состав машины, емкость цистерны позволяет непрерывно увлажнять значительные участки защитного слоя. Подача и расход воды могут контролироваться как автоматически, так и оператором машины и корректироваться в зависимости от темпа работы и влажности ЩПГС;

• возможность единовременного устройства разделительного и (или) армирующего слоя геосинтетическими материалами, поставляемыми в рулонах. Конструкция машины позволяет в сечении устройства защитного подбалластного слоя разместить рулонный защитный материал (геотекстиль, геокомпозит), который укладывается в темпе машины, раскатываясь на грунтах основной площадки земляного полотна. Это предупреждает смешение материалов ЩПГС и грунта земляного полотна, а кроме того, геокомпозит, обладающий армирующей функцией, дополнительно уменьшает интенсивность образования деформаций в подрельсой зоне на уровне грунтов основной площадки земляного полотна;

• сокращение времени закрытия пути, что позволяет более эффективно использовать временно́й ресурс для производства основных работ по устройству защитного подбалластного слоя;

• отсутствие необходимости закрытия соседнего пути; машина в рабочем положении находится в габарите, что обеспечивает – хотя и в меньшем объеме – пропускную способность железнодорожной линии;

• отсутствие потребности в использовании соседнего пути для обеспечения подвоза материала ЩПГС, воды. Это очевидное преимущество позволяет обеспечивать минимально необходимую провозную способность на участке капитальных путевых работ;

• минимизацию нагрузки на основную площадку земляного полотна во время проведения работ. Рельсошпальная решетка укладывается на сформированный защитный подбалластный слой, уплотненный до такой степени, при которой в зоне контакта со шпалой не возникает углублений и просадок (рис. 1).

В 2014 г. впервые в России на участках высокоскоростного движения Октябрьской железной дороги (перегон Малая Вишера – Бурга (21 км) и Вышний Волочек – Академическая (15,6 км)) при реконструкции пути применялась путевая машина АНМ-800R.

На 2015 г. были запланированы работы в объеме 28,4 км на двух участках высокоско-

Рис. 1. Расположение рельсошпальной решетки на сформированном защитном слое

Рис. 2. Применение мешков со щебнем для устройства отвода в месте зарядки машины

ростного движения (перегоны Спирово – Калашниково и Вышний Волочек – Елизаровка). В результате 100%-го выполнения плановых работ на данных перегонах установлена скорость 230 и 250 км/ч, соответственно.

В плане путевых работ 2016 г., который начался 11 апреля, машина АНМ-800R должна была выполнить модернизацию перегонов Малая Вишера – Бурга II гл. путь (18 км) и Чудово – Гряды I гл. путь (23 км) [10].

В процессе эксплуатации машины АНМ-800R на Октябрьской железной дороге выявлены задачи в части совершенствования организации работ и контроля их качества:

• составление карты характеристик земляного полотна на участке работ машины для качественной проработки проектных решений;

• адресная разработка технологического процесса всего комплекса работ с применением машины АНМ-800R, включая вспомогательные операции в зависимости от инженерно-геологических, природно-климатических и эксплуатационных условий;

• разработка детальной технологии работы на отводах в местах зарядки и разрядки машины (рис. 2);

• разработка технических решений по работе машины в местах, ограниченных габаритом (возле опор контактной сети);

• контроль качества ЩПГС и полученного из нее защитного слоя (в ходе и по окончании работ);

• разработка метода непрерывного контроля качества подбалластного защитного слоя на стадии укладки;

• разработка и утверждение норм времени и расхода материалов на весь технологический процесс;

• разработка технологии дозаправки машины водой для увлажнения защитного слоя, поскольку ёмкость цистерны, включенной в комплекс машины, недостаточна;

• разработка конструкции крепления или системы направления работы машины (используемый сегодня направляющий трос зачастую вызывает сбои в работе машины) (рис. 3).

Отдельное внимание необходимо уделить контролю качества балласта, получаемого в результате дробления материала, и его последующего смешивания с песчано-гравийной смесью, определить жесткие требования к

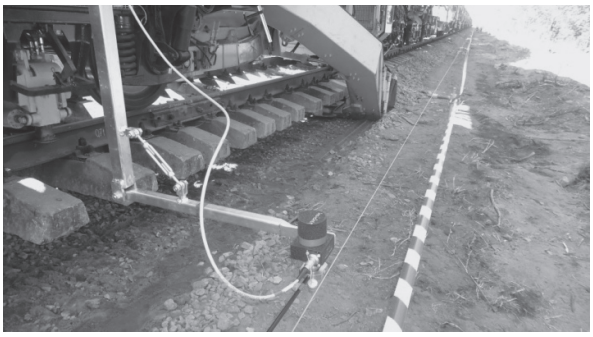


Рис. 3. Крепление направляющего троса машины

однородности материала по всей ширине и по длине укладки.

Сформированный машиной AHM-800R подбалластный слой должен удовлетворять требованиям, заявленным и утвержденным Инструкцией по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути.

Заключение

Хотелось бы отметить, что любой метод и технология, положительно зарекомендовавшие себя в конкретных условиях эксплуатации, а также полученные в результате моделирования, могут быть рекомендованы к опытному применению, однако подлежат пристальному анализу и при необходимости – коррекции. Сегодня путевые работы, выполненные по технологиям усиления несущей способности грунтов земляного полотна, не имеют своего технико-экономического обоснования о влиянии на систему технического обслуживания пути в дальнейшем. На наш взгляд, надо продумать все возможные варианты технологий текущего содержания, ремонта и реконструкции подбалластного защитного слоя по истечении срока его безотказной службы с максимально возможным уровнем механизации при оптимальных трудовых материальных затратах и минимальных потерях, связанных с производством работ.

Еще один вопрос, требующий тщательной проработки – это оценка изменения взаимодействия ВСП с подбалластным слоем, с подвижным составом, его влияния на возможное развитие неблагоприятных изменений в элементах ВСП и подвижного состава, связанных с изменением во времени жесткости подбалластного слоя под воздействием вибродинамической нагрузки от подвижного состава и природно-климатических факторов.

Библиографический список

1. Блажко Л. С. Влияние геоматериалов в конструкции балластного (защитного) слоя на работу рельсов и основной площадки земляного полотна / Л. С. Блажко // Материалы регионал. науч.-техн. конф. «Железнодорожный транспорт. Итоги и перспективы развития». – Новосибирск : СГУПС, 2002.

2. Блажко Л. С. Геоматериалы при высоких осевых нагрузках / Л. С. Блажко // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – № 10. – С. 36–37.

3. Блажко Л. С. Дополнительные требования к геотекстильным материалам, применяемым в качестве разделительного слоя в железнодорожном полотне / Л. С. Блажко, В. И. Штыков, Е. В. Черняев, А. Б. Пономарев // Междунар. науч.-практич. конф. «Транспорт-2014», Ростов-н/Дону, 22–25 апр. 2014 г. : сб. трудов. Ч. 2. – Ростов-н/Дону, 2014. – С. 156–158.

4. Блажко Л. С. К вопросу об эффективности применения геоматериалов в конструкции защитного слоя / Л. С. Блажко, А. В. Петряев, Е. С. Свинцов // Актуальные проблемы Транссиба на рубеже веков : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Екатеринбург : Урал. гос. ун-т путей сообщения, 2000. – С. 338–342.

5. Блажко Л. С. Напряженно-деформированное состояние рельсов в зоне укладки геоячеек / Л. С. Блажко // Применение геоматериалов при строительстве и реконструкции транспортных объектов : материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2002. – С. 63–65.

6. Блажко Л. С. Напряженное состояние основной площадки земляного полотна, усиленной геосинтетическими материалами / Л. С. Блажко, И. В. Прокудин, А. Ф. Колос // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : материалы регионал. науч.-техн. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2003. – С. 133–141.

7. Блажко Л. С., Штыков В. И., Черняев Е. В. Железнодорожный путь. Пат. на полезную модель № 97737. Опубл. 20.09.2010. – Бюл. 26.

8. Блажко Л. С., Штыков В. И., Черняев Е. В. Железнодорожный путь. Пат. на полезную модель № 118640. Опубл. 27.07.2012. – Бюл. 21.

9. Блажко Л. С. Эксперименты с геоматериалами / Л. С. Блажко // Путь и путевое хозяйство. – 2003. – № 2. – С. 12–13.

10. Дорощенко Н. Ставка на скорость / Н. Дорощенко // Октябрьская магистраль. – 2016. – 07.04. – С. 7. – URL : www/gudok.ru/rzd/169/?ID=1333093.

11. Позолотчикова Я. Техника – на перспективу. Путевая машина АНМ-800R будет работать на участках ВСМ // Гудок. – 2015. – Вып. 163. – 14 сент.

12. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р).

13. Черняев Е. В. Срок службы геотекстильных материалов / Е. В. Черняев // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 37–39.

14. Piereder F. Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800-R / F. Piereder, R. Schilder. – URL : https://www.plassertheurer.com/pdf/publications/etr_0009.pdf.

15. Strengthening the formation. Recycling of used ballast as a sand/gravel mixture. – URL : www.plassertheurer.com/en/machines-systems/formation-rehabilitation-ahm-800-r.html.

References

1. Blazhko L. S. Vliyaniye geomaterialov v konstruktsii ballastnogo (zashchitnogo) sloya na rabotu relsov i osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna [Influence of Geomaterials in the Construction of Ballast (Safety) Layer on the Operation of Rails and Supporting Subgrade]. *Materialy regionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Zheleznodorozhnyy transport. Itogi i perspektivy razvitiya" [Papers of the Regional Sci. and Technical Conference "Rail Transport. Results and Perspectives for development"]*. Novosibirsk, SGUPS, 2002.

2. Blazhko L. S. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2002, no. 10, pp. 36-37.

3. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Chernyayev Ye. V. & Ponomarev A. B. Dopolnitelnyye trebovaniya k geotekstilnym materialam, primenyayemym v kachestve razdelitelnogo sloya v zheleznodorozhnom polotne [Additional Requirements for Geotextiles Applied as Separation Layer in Railway Groundwork]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Transport-2014" [Int. Sci. and Practical Conf. Transport-2014]*, Rostov-on-Don, Apr. 22–25 2014: Coll. Papers. Pt. 2. Rostov-on-Don, 2014. Pp. 156-158.

4. Blazhko L. S., Petryayev A. V. & Svintsov Ye. S. K voprosu ob effektivnosti primeneniya geomaterialov v konstruktsii zashchitnogo sloya [On Efficiency of Application of Geomaterials in Construction of Safety Layer]. *Aktualnyye problemy Transsiba na rubezhe vekov: sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Current Problems of the Transsiberian Railway at the Turn of the Century: Coll. Sci. Papers of the All-Russian Sci. and Technical Conf.]*. Pt. 1. Yekaterinburg, Uralskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2000. Pp. 338-342.

5. Blazhko L. S. Napryazhenno-defrmirovannoye sostoyaniye relsov v zone ukladki geoyacheyek [Strain-Stress State of Rails in the Zone of Geocell Placement]. *Primeneniye geomaterialov pri stroitelstve i rekonstruktsii transportnykh obyektov: materialy 2-oy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Application of Geomaterials in Construction and Reconstruction of Transport Objects: Papers of the 2nd Int. Sci. and Technical Conf.]*. St. Petersburg, PGUPS, 2002. Pp. 63-65.

6. Blazhko L. S., Prokudin I. V. & Kolos A. F. Napryazhennoye sostoyaniye osnovnoy ploshchadki zemlyanogo polotna, usilennoy geosinteticheskimi materialami [Strain State of Supporting Subgrade Strengthened by Geosynthetic Materials]. *Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: materialy regionalnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Problems and Development Perspectives of Rail Transport: Papers of the Regional Sci. and Technical Conference]*. Yekaterinburg, UrGUPS, 2003. Pp. 133-141.

7. Blazhko L. S., Shtykov V. I. & Chernyayev Ye. V. Zhelznodorozhnyy put [Rail Track]. Utility Patent № 97737. Published Sep. 20, 2010. Bull. 26.

8. Blazhko L. S., Shtykov V. I. & Chernyayev Ye. V. Zhelznodorozhnyy put [Rail Track]. Utility Patent № 118640. Published Jul. 27, 2012. Bull. 21.

9. Blazhko L. S. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2003, no. 2, pp. 12-13.

10. Doroshchenko N. *Oktyabrskaya Magistral – October Mainline*, Apr. 7, 2016, p. 7, available at: www/gudok.ru/rzd/169/?ID=1333093.

11. Pozolotchikova Ya. *Gudok – Siren*, Sep. 14, 2015, Is. 163.

12. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda [Strategy for Development of Rail Transport in the Russian Federation through to 2030], enacted by Russian Federation government order N 877-r on Jun. 17, 2008.

13. Chernyayev Ye. V. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2010, no. 7, pp. 37-39.

14. Piereder F. & Schilder R. Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800-R, available at: https://www.plassertheurer.com/pdf/publications/etr_0009.pdf.

15. Strengthening the formation. Recycling of used ballast as a sand/gravel mixture, available at: www.plassertheurer.com/en/machines-systems/formation-rehabilitation-ahm-800-r.html.

БЛАЖКО Людмила Сергеевна – доктор техн. наук, профессор; ЧУЯН Сергей Николаевич – канд. техн. наук; ЗАХАРОВ Владислав Борисович – канд. техн. наук; *ЧЕРНЯЕВ Евгений Владимирович – канд. техн. наук, kaf_jdp@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.421

И. А. Иванов, Д. П. Кононов, С. В. Урушев, А. В. Якушев

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦЕЛЬНОКАТАНЫХ КОЛЕСАХ ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Дата поступления: 24.02.2016
Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Проверить соответствие остаточных напряжений, действующих в цельнокатаных колёсах, требованиям нормативных документов после упрочняющей локальной термообработки. **Методы:** При испытаниях в соответствии с требованиями ГОСТ 32207-2013 производили локальную термообработку дисков цельнокатаных колёс с последующей радиальной огневой разрезкой от гребня до ступицы с измерением схождения кромок, разрезали колеса на секторы параллельно оси колеса с измерением внутренних напряжений с помощью двухкомпонентных тензорезисторов с базой 5 мм, наклеенных в месте перехода диска в обод, обрабатывали данные с построением эпюр внутренних напряжений. **Результаты:** Выявлено, что на поверхности катания по кругу катания остаточные окружные напряжения – сжимающие, величина напряжений не превышает допустимых значений; глубина точки перехода сжимающих остаточных окружных напряжений в растягивающие соответствует требованиям нормативной документации. Подтверждены требования нормативных документов по обеспечению безопасного уровня остаточных напряжений для цельнокатаных колёс, подвергнутых локальной термообработке. **Практическая значимость:** Данный метод можно использовать для повышения безопасности движения, надёжности цельнокатаных колёс с учётом перспективы повышения нагрузки на ось.

Колесо, локальная термообработка, остаточные напряжения, безопасность, усталостная прочность.

Igor A. Ivanov, D. Sci. (Eng.), professor, ivanov_1_7@mail.ru; ***Dmitriy P. Kononov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, d_kononov@mail.ru; **Sergey V. Urushev**, D. Sci. (Eng.), professor, tehmet_pgups@mail.ru; **Aleksey V. Yakushev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, av-yakushev@ya.ru (Petersburg State Transport University) RESIDUAL STRESSES IN SOLID-ROLLED RAILWAY WHEELS AFTER STRENGTHENING TREATMENT

Objective: To check the correspondence of residual stresses in solid-rolled railway wheels to the requirements of regulatory documents after strengthening localised thermal treatment. **Methods:** During checks for correspondence to requirements of state standard GOST 32207-2013 localised thermal treatment of solid-rolled wheel plates was conducted, followed by radial fire cutting from flange to hub with edge toe-in measured. Wheels were cut into sectors parallel to wheel axis with internal stresses measured by two-component resistance strain gauges with 5 mm base glued at the spot where wheel plate turns into rim. Data were processed with building of distribution curves of internal stresses. **Results:** It was established that on tread contact surface residual tangential stresses are compressive in nature. The value of stresses does not exceed permitted values. Depth of transition point of compressive residual tangential stresses into tension stresses conforms to requirements of regulatory documents. Requirements of regulatory documents regarding ensuring safe level of residual stresses for solid-rolled railway wheels subjected to localised thermal treatment. **Practical importance:** This method can be used for increasing traffic safety and reliability of whole-rolled wheels in instances of increasing axial loads.

Wheel, localised thermal treatment, residual stresses, safety, fatigue resistance.

Введение

В последние годы существенно изменился суммарный пробег колёсных пар [6, 10, 13]. С одной стороны, годовой пробег у нового скоростного подвижного состава увеличился со 150 000–200 000 км до 500 000 км, а назначенный срок службы – до 30 лет, с другой стороны, в России и в странах бывшего СССР по объективным экономическим причинам обострилась проблема замены имеющегося парка на подвижной состав нового поколения, а также возникла необходимость продлить срок службы существующего парка [1, 3–5]. При этом очень большое количество циклов нагружения колёсных пар (до 10^9–10^{10}) переводит проблему оценки прочности в новый класс задач, а именно из области многоцикловой усталости в гигацикловую область [9, 10], имеющую другие закономерности.

В области гигацикловой усталости не подтверждается гипотеза о бесконечной долговечности при напряжениях ниже традиционного предела выносливости, определённого на базе 10^7–10^8 циклов, отличается и расположение очагов зарождения трещин [8, 12]. Это подтверждает сообщения о случаях разрушения деталей в различных областях промышленности и железнодорожного транспорта при сравнительно низких, но длительно действующих нагрузках [2, 10]. Исследования показывают, что у образцов, разрушившихся до 10^7 циклов нагружения, очаги зарождения трещин находятся в поверхностном слое у какого-либо дефекта или изменения геометрических характеристик поверхности, а у образцов, разрушившихся после 10^7 циклов, – под поверхностным слоем [10, 11], преимущественно у сульфидных неметаллических включений или дефектов микроструктуры. То есть для повышения безопасности движения, надёжности цельнокатаных колёс необходимы новые требования к технологиям их изготовления, обработки и упрочнения. При этом следует иметь в виду рассматриваемые перспективы повышения нагрузки на ось.

Для повышения усталостной прочности колёс можно воспользоваться методом локальной термообработки диска, создавая на его поверхности локальные упрочнённые зоны [7].

Уровень остаточных напряжений в деталях и конструкциях является одним из основных показателей качества их изготовления. Величина технологических остаточных напряжений в цельнокатаных вагонных колёсах оказывает большое влияние на их циклическую прочность, скорость распространения трещин и надёжность колёс в эксплуатации.

Проведённые во ВНИИЖТе исследования показали, что уровень остаточных напряжений – как технологических, так и возникающих при перегрузках – значительно влияет на циклическую долговечность колёс [14]. По нормам ГОСТ 10791-2011, величина остаточных напряжений оценивается после радиальной разрезки колеса по сближению его кромок, замеренному на средней окружности обода с базой замера 100 мм. Величина сближения кромок колеса нормирована и должна составлять от 1 до 5 мм.

Методика проведения эксперимента

Цельнокатаные колёса после локальной термообработки диска проверены на соответствие требованиям ГОСТ 10791-2011, п. 6.14, и РД 32.144-2000, т. е. определены остаточные напряжения. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 32207-2013 и [15]. Для этого диск, обод и зону перехода колеса предварительно подвергали поверхностной закалке с помощью газовой горелки по шести радиальным сечениям (рис. 1). Угол между сечениями составил 60°. Температуру нагрева диска колеса по радиальным сечениям постепенно доводили до 900–920 °C. Температуру контролировали дистанционно пирометром. После нагрева изделия охлаждали на воздухе при температуре +10 °C в течение суток.

Далее размечали для кернения базовые точки, по которым определяли знак остаточных напряжений в ободе колеса (рис. 2).

Рис. 1. Фрагмент колеса с участками закалки на внутренней стороне

Измеряли фактическое базовое расстояние до первой радиальной разрезки колеса. По изменению расстояния между базовыми точками после радиального разреза между ними впоследствии устанавливали знак окружных остаточных напряжений.

Двухкомпонентные тензорезисторы с базой 5 мм и сопротивлением 200 Ом наклеивали согласно ГОСТ 32207-2013 (рис. 3). Дополнительно тензорезисторы наклеивали в месте перехода диска в обод. Двухкомпонентные тензорезисторы располагали таким образом, чтобы один совпадал с радиусом колеса, другой – с окружным направлением (по касательной к окружности).

После радиальной разрезки колеса от гребня до ступицы огневым способом расстояние между базовыми точками (сходимость)

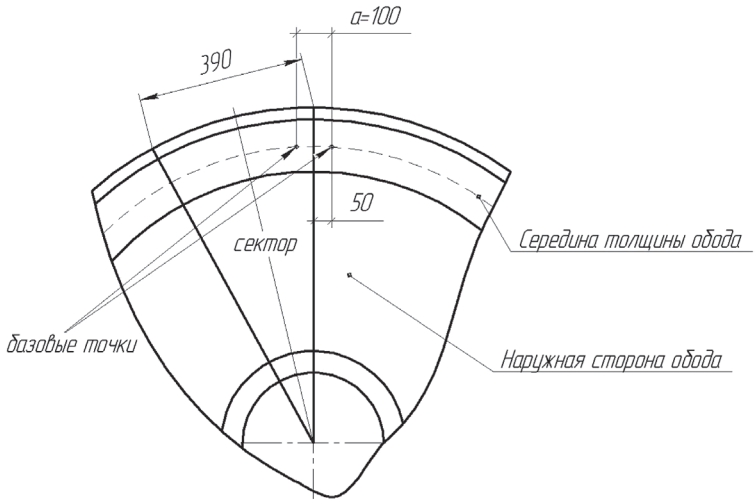
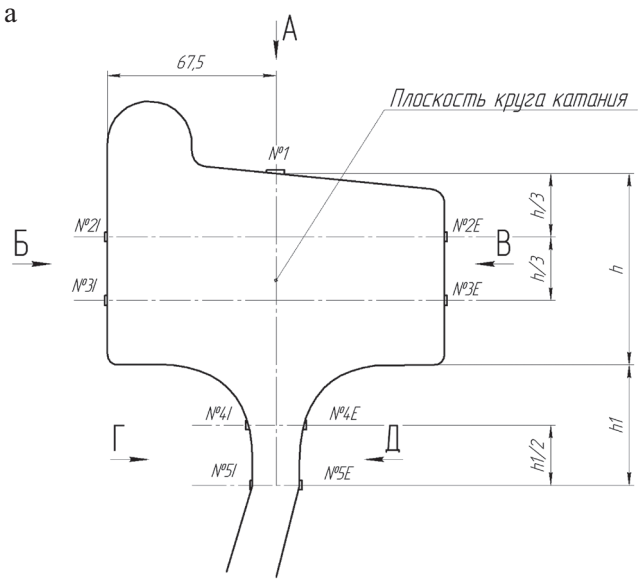


Рис. 2. Схема расположения базовых точек

а



б

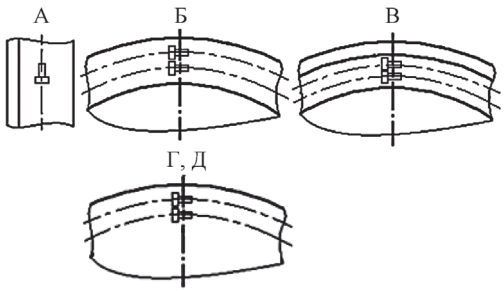


Рис. 3. Схема наклейки тензорезисторов на ободе и приободной части колеса: а) вид в сечении; б) местные виды по стрелкам

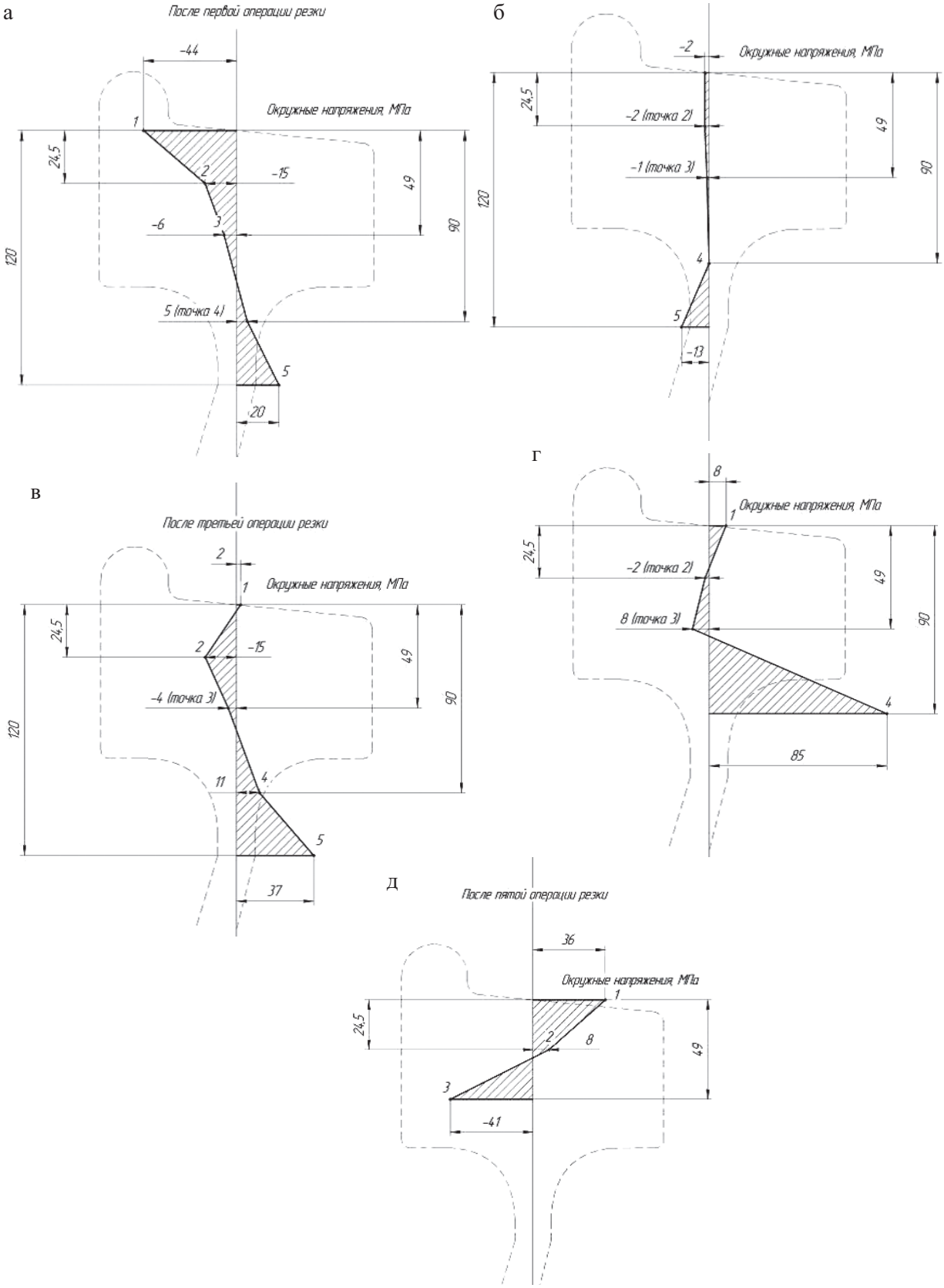


Рис. 4. Эпюра окружных остаточных напряжений по кругу катания после первой (а), второй (б), третьей (в), четвертой (г) и пятой (д) операций резки

уменьшилось на 2,5 мм. Следовательно, знак окружных напряжений отрицательный (сжатие), а значения соответствуют требованиям ГОСТ 10791-2011.

Затем выполняли второй огневой радиальный рез и отделяли сектор от колеса. Показания с тензорезисторов регистрировали после вырезания сектора и его остывания до первоначальной температуры.

Последующие резки обода параллельно оси колеса выполняли механическим способом с охлаждением.

Обработка результатов эксперимента

Остаточные напряжения $\sigma_{1,2}$, МПа, при применении двухкомпонентных розеток тензорезисторов определяли по формулам

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2),$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1),$$

где ε_1, ε_2 – относительная деформация в двух взаимно перпендикулярных направлениях осей тензорезисторов в двухкомпонентной розетке; E – модуль упругости первого рода, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

Для определения значений остаточных напряжений в плоскости круга катания полученные результаты пересчитывали к плоскости круга катания.

После отделения фрагмента обода цельного колеса от его дисковой части остаточное напряжение, приведенное к плоскости круга катания $\sigma_{ср}$, МПа, вычисляли по формуле

$$\sigma_{ср} = \sigma_{в}\frac{b}{a+b} + \sigma_{н}\frac{a}{a+b},$$

где $\sigma_{в}$ – напряжение, измеренное на внутренней стороне обода, МПа; $\sigma_{н}$ – напряжение, измеренное на наружной стороне обода, МПа, напротив точки измерения $\sigma_{в}$; a, b – расстояния от плоскости круга катания до внутренней и наружной граней обода, мм, где измерялись напряжения $\sigma_{в}$ и $\sigma_{н}$, соответственно.

Остаточные напряжения, $\sigma_{ср1}$, МПа, в приободной части диска колеса определяли по формуле

$$\sigma_{ср1} = \sigma_{в1}\frac{d}{c+d} + \sigma_{н1}\frac{c}{c+d},$$

где $\sigma_{в1}$ – напряжение, измеренное на внутренней стороне диска, МПа; $\sigma_{н1}$ – напряжение, измеренное на наружной стороне диска, МПа, напротив точки измерения $\sigma_{в}$; c, d – расстояния от плоскости круга катания до внутренней и наружной граней диска, мм, где измеряли напряжения $\sigma_{в}$ и $\sigma_{н}$, соответственно.

По результатам измерений построены эпюры остаточных напряжений (рис. 4).

Заключение

По результатам испытаний колеса с закаленными спицами можно сделать следующие выводы.

1. Испытания методом тензометрии показали, что в колесе с закаленными спицами на поверхности катания по кругу катания остаточные окружные напряжения – сжимающие, они составляют –1 МПа.

2. Сходимость обода после радиальной разрезки составила 2,5 мм, что подтверждает отрицательные значения остаточных окружных напряжений и соответствует требованиям ГОСТ 10791-2011.

3. Глубина точки перехода сжимающих остаточных окружных напряжений в растягивающие составила 62 мм при допустимом значении не менее 40 мм. По данному параметру колесо с закаленными спицами из стали марки 2 и коническим диском соответствует требованиям РД 32.144-2000.

Библиографический список

1. Богданов А. Ф. Улучшение свойств металла обода колесных пар тягового подвижного состава / А. Ф. Богданов, А. М. Будюкин, И. А. Иванов

и др. // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – № 1 (10). – С. 22–30.

2. Ботвина Л. Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения / Л. Р. Ботвина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. –Т. 70, № 4. – С. 41–51.

3. Воробьев А. А. Влияние термообработки на свойства колесной стали при ремонте / А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, А. А. Соболев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2014. – № 19. – С. 36–38.

4. Воробьев А. А. Моделирование динамики подвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко, К. А. Мерочник // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 24–30.

5. Жуков Д. А. Влияние индукционного нагрева на структуру колесной стали в процессе ремонта / Д. А. Жуков, И. А. Иванов, А. А. Соболев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2013. – № 17. – С. 31–33.

6. Иванов И. А. Моделирование сил резания при шлифовании профиля железнодорожных колес / И. А. Иванов, Д. Д. Евсеев, И. В. Овсяникова, А. С. Тарапанов // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3. – С. 45–54.

7. Кононов Д. П. Увеличение долговечности вагонных колес методом локальной термообработки / Д. П. Кононов // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2.

8. Кушнер В. С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : моногр. / В. С. Кушнер, А. А. Крутько, А. А. Воробьёв и др. – Омск : Омский гос. техн. ун-т, 2015. – 224 с.

9. Махутов Н. А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов / Н. А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 4. – С. 37–41.

10. Никольская Э. Н. К вопросу об оценке прочности осей и колёс при увеличении пробегов и сроков службы колёсных пар / Э. Н. Никольская, В. И. Грек // Конструкционно-технологическое обеспечение надёжности колёс рельсовых экипажей: сб. науч. тр. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2009. – С. 41–49.

11. Петрова И. М. Оценка циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности / И. М. Петрова, И. В. Гадолина // Вестник машиностроения. – 2005. – № 10.

12. Терентьев В. Ф. Усталость высокопрочных сталей / В. Ф. Терентьев // Деформация и разрушение материалов. – 2006. – № 8. – С. 2–11.

13. Терехов П. М. Перспективы использования колесных пар с бандажами повышенной твердости / П. М. Терехов, А. А. Воробьев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2012. – № 15. – С. 23–25.

14. Школьник Л. М. Нагрузка текучести и циклическая трещиностойкость цельнокатаных колёс / Л. М. Школьник, М. И. Староселецкий, А. С. Сунгуров, Л. И. Бондаренко // Вестн. ВНИИЖТ. – 1985. – № 4. – С. 25–28.

15. Якушев А. В. Результаты определения остаточных технологических напряжений в дисковой части цельнокатаных колёс грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии / А. В. Якушев, Д. П. Кононов, С. О. Комиченко // Транспорт РФ. – 2015. – № 3. – С. 66–68.

References

1. Bogdanov A. F., Budyukin A. M., Ivanov I. A., Zhukov D. A. & Urushev S. V. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy – Bull. of Sci. Studies Res.*, 2014, no. 1 (10), pp. 22-30.

2. Botvina L. R. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Materials Diagnostics*, 2004, T. 70, no. 4, pp. 41-51.

3. Vorobyev A.A., Zhukov D.A. & Sobolev A.A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2014, no. 19, pp. 36-38.

4. Vorobyev A. A., Budyukin A. M., Kondratenko V. G. & Merochnik K. A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2015, no. 21, pp. 24-30.

5. Zhukov D. A., Ivanov I. A. & Sobolev A. A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2013, no. 17, pp. 31-33.

6. Ivanov I.A., Yevseyev D.D., Ovsyanikova I.V. & Tarapanov A.S. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 3, pp. 45-54.

7. Kononov D.P. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2014, no. 2.

8. Kushner V.S., Krutko A.A., Vorobyev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. & Kerentsev D.Ye. Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par [Influence of Structure and Mechanical Properties of Wheel Steels on Wear and Profile Recovery Modes of Wheel Pairs]. Omsk, Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2015. 224 p.

9. Makhutov N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Materials Diagnostics*, 2004, T. 70, no. 4, pp. 37-41.

10. Nikolskaya E.N. & Grek V.I. K voprosu ob otsenke prochnosti osey i koles pri uvelichenii probegov i srokov sluzhby kolesnykh par [On the Issue of Evaluation of Strength of Axles and Wheels in Cases of Increasing Runs and Life Cycles of Wheel Pairs]. *Konstruktsionno-tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti koles relsovykh ekipazhey: sbornik nauzhnykh trudov [Design and Engineering Support for Reliability of Rail-Track Carriages Wheels: Coll. Sci. Papers*]. St. Petersburg, PGUPS, 2009. Pp. 41-49.

11. Petrova I.M. & Gadolina I.V. *Vestnik mashinostroyeniya – Engine-Building Bull.*, 2005, no. 10.

12. Terentyev V.F. *Deformatsiya i razruzheniye materialov – Deformation and Destruction of Materials*, 2006, no. 8, pp. 2-11.

13. Terekhov P.M. & Vorobyev A.A. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – New Materials and Technologies in Engine Building*, 2012, no. 15, pp. 23-25.

14. Shkolnik L.M., Staroseletskiy M.I., Sungurov A.S. & Bondarenko L.I. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bull.*, 1985, no. 4, pp. 25-28.

15. Yakushev A.V., Kononov D.P. & Komichenko S.O. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 3, pp. 66-68.

ИВАНОВ Игорь Александрович – доктор техн. наук, профессор, ivanov_1_7@mail.ru; *КОНОНОВ Дмитрий Павлович – канд. техн. наук, доцент, d_kononov@mail.ru; УРУШЕВ Сергей Викторович – доктор техн. наук, профессор, tehmet_pgups@mail.ru; ЯКУШЕВ Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, av-yakushev@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.21.072/624.042.8

В. В. Кондратов, В. А. Петров, С. С. Ковалинский

РАСЧЁТНО–ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ И ОПОР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА

Дата поступления: 27.05.2016
Решение о публикации: 10.07.2016

Цель: Исследовать перемещения массивных опор железнодорожного моста при воздействии поездной нагрузки, чтобы подтвердить гипотезу о демпфировании колебаний железнодорожных мостов вследствие взаимодействия опор с грунтом основания. **Методы:** Рассматривались особенности динамического воздействия поездной нагрузки на мост с учетом взаимодействия опор с грунтом основания на основе численных экспериментов. Расчетная оценка динамических процессов в системе «поезд – мост – основание» выполнена на основе плоской конечно-элементной модели с помощью программного комплекса Midas/Civil. **Результаты:** Сравнение расчетных амплитуд колебаний пролетного строения и опор с экспериментальными значениями, измеренными при оценке технического состояния эксплуатируемого железнодорожного моста, показало, что расчетная величина коэффициента динамики к поездной нагрузке для пролётного строения не превышает нормативного значения. Выяснено, что для опор эта величина превышает единицу, т. е. больше нормативного значения, и свидетельствует о динамическом взаимодействии опор моста с грунтом основания. Показана целесообразность проведения дополнительных исследований колебаний массивных опор мостов на относительно слабых грунтах при воздействии нагрузки от поезда. **Практическая значимость:** Результаты работы подтверждают корректность предлагаемой динамической модели системы «поезд – мост – основание» и показывают возможность моделирования демпфирования колебаний мостовых конструкций на основе динамического взаимодействия опор с грунтом основания.

Железнодорожный мост, поезд, основание опоры, конечный элемент, частота колебаний, шаг интегрирования, демпфирование колебаний, динамический коэффициент.

***Valeriy V. Kondratov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, director general, imostov@yandex.ru (Bridge Structures and Track research and development centre LLC); **Vadim A. Petrov**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, chief specialist, vpetrov345@yandex.ru; **Sergey S. Kovalinskiy**, team leader, artkovs@mai.ru (Geo-Proyekt LLC) CALCULATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES FOR DYNAMIC INTERACTION OF RAIL BRIDGE SPANS AND ABUTMENTS

Objective: To study displacement of a rail bridge's plate piers under the influence of train load in order to confirm a hypothesis on damping vibrations of rail bridges due to soil-structure interaction. **Methods:** Specific features of dynamic influence of train load on a bridge were considered taking into account interaction of abutments with foundation soil on the basis of numerical experiments. Calculation evaluation of dynamic processes in the "train – bridge – foundation" system was conducted with the use of horizontal finite-element model on the Midas/Civil software system. **Results:** Comparison between calculated amplitude of oscillations of spans and abutments and experimental values measured in the course of evaluation of technical condition of an operated rail bridge has indicated that the calculated value of coefficient of dynamic to train load for rail bridge span does not exceed the regulatory value. It

was also established that for abutments the value exceeds one, i. e. it is over the regulatory value, and constitutes evidence of dynamic interaction between bridge abutments and foundation soil. Practicability of conducting additional studies of vibrations of bridges' plate piers in relatively soft soils under the influence of train loads was shown. **Practical importance:** Study results confirm that the proposed dynamic "train – bridge – foundation" system model is correct, and show that it is possible to simulate damping vibrations of bridge structures on the basis of dynamic interaction of abutments with foundation soil.

Rail bridge, train, pier footing, finite element, vibration frequency, integration step, vibration damping, dynamic coefficient.

Динамическое воздействие поездной нагрузки на мосты обычно либо сводится к анализу колебаний пролетных строений, либо рассматривается как динамическое взаимодействие пролетных строений с экипажами поезда [1, 5, 7, 8]. Характеристики опор железнодорожных мостов при построении модели «мост – поезд» практически не принимаются во внимание. Считается, что при воздействии поезда опоры не совершают колебаний, а коэффициент динамики к поездной нагрузке при расчете опор в нормативных документах рекомендуется принимать равным 1. Однако анализ причин демпфирования колебаний стальных пролетных строений железнодорожных мостов, а также измерения вертикальных перемещений пролетных строений и опор при воздействии поезда показали, что при анализе динамических процессов в системе «мост – поезд» колебания опор следует учитывать.

Результаты экспериментальных исследований вертикальных колебаний пролетного строения и опор железнодорожного моста

В работах [14, 15] показано, что в определённых случаях необходимо учитывать динамическое взаимодействие моста с грунтом основания, при этом основной причиной демпфирования колебаний стальных пролётных строений мостов является рассеивание энергии в грунт основания сооружения. Результаты расчетов, приведенные в [6], косвенно подтверждены экспериментальными исследованиями на основе сравнения расчетных и измеренных параметров демпфирования пролетных строений. Экспериментальные исследования, подтверждающие факт совместных колебаний пролётных строений и опор моста и взаимодействие последних с грунтом основания при воздействии поездных нагрузок, в нашей стране до недавнего времени не проводились.

В процессе диагностики опор эксплуатируемого железнодорожного моста через р. Большая Ижора и измерений динамических характеристик мостового сооружения, выполненных сотрудниками Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, подтверждено динамическое взаимодействие мостового сооружения с грунтом основания [11]. Измерялись вертикальные ускорения на устоях и в середине пролетного строения при проходе поездов по испытываемому мосту и по такому же мосту под второй путь, расположенному на расстоянии 10 м от первого. Результаты экспериментальной оценки относительных динамических перемещений конструкций моста представлены на рис. 1а, где стрелками в масштабе показаны направление и относительные перемещения опор и пролетного строения при доминирующей частоте 8 Гц в низкочастотной области. При этом динамическим воздействием на мост являлся проход грузового поезда по соседнему мосту.

Величина перемещений опор и пролетного строения существенно меняется при проходе поезда по испытываемому мосту (рис. 1б). Относительные перемещения опор возрас-

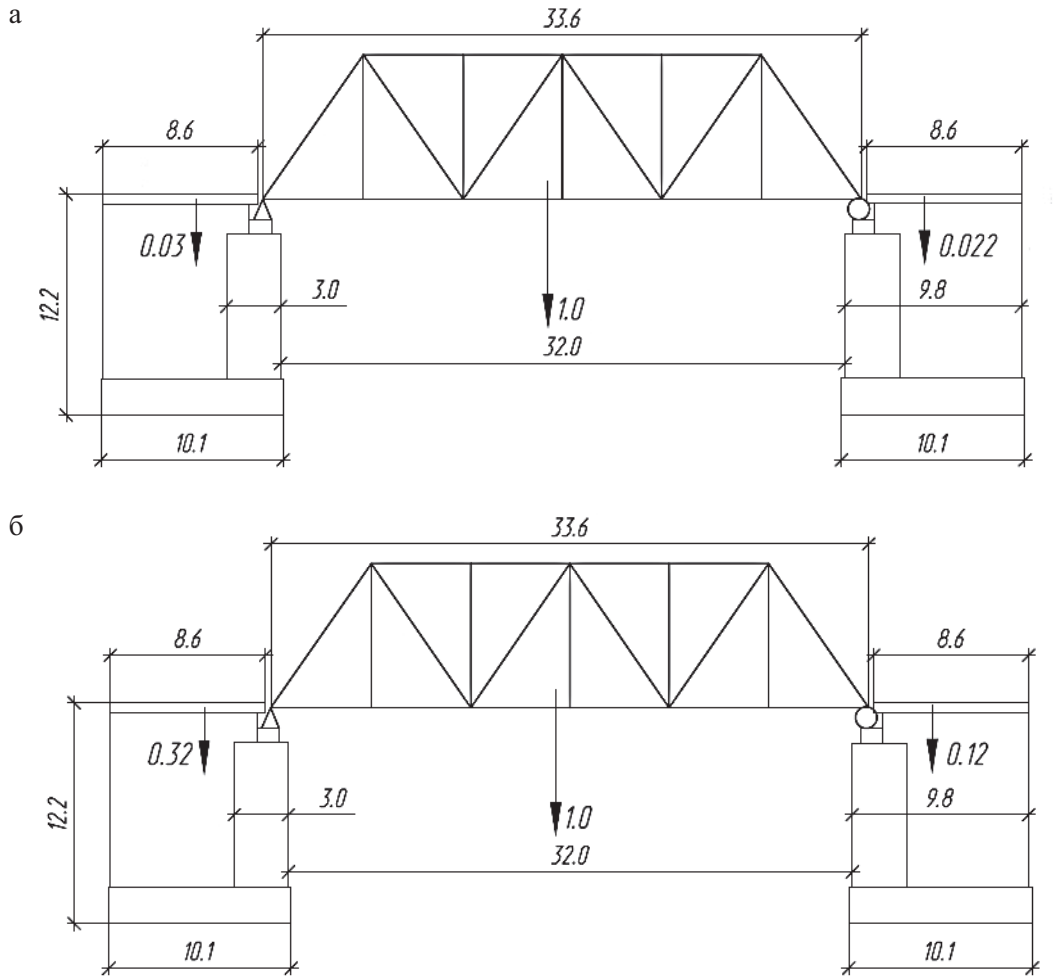


Рис. 1. Измеренные относительные перемещения опор и пролетного строения при проходе грузового поезда по соседнему (а) и по испытываемому (б) мосту

тают на порядок по сравнению с их перемещениями при проходе поезда по соседнему пути.

Расчетная оценка вертикальных колебаний пролетного строения и опор железнодорожного моста при воздействии экипажей поезда

Для анализа динамических перемещений опор железнодорожного моста была разработана плоская конечно-элементная модель фермы, работающей совместно с опорами в соответствии с техническими характеристиками испытанного моста через р. Большая Ижора (рис. 2).

Расчётные исследования динамического взаимодействия фермы с опорами выполнены с помощью программного комплекса Midas/Civil производства Южной Кореи. Программный комплекс ориентирован на расчёт мостовых сооружений и позволяет решать задачи, связанные с высокочастотными вынужденными колебаниями конструкций под действием повторяющихся ударных нагрузок. Модель включает 830 узлов и 1311 конечных элементов, в том числе 612 двухузловых балочных элементов, 390 четырёхузловых элементов плоской деформации, 83 элемента двухузловых упругих связей, 64 одноузловых элемента упругих опор и 162 одноузловых элемента сосредоточенных масс.

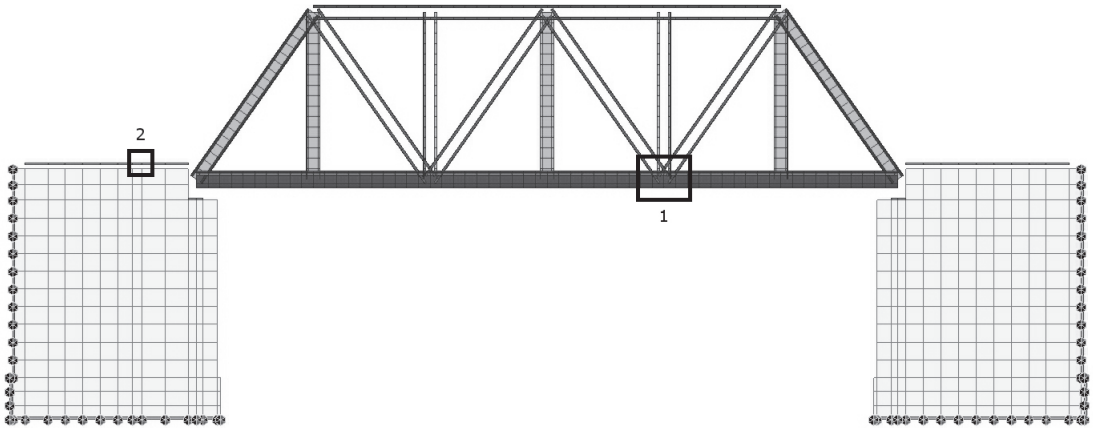


Рис. 2. Конечно-элементная расчётная модель системы «мост – грунтовое основание». Цифрами показаны номера точек наблюдения

Пролётное строение схематизировано балочными элементами, опоры – элементами плоской деформации, грунтовое основание – элементами упругих опор. Модель учитывает инерционные характеристики подрессоренных и неподрессоренных частей подвижного состава. Инерция неподрессоренных частей представлена с помощью элементов сосредоточенных масс, размещённых в узлах продольных балок фермы. Инерция подрессоренных частей учтена с помощью масс, связанных с продольными балками элементами упругих связей, имеющими жёсткость рессор.

Рассматривался установившийся процесс динамического взаимодействия грузового поезда с мостом. Инерционные характеристики подвижного состава не изменялись в течение рассматриваемого периода. Модель поезда состояла из четырехосных наливных цистерн длиной по осям автосцепок 12,0 м с погонной массой 6,8 т [3, 10].

Динамическое воздействие подвижного состава на пролетное строение и опоры моделировалось ударными нагрузками, обусловленными взаимодействием ходовых частей экипажей и пути на мосту, и представляло собой совокупность ударных воздействий от колёсных пар вагонов в зонах расположения рельсовых стыков. Рельсовые стыки находились на пролётном строении и на левой опоре на расстоянии 25 м друг от друга (точки № 1 и 2 на рис. 2). Время «запаздывания» каждого удара определялось расстояниями между осями вагонов и скоростью поезда. Общее число учитываемых ударов 60.

Величина ударной нагрузки от одного колеса принята равной 22 тс, продолжительность удара 40 мс при скорости 50 км/ч и 20 мс – при скорости 100 км/ч [6, 9]. Изменение нагрузки во времени принято по экспоненциальному закону.

Задача о вынужденных колебаниях системы «мост – поезд – основание» решалась в линейной постановке методом разложения решения по формам собственных колебаний. Учитывалось 108 собственных форм, перекрывающих частотный диапазон до 150 Гц. Для улучшения сходимости решения по формам использован специальный алгоритм, реализованный в программном комплексе Midas/Civil. Алгоритм связан с включением вектора статического решения задачи в состав базисных собственных векторов.

При динамическом модуле упругости глинистого основания, равном 60,0 МПа, частота собственных колебаний, соответствующая первой изгибной собственной форме пролётного строения, составила 8,008 Гц, что вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

При моделировании скорости движения поезда 50 км/ч шаг интегрирования по вре-

мени принят равным 1 мс, время анализа 7,5 с, для скорости 100 км/ч шаг интегрирования по времени принят равным 0,5 мс, время анализа 3,75 с, шаг интегрирования по времени 0,001 с, число точек выдачи – 7500. Число учитываемых собственных форм составило 120. На рис. 3 показаны первая изгибная и одна из высших форм собственных колебаний системы.

Вязкое демпфирование в системе задано в долях от критического по каждой из учитываемых форм колебаний. В зависимости от характера собственной формы приняты различные величины демпфирования в диапазоне от 2 до 40 %. Максимальные значения демпфирования соответствуют собственным формам, связанным с колебаниями подрессоренных частей подвижного состава. Для форм, связанных с колебаниями опор на грунтовом основании, значения демпфирования приняты равными 20 % от критического. Минимальные величины демпфирования соответствуют колебаниям конструктивных элементов пролётного строения.

В результате расчётов получены хронограммы вертикальных перемещений и ускорений в зонах рельсовых стыков. Анализ частотного состава хронограмм выполнен по спектрам действия для каждой хронограммы. На рис. 4 приведены хронограммы вертикальных перемещений точек наблюдения для скоростей движения поезда 50 и 100 км/ч.

Расчетное соотношение вертикальных перемещений опор и пролётного строения при V = 50 км/ч составляет 0,30, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Оценена величина динамического коэффициента к поездной нагрузке для рассматриваемого типа массивных опор и пролетного

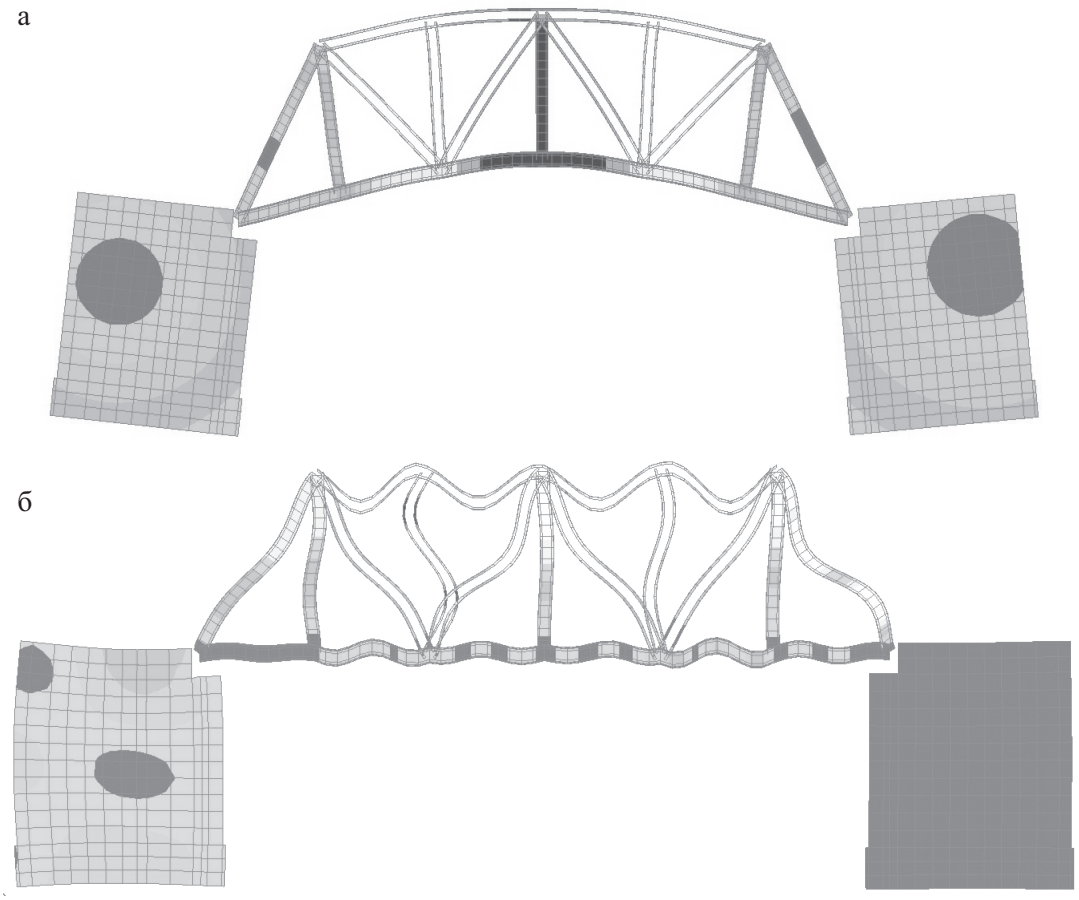


Рис. 3. Форма собственных колебаний № 21 (а) и № 107 (б)

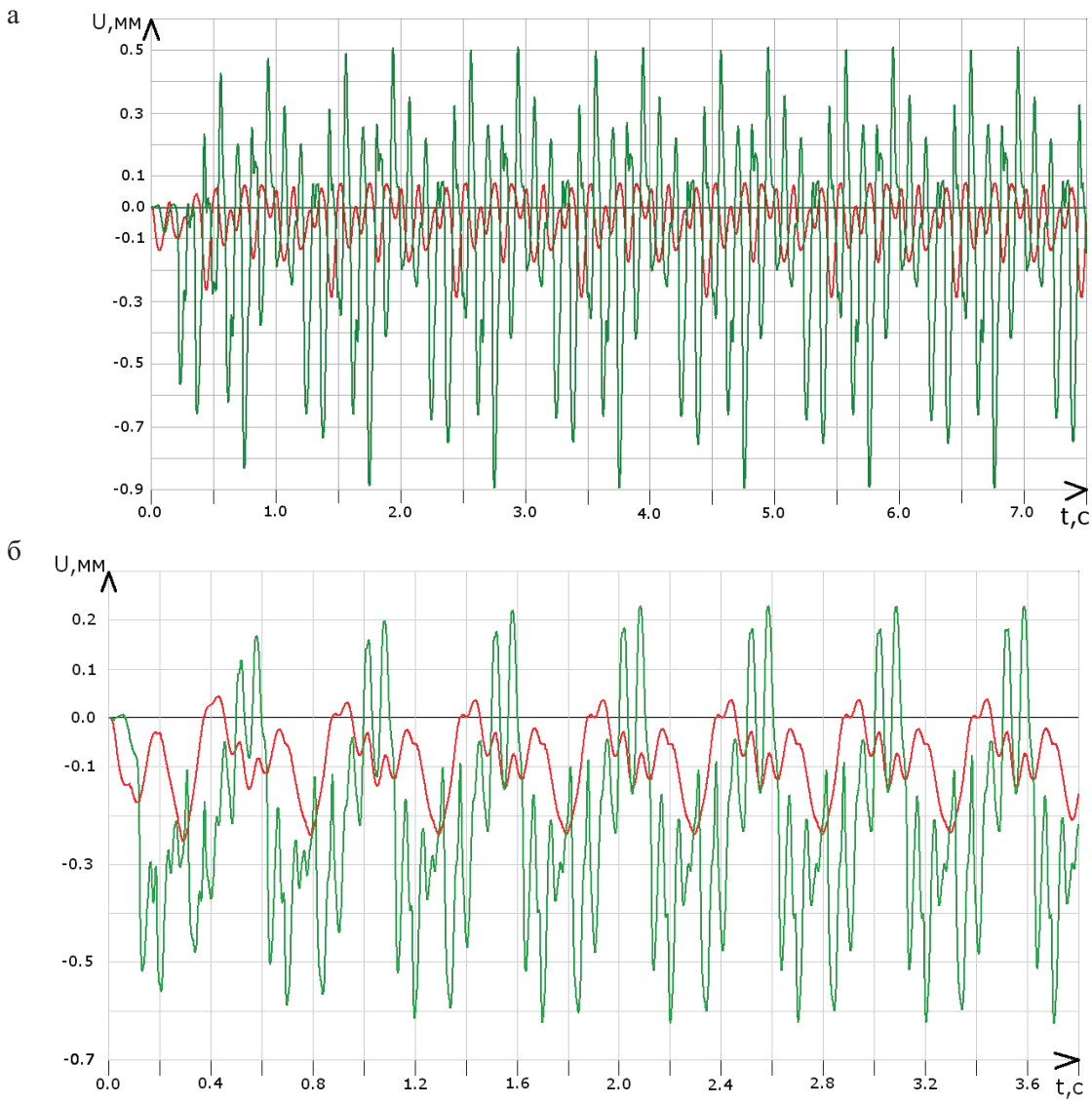


Рис. 4. Хронограммы вертикальных перемещений точек наблюдения (мм) при скорости поезда 50 км/ч (а) и 100 км/ч (б). Зелёный цвет – точка 1, красный – точка 2

строения. Статические перемещения опоры и пролетного строения определены на базе расчетной схемы системы, приведенной на рис. 5.

Здесь m_1 и m_2 – соответственно, приведенные массы опор и пролетного строения; c_1 и c_2 – приведенные жесткости грунтового основания и пролетного строения. Вертикальная жесткость основания c_1 была принята в соответствии с рекомендациями О. А. Савинова и В. И. Ильичева [4, 13] и вычислялась по формуле

$$c_1 = c_z F,$$

где c_z – коэффициент упругого равномерного сжатия; F – площадь подошвы фундамента.

Величина c_z в соответствии с рекомендациями [13] определялась по формуле

$$c_z = \chi_z \frac{E}{1-\mu^2} \frac{1}{\sqrt{F}},$$

где χ_z = 1,152 – коэффициент, зависящий от соотношения сторон подошвы фундамента и принимаемый по таблице 6.5 [13]. При $F > 10$ м^2 принимается $F = 10$ м^2.

Статический модуль деформации E суглинистого основания принят равным 15,0 МПа.

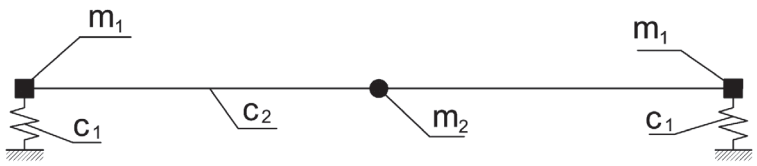


Рис. 5. Модель системы «пролётное строение – опоры – основание»

При $F = 64$ м^2 жесткость c_1 равна 384,6 МН/м. Погонный вес грузового поезда составляет 6,8 тс/м. Деформация основания под действием веса поезда, воздействующего на одну опору, будет равна

$$\Delta = Mg/c_1 = 6{,}8 \cdot 25{,}7 \cdot 9{,}81/384\,600 = \\ = 0{,}0045 \text{ м} = 4{,}5 \text{ мм}$$

При скорости 50 км/ч размах колебаний опоры составляет 0,36 мм, амплитуда – 0,18 мм, при скорости 100 км/ч – соответственно, 0,30 мм и 0,15 мм. Таким образом, коэффициент динамики опоры при $V = 50$ км/ч равен 1,04, при $V = 100$ км/ч – 1,033. В Своде правил [12] коэффициент динамики при расчете массивных опор рекомендуется принимать равным 1,0.

Для сравнения оценен коэффициент динамики пролетного строения. Приведенная жесткость пролетного строения c_2 принята в соответствии с зависимостью [2]

$$c_2 = 4\pi^2 m_2/T^2,$$

где T – период колебаний пролетного строения; m_2 – приведенная масса пролетного строения, равная в данном случае 67,2 т.

При $T = 0{,}125$ с жесткость c_2 будет равна 170 000 тс/с^2, а статический прогиб пролетного строения от поездной нагрузки составит 6,6 мм. Полученная амплитуда колебаний пролетного строения при скорости движения поезда $V = 50$ км/ч равна 0,7 мм, коэффициент динамики 1,106. Амплитуда колебаний пролетного строения при $V = 100$ км/ч составляет 0,43 мм, коэффициент динамики 1,065, что меньше нормативного значения 1,28. Амплитуда колебаний пролетного строения при скорости движения поезда 50 км/ч превышает соответствующее значение при скорости 100 км/ч, поскольку частота ударных воздействий при проходе тележками вагонов рельсовых стыков при меньшей скорости равна 7,5 Гц, что составляет 94 % от 8 Гц.

Заключение

Приведенные результаты показывают, что при сооружении массивных опор железнодорожных мостов на естественном основании на глинистых и суглинистых грунтах коэффициент динамики при расчете опор и оснований следует принимать больше 1,0. Для оценки величины коэффициента динамики опор железнодорожных мостов необходимо провести дополнительные исследования.

Библиографический список

1. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.

2. Бондарь Н. Г. Динамика железнодорожных мостов / Н. Г. Бондарь, И. Н. Казей, Б. Ф. Лесохин, Ю. Г. Козьмин. – М. : Транспорт, 1965. – 411 с.

3. Грузовые вагоны колеи 520 мм железных дорог СССР : альбом. – М. : Транспорт, 1982. – 112 с.

4. Ильичев В. А. О динамическом расчете фундаментов / В. А. Ильичев // Труды НИИОСП. – 1967. – Вып. 67. – С. 3–26.

5. Индейкин А. В. Вынужденные и параметрические колебания железнодорожных мостов со сквозными фермами при высокоскоростном движении / А. В. Индейкин, И. А. Федотова, В. А. Пе-

тров // Сб. докл. IV европейской конф. по динамике сооружений, Балкема, Роттердам, 1999. – Роттердам, 1999. – С. 663–668.

6. Коган А. Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1997. – 325 с.

7. Козьмин Ю. Г. Особенности динамического воздействия на мосты поездов, сформированных из однотипных вагонов / Ю. Г. Козьмин, В. В. Кондратов // Вопросы статической и динамической работы, оценки грузоподъемности и эксплуатационной надежности мостов : межвуз. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 1988. – С. 167–173.

8. Кондратов В. В. Особенности динамической работы пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы / В. В. Кондратов, Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 100–108.

9. Мелентьев Л. П. О типах и нормах содержания рельсов на направлениях с максимальными скоростями движения грузовых поездов / Л. П. Мелентьев // Работа железнодорожного пути при обращении грузовых поездов со скоростями 90–100 км/час / Труды ВНИИЖТ. – 1979. – Вып. 614. – С. 75–81.

10. Руководство по пропуску подвижного состава по железнодорожным мостам. – М. : Транспорт, 1993. – 366 с.

11. Сауц А. В. Применение конечно-элементного анализа при техническом обследовании железнодорожного моста / А. В. Сауц, С. Н. Савин // Современные научные исследования и инновации. – 2013. – № 4.

12. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*.

13. Справочник по динамике сооружений / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1972. – 513 с.

14. Уздин А. М. Учет взаимодействия сооружения с грунтом при расчете металлических пролетных строений мостов на вертикальные сейсмические воздействия / А. М. Уздин, В. В. Кондратов // Сейсмостойкое строительство. – 1982. – Вып. 4. – С. 18–23.

15. Уздин А. М. Учет демпфирования при расчете металлических пролетных строений мостов на сейсмические воздействия / А. М. Уздин, В. В. Кондратов // Сейсмостойкое строительство. – 1980. – Вып. 2. – С. 5–8.

References

1. Bondar N.G., Kozmin Yu.G., Roytburd Z.G., Tarasenko V.P. & Yakovlev G.N. Vzaimodeystviye zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom [Interaction of Rail Bridges with Rolling Stock]. Moscow, Transport, 1984. 272 p.

2. Bondar N.G., Kazey I.N., Lesokhin B.F. & Kozmin Yu.G. Dinamika zheleznodorozhnykh mostov [Rail Bridge Dynamics]. Moscow, Transport, 1965. 411 p.

3. Gruzovyye vagony kolei 1520 mm zheleznykh dorog SSSR: albom [Freight Cars of 1520 mm Gauge in the Railways of the USSR: An Album]. Moscow, Transport, 1982. 112 p.

4. Ilyichev V.A. O dinamicheskom raschete fundamentov [On Dynamic Calculation of Foundations]. *Trudy NIIOSP – Proc. of NIIOSP*, 1967, Is. 67, pp. 3-26.

5. Indeykin A. V., Fedotova I. A. & Petrov V. A. Vynuzhdennyye i parametricheskiye kolebaniya zheleznodorozhnykh mostov so skvoznymi fermami pri vysokoskorostnom dvizhenii [Forced and Parametric Oscillations of Truss-Span Rail Bridges on High-Speed Lines]. *Sbornik dokladov IV yevropeyskoy konferentsii po dinamike sooruzheniy [Coll. Papers of the 4th European Conference on Structure Dynamics]*, Balkema, Rotterdam, 1999. Pp. 663-668.

6. Kogan A.Ya. Dinamika puti i yego vzaimodeystviye s podvizhnym sostavom [Track Dynamics and its Interaction with Rolling Stock]. Moscow, Transport, 1997. 325 p.

7. Kozmin Yu. G. & Kondratov V. V. Osobennosti dinamicheskogo vozdeystviya na mosty poyezdov, sformirovannykh iz odnotipnykh vagonov [Specific Features of Dynamic Influence of Trains Formed from Carriages of the Same Type on Bridges]. *Voprosy staticheskoy i dinamicheskoy raboty, otsenki gruzopodyemnosti i ekspluatatsionnoy nadezhnosti mostov. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [Questions of Static and Dynamic Operation, Capacity Estimation and Performance Reliability of Bridges. Inter-University Coll. of Papers]*. Dnepropetrovsk, 1988. Pp. 167-173.

8. Kondratov V.V. & Bogdanov G.I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 1 (34), pp. 100-108.

9. Melentyev L.P. O tipakh i normakh soderzhaniya relsov na napravleniyakh s maksimalnymi skorostyami dvizheniya gruzovykh poyezdov [On Rail Types and Maintenance Norms in Directions with Maximum Speeds of Freight Train Movement]. *Rabota zheleznodorozhnogo puti pri obrashchenii gruzovykh poyezdov so skorostyami 90-100 km/chas. Trudy VNIIZhT. [Operation of Rail Track on which Freight Trains Circulate at the Speeds of 90–100 km/h. Proc. of VNIIZhT]*, 1979, Is. 614. Pp. 75-81.

10. Rukovodstvo po propusku podvizhnogo sostava po zheleznodorozhnym mostam [Guidelines for Passage of Rolling Stock on Rail Bridges]. Moscow, Transport, 1993. 366 p.

11. Sauts A.V. & Savin S.N. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii – Modern Scientific Studies and Innovations*, 2013, no. 4.

12. Set of Rules SP 35.13330.2011. Mosty i truby [Bridges and Pipes]. Updated Edition of SNiP 2.05.03-84*.

13. Spravochnik po dinamike sooruzheniy [Structure Dynamics Reference Book]; ed. B.G. Korenev & I.M. Rabonovich. Moscow, Stroyizdat, 1972. 513 p.

14. Uzdin A.M. & Kondratov V.V. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1982, Is. 4, pp. 18-23.

15. Uzdin A.M. & Kondratov V.V. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1980, Is. 2, pp. 5-8.

*КОНДРАТОВ Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, генеральный директор, imostov@yandex.ru (ООО «НИЦ “Мостовые сооружения и путь“»); ПЕТРОВ Вадим Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, главный специалист, vpetrov345@yandex.ru; КОВАЛИНСКИЙ Сергей Сергеевич – руководитель группы, artkovs@mai.ru (ООО «ГЕОПРОЕКТ»).

УДК 624.042.7

**И. О. Кузнецова, С. С. Ваничева, М. В. Фрезе,
А. А. Долгая, Т. М. Азаев, Х. Р. Зайнулабидова**

ПРИМЕНЕНИЕ ФРИКЦИОННО–ПОДВИЖНЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МОСТОВ И ДРУГИХ СООРУЖЕНИЙ

Дата поступления: 25.01.2016
Решение о публикации: 14.06.2016

Цель: Разработать и описать новую конструкцию сейсмоизолирующего устройства, состоящего из упругодемпфирующего элемента, соединенного с изолированными частями сооружения фрикционно-подвижными соединениями (ФПС), предназначенного для снижения расчетных нагрузок на сооружение, а также для многоуровневого проектирования и управления повреждениями конструкции. **Методы:** Для анализа работы ФПС использованы методы динамических расчетов сооружений, моделирование расчетных акселерограмм с использованием ЭВМ, а также натурные испытания при помощи сейсмоплатформ. **Результаты:** Предложено конструктивное решение нового сейсмоизолирующего устройства, упругодемпфирующий элемент которого выполнен в виде столика, верхняя плита столика устанавливается на металлические стержни из высокопрочной стали, параллельно со столиком установлены гидравлические демпферы, а ФПС из пакетов стальных листов соединены высокопрочными болтами, пропущенными через овальные отверстия. Выявлено, что при относительно слабых землетрясениях описываемая конструкция работает в упругой стадии и ФПС заблокированы; при сильных землетрясениях, когда горизонтальная нагрузка превышает силу трения в ФПС, происходит проскальзывание элемента за счет формы отверстий, что обеспечивает взаимное смещение листов на величину зазора между болтом и краем овального отверстия и обеспечивает сохранность сооружения. **Практическая значимость:** Использование описанной системы сейсмозащиты позволяет снизить расчетные сейсмические нагрузки на сооружения в пределах 40–70 % и спрогнозировать сценарии разрушения сооружения. Таким образом, снижается стоимость объекта строительства и повышается его надежность, что в свою очередь приводит к снижению экономических и социальных рисков при землетрясении.

Сейсмостойкость, сейсмоизоляция, фрикционно-подвижные болтовые соединения.

***Inna O. Kuznetsova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, i-kuznetsova@mail.ru; **Svetlana S. Vanicheva**, section head (Petersburg State Transport University); **Maksim V. Freze**, Cand. Sci. (Eng.); **Anzhelika A. Dolgaya**, Cand. Sci. (Eng.), design engineer (Transmost PLC); **Tagir M. Azayev**, Cand. Sci. (Eng.); **Khanzada R. Zaynulabidova**, Cand. Sci. (Eng.) (Dagestan State Technical University)
APPLICATION OF FRICTIONAL DYNAMIC BOLTED-TYPE CONNECTIONS TO ENSURE SEISMIC RESISTANCE OF ENGINEERING STRUCTURES OF BRIDGES AND OTHER OBJECTS

Objective: To develop and describe a new design of a seismic-isolation device consisting of elastic damping element connected to isolated parts of an object by frictional dynamic connections. It is intended for reduction of design load on an object, as well as multi-level designing and management of object damage. **Methods:** Structure dynamic calculation methods were used to analyse the operation of frictional dynamic connections, as were computer simulation of calculation accelerograms and full-

scale tests involving shake tables. **Results:** A design solution for a new seismic-isolation device is proposed. Its elastic damping element is shaped like a table, its top plate is placed on metallic bars made from high-resistance steel, hydraulic dampers are installed parallel to the table, and frictional dynamic connections made from piles of steel plates are linked by high-strength bolts put through oval openings. It was discovered that in cases of relatively minor earthquakes the construction described here is operating in elastic stage, and frictional dynamic connections get blocked. During strong earthquakes, when horizontal load exceeds friction force in frictional dynamic connections, slipping of an element occurs due to shape of openings which ensures mutual displacement of plates by gap width between the bolt and the edge of oval opening, which ensures the structure's preservation. **Practical importance:** Using the seismic resistance system described here allows for reduction of calculation seismic loads on structures by between 40 and 70 per cent, and to forecast scenarios of structure destruction. Thus the cost of construction object gets reduced, its reliability is increased, which cuts economic and social risks in case of an earthquake.

Seismic resistance, seismic isolation, frictional dynamic bolted-type connections.

В настоящее время в практике сейсмостойкого строительства сложился многоуровневый подход к обеспечению сейсмостойкости сооружения. В отечественной литературе такой подход получил название «проектирование сооружений с заданными параметрами предельных состояний» [7, 13], за рубежом его называют Performance Based Designing (PBD). При таком подходе отказываются от принципа равнопрочности сооружения и предусматривают наличие слабых мест, позволяющих управлять накоплением повреждений в конструкции, минимизируя дисперсию при прогнозе ущерба.

Во всех случаях в конструкции создаются узлы, в которых от экстремальных нагрузок могут возникать неупругие смещения элементов. Вследствие этих смещений нормальная эксплуатация сооружения, как правило, нарушается, однако исключается его обрушение. Эксплуатационные качества сооружения должны легко восстанавливаться после экстремальных воздействий. Для обеспечения указанного принципа проектирования и были предложены фрикционно-подвижные болтовые соединения (ФПС) [6]. Под ФПС понимаются соединения металлоконструкций высокопрочными болтами, отличающиеся тем, что отверстия под болты в соединяемых деталях выполнены овальными вдоль направления действия экстремальных нагрузок. При экстремальных нагрузках происходит взаимная сдвижка соединяемых деталей на величину до 3–4 диаметров используемых высокопрочных болтов. Работа таких соединений имеет целый ряд особенностей и существенно влияет на поведение конструкции в целом. При этом во многих случаях можно снизить затраты на усиление сооружения, подверженного сейсмическим и другим интенсивным нагрузкам.

Описание фрикционно-подвижных соединений

ФПС были предложены в НИИ мостов ЛИИЖТа в 1980 г. и защищены авторскими свидетельствами [9–12 и др]. Простейшее стыковое и нахлесточное соединения приведены на рис. 1. При экстремальных нагрузках должны происходить взаимная подвижка соединяемых деталей вдоль овала и за счет этого уменьшаться пиковое значение усилий, передаваемое соединением.

При использовании обычных болтов их натяжение N не превосходит 80–100 кН, а разброс натяжения ΔN = 20–50 кН, что не позволяет прогнозировать несущую способность такого соединения по трению. При использовании же высокопрочных болтов при том же ΔN натяжение N = 200–400 кН, что в

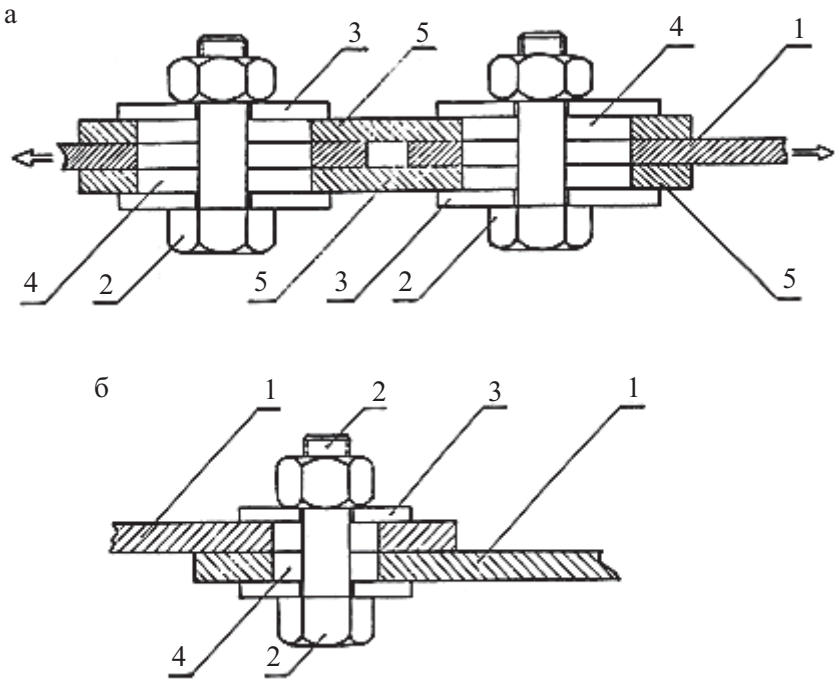


Рис. 1. Принципиальная схема фрикционно-подвижного соединения:
а) встык; б) внахлест;
1 – соединяемые листы; 2 – высокопрочные болты; 3 – шайба;
4 – овальные отверстия; 5 – накладки

принципе может позволить задание и регулирование несущей способности соединения.

Однако проектирование и расчет таких соединений вызвал серьезные трудности. Первые испытания ФПС показали, что рассматриваемый класс соединений не обеспечивает в общем случае стабильной работы конструкции. В процессе подвижки соединение может заклинить, контактные поверхности соединяемых деталей оплавиться и т. п. [3–5]. Случались обрывы головки болта. Исследования 1985–1990 гг. позволили выявить способы обработки соединяемых листов, обеспечивающих стабильную работу ФПС. В частности, установлена недопустимость использования для ФПС пескоструйной обработки листов пакета, рекомендованы обжиг листов, нанесение на них специальной мастики или напыление мягких металлов. Исследования по рассматриваемому вопросу обобщены в [13].

В 1995 г. исследования по ФПС были представлены на 11-й всемирной конференции по сейсмостойкому строительству [14]. После этого их начали применять за рубежом. Однако в России эти соединения не применялись в течение 20 лет после разработки теории ФПС в НИИ мостов [2].

Применение ФПС на мостах г. Сочи

Впервые ФПС использовали при строительстве железнодорожных мостов на олимпийских объектах в г. Сочи. В частности, было предложено новое опорное сейсмоизолирующее устройство (рис. 2). Устройство имеет три принципиальные особенности:

1) вертикальная и горизонтальная нагрузки передаются на разные элементы единого узла опирания, т. е. в системе опирания имеются независимые опорный и сейсмоизолирующий элементы. Опорный элемент выполнен в виде обычной подвижной опорной части, жесткой в вертикальном направлении. Это исключает вертикальные смещения пролетного строения под нагрузкой;

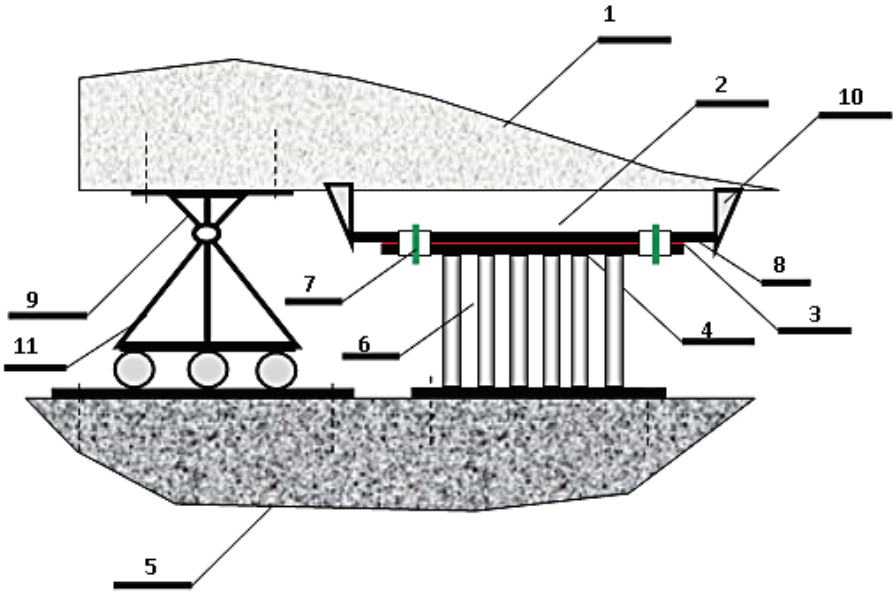


Рис. 2. Схема устройства сейсмоизоляции на железнодорожных мостах в г. Сочи:
1 – пролетное строение; 2 – зазор между податливым элементом и пролетным строением; 3 – антифрикционное покрытие; 4 – верхний лист податливого элемента; 5 – опора; 6 – податливый элемент; 7 – ФПС; 8 – дополнительный лист; 9 – шарнирный балансир; 10 – упоры; 11 – подвижная опорная часть

2) сейсмоизолирующий элемент выполнен составным в виде упругого столика из стальных стержней (стержневого амортизатора) и пакета стальных листов, объединенных ФПС;

3) сила трения в ФПС не превосходит разрушающей нагрузки на опору и столик.

Для снижения сейсмических нагрузок на опоры и относительных смещений пролетных строений на опорах мостов дополнительно устанавливались демпферы. Для этого использованы гидравлические демпферы фирмы «Вибросейсм», детально описанные в [15].

Как видно из рис. 2, между пролетным строением 1 и опорой 5 параллельно с податливым сейсмоизолирующим элементом 6 устанавливается опорный элемент 11, представляющий собой обычную подвижную опорную часть с шарнирным балансиром 9. Верхний лист податливого элемента 4 с антифрикционным покрытием 3 соединен с дополнительным листом 8 с помощью ФПС 7. При этом листы 4 и 8 с антифрикционным покрытием 3 и ФПС 7 образуют верхний скользящий элемент. На пролетное строение 1 устанавливаются упоры 10, контактирующие с дополнительным листом 8 и имеющие свободу вертикальных перемещений относительно листа 4. При этом податливый элемент со скользящим элементом имеют высоту h меньше, чем высота подвижной опорной части H за счет устройства зазора 2. Это исключает передачу на податливый элемент вертикальной нагрузки от пролетного строения, которая полностью воспринимается подвижной опорной частью.

При эксплуатационных нагрузках (торможении подвижного состава, поперечных ударах транспортных средств), а также при действии проектного землетрясения (ПЗ) горизонтальные нагрузки передаются от пролетного строения 1 на опору 5 через упоры 10 и податливый элемент 6. При этом динамические нагрузки на опору снижаются за счет амортизирующего действия податливого элемента. При максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) происходит подвижка в ФПС, пиковые нагрузки на опору ограничиваются силой трения в ФПС и обеспечивается сохранность сооружения (пролетные строения

не сбрасываются с опор) [1]. Таким образом, расчетные нагрузки снижаются при действии как ПЗ, так и МРЗ.

Предлагаемая конструкция позволяет проектировать сооружения с заданными параметрами предельных состояний, а также сценарий накопления повреждений в сооружении при сейсмических воздействиях [8].

Расчетный анализ работы ФПС при землетрясении

Рис. 3 иллюстрирует работу устройства при МРЗ. На нем представлены расчетные зависимости от времени ускорений и смещений элементов моста при землетрясении.

В верхней части рис. 3 показана расчетная акселерограмма, имеющая ускорения около 2,2 м/с^2. По своим энергетическим характеристикам и пиковым ускорениям в диапазоне частот около 1 с акселерограмма описывает 9-балльное землетрясение. При этом смещение пролетного строения составило более 12 см, однако смещение верха опор оказалось менее 1 см. Интерес представляет диаграмма чередования состояний системы. При значении 1 на диаграмме ФПС закрыто и система работает упруго. При значении 0 на диаграмме ФПС открыто и пролетное строение скользит относительно опоры. В рассмотренном примере проскальзывание возникает практически сразу после начала воздействия, а максимальный сдвиг достигает 11 см. На рис. 3 выделе-

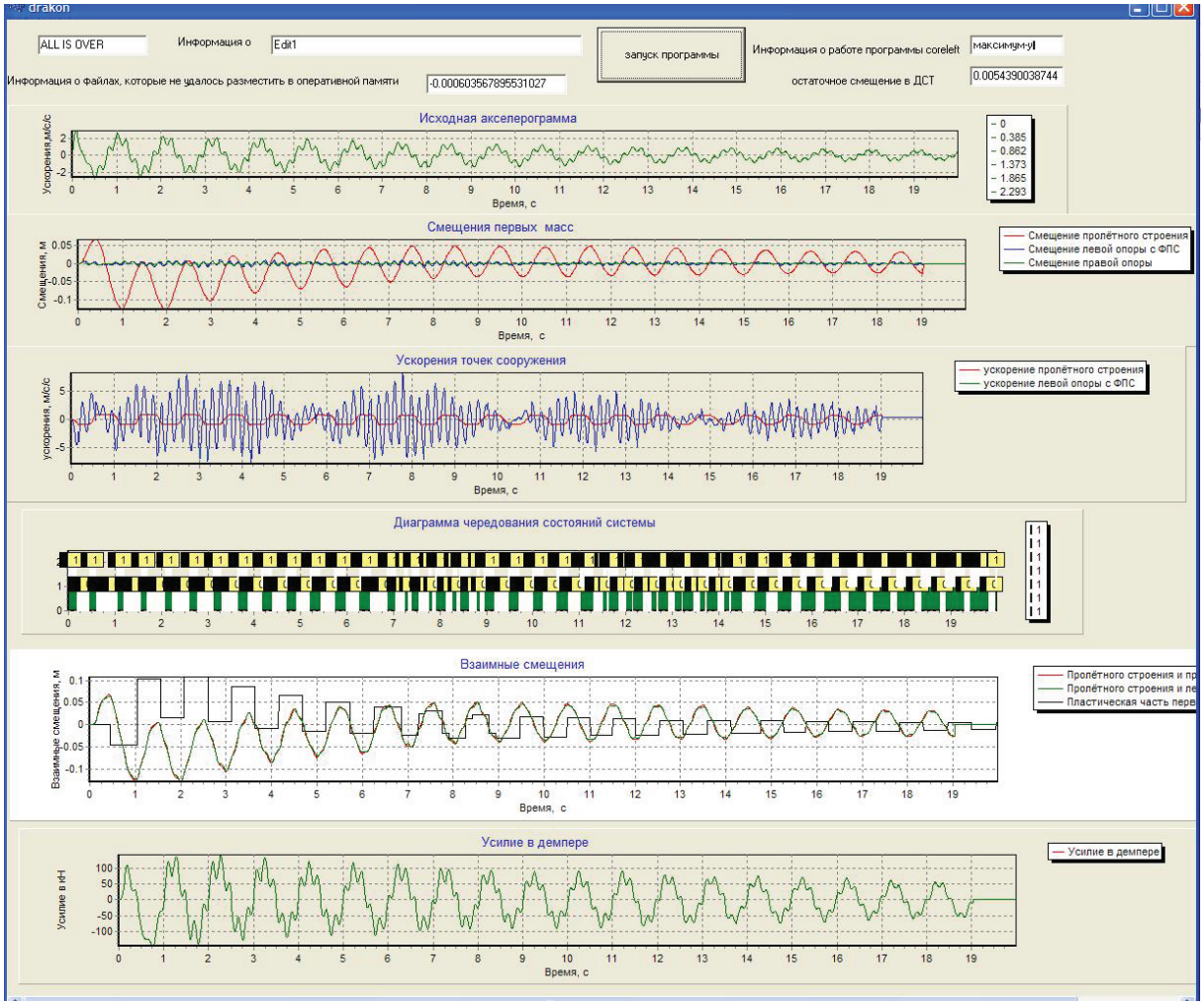


Рис. 3. Результаты расчета сейсмоизолированного моста на действие МРЗ

но полное (упругое и пластическое) смещение пролетного строения. Хорошо видно, что при МРЗ пластические смещения в ФПС превалируют над упругими смещениями за счет деформации столика.

В нижней части рис. 3 приведены усилия в демпфере. Пиковые значения усилий достигают 180 кН. Это составляет примерно 15 % от сейсмической нагрузки.

Принятая концепция проектирования обеспечивает сохранность опор и отсутствие сброса пролетного строения при любых расчетных землетрясениях. Конструкция опорных устройств обеспечивает один вид повреждений – подвижки в ФПС, соединяющих опору с пролетным строением. Сценарий накопления повреждений (рост подвижки) представлен в таблице.

Заключение

В заключение отметим, что по предлагаемой методике и с использованием предлагаемых технических решений сейсмозащитных устройств в Сочи построено более 100 мостовых опор. Применение этих устройств позволяет на 40–70 % снизить расчетную нагрузку на опоры и обеспечить прогнозируемые и легко поддающиеся ремонту повреждения мостов при редких разрушительных землетрясениях.

На рис. 4, 5 представлены мосты с фрагментами сейсмозащиты в г. Сочи. Предлагаемые и уже реализованные устройства обеспечивают сейсмозащиту моста как при проектных, так и при максимальных расчетных землетрясениях. При этом прогнозируется ха-

Пример сценария накопления повреждений для одной из эстакад железнодорожной линии Адлер – Сочи

Показатель	Значение			
Сила землетрясения, балл	5–6	7	8	9
Ориентировочная повторяемость, год	20	200	500	1000
Ускорение, м/с^2	0,35	1,09	1,61	2,398
Подвижка, см	0,1	1,6	6,3	12,5
Число подвижек за время землетрясения	2	23	35	38

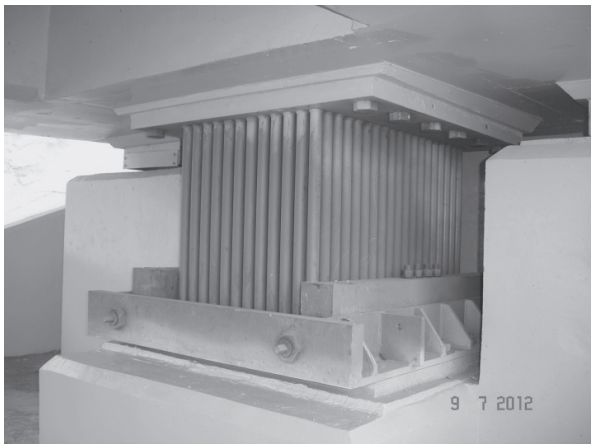


Рис. 4. Стержневой амортизатор с ФПС, установленный на железнодорожном мосту через р. Мзымта в районе в г. Сочи

Рис. 5. Стержневые амортизаторы с ФПС на одной из железнодорожных эстакад в г. Сочи

рактер накопления повреждений в конструкции и обеспечивается ее ремонтопригодность после разрушительных землетрясений. Это пока единственная в мире система сейсмозащиты, которая обеспечивает нормальную эксплуатацию моста, не приводя к расстройству пути при эксплуатационных нагрузках и проектных землетрясениях.

Таким образом, применение ФПС позволило реализовать новую систему сейсмозащиты железнодорожных мостов, которая обеспечивает снижение сейсмических нагрузок при ПЗ и МРЗ и нормальную эксплуатацию сооружения.

Библиографический список

1. Азаев Т. М. Оценка сейсмостойкости мостов по условию сброса пролетных строений с опор / Т. М. Азаев, И. О. Кузнецова, А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – Вып. 1. С. 38–42.

2. Белаш Т. А. Сейсмоизоляция. Современное состояние / Т. А. Белаш, В. С. Беляев, А. М. Уздин и др. // Избранные статьи профессора О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на IV Савиновские чтения. – СПб. : Ленинград. Промстройпроект, 2004. – С. 95–128.

3. Березанцева Е. В. Фрикционно-подвижные соединения на высокопрочных болтах / Е. В. Березанцева, Е. В. Сахарова, А. Ю. Симкин, А. М. Уздин // Междунар. коллоквиум : Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных конструкциях. Т. 1. – М., 1989. – С. 73–76.

4. Деркачев А. А. Исследование свойств стержневых конструкций с упруго-фрикционными соединениями на высокопрочных болтах / А. А. Деркачев, В. С. Давыдов, С. И. Клигерман // Сейсмостойкое строительство. – 1981. – Вып. 3. – С. 7–10.

5. Евдокимов В. В. Несущая способность сдвигоустойчивых соединений с увеличенными отверстиями под высокопрочные болты / В. В. Евдокимов, В. М. Бабушкин // Междунар. коллоквиум : Болтовые и специальные монтажные соединения в стальных конструкциях. Т. 1. – М., 1989. – С. 77–80.

6. Елисеев О. Н. Элементы теории трения, расчет и технология применения фрикционно-подвижных соединений / О. Н. Елисеев, И. О. Кузнецова, А. А. Никитин и др. – СПб. : ВИТУ, 2001. – 75 с.

7. Килимник Л. Ш. О проектировании сейсмостойких зданий и сооружений с заданными параметрами предельных состояний / Л. Ш. Килимник // Строительная механика и расчет сооружений. – 1975. – № 2. – С. 40–44.

8. Кузнецова И. О. Сейсмоизоляция – способ проектирования сооружений с заданными параметрами предельных состояний и сценариев накопления повреждений / И. О. Кузнецова, Ван Хайбинь, А. М. Уздин, С. А. Шульман // Избранные статьи проф. О. А. Савинова и ключевые доклады, представленные на VI Савиновские чтения. – СПб., 2010. – С. 105–120.

9. Савельев В. Н., Уздин А. М., Хусид Р. Г. Болтовое соединение. А. с. СССР № 1168755, МКИ F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

10. Савельев В. Н., Уздин А. М., Хусид Р. Г. Болтовое соединение плоских деталей встык. А. с. СССР № 1174616, МКИ F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

11. Савельев В. Н. Особенности работы соединений на высокопрочных болтах на знакопеременные нагрузки типа сейсмических / В. Н. Савельев, А. Ю. Симкин // Сейсмостойкое строительство. – 1985. – Вып. 10. – С. 20–24.

12. Савельев В. Н., Уздин А. М., Хусид Р. Г., Кистерский С. В. Способ соединения листов в пакет. А. с. СССР № 1184981, МКИ F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

13. Уздин А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. пособие / А. М. Уздин, С. В. Елизаров, Т. А. Белаш. – М. : УМЦ ЖДТ, 2012. – 500 с.

14. Hashem A. M. The use of the friction-movable braces for designing the seismic proof structures with predetermined parameters of ultimate conditions / A. M. Hashem, A. M. Uzdin // 11-th World Conf. Earthquake Eng. Paper 51.

15. Kostarev V. V. Providing the earthquake stability and Increasing the reliability and resources of pipelines using viscous dampers / V. V. Kostarev, L. Yu. Pavlov, A. M. Schukin, A. M. Berkovsky // Proc. Workshop „Bridges seismic isolation and large-scale modeling“, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. – P. 59–70.

References

1. Azayev T. M., Kuznetsova I. O. & Uzdin A. M. *Seismostoykoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy – Seismic-Resistant Construction. Structure Safety*, 2003, Is. 1, pp. 38-42.

2. Belash T.A., Belyayev V.S., Uzdin A.M., Yermoshin A.A. & Kuznetsova I.O. Seismoizolyatsiya. Sovremennoye sostoyaniye [Seismic Isolation. Modern Condition]. *Izbrannyye stati professora O.A. Savinova i klyuchevyye doklady, predstavlennyye na IV Savinovskiye chteniya [Selected Articles by Professor O.A. Savinov and Key Reports Presented at the 4th Savinov Readings*]. St. Petersburg, Leningradskiy Promstroyproyekt, 2004. Pp. 95-128.

3. Berezantseva Ye.V., Sakharova Ye.V., Simkin A.Yu. & Uzdin A.M. Friktsionno-podvizhnyye soyedineniya na vysokoprochnykh boltakh [Frictional Dynamic Connections with High-Strength Bolts]. *Mezhdunarodnyy kollokvium: Boltovyye i spetsialnyye montazhnyye soyedineniya v stalnykh konstruktsiyakh [International Colloquim: Bolt and Special On-Site Connections in Steelwork]*. Vol. 1. Moscow, 1989. Pp. 73-76.

4. Derkachev A.A., Davydov V.S. & Kligerman S.I. *Seismostoykoye stroitelstvo – Seismic-Resistant Construction*, 1981, Is. 3, pp. 7-10.

5. Yevdokimov V.V. & Babushkin V.M. Nesushchaya sposobnost sdvigoustoychivykh soyedineniy s uvelichennymi otverstiyami pod vysokoprochnyye bolty [Bearing Capacity of Shear-Resisting Connections with Increased Openings for High-Strength Bolts]. *Mezhdunarodnyy kollokvium: Boltovyye i spetsialnyye montazhnyye soyedineniya v stalnykh konstruktsiyakh [International Colloquim: Bolt and Special On-Site Connections in Steelwork]*. Vol. 1. Moscow, 1989. Pp. 77-80.

6. Yeliseyev O.N., Kuznetsova I.O., Nikitin A.A., Pavlov V.Ye., Simkin A.Yu. & Uzdin A.M. Elementy teorii treniya, raschet i tekhnologiya primeneniya friktsionno-podvizhnykh soyedineniy [Elements of Friction Theory, Calculation and Technology for Application of Frictional Dynamic Connections]. St. Petersburg, VITU, 2001. 75 p.

7. Kilimnik L.Sh. *Stroitelnaya mekhanika i raschet sooruzhenoiy – Construction Mechanics and Structure Calculation*, 1975, no. 2, pp. 40-44.

8. Kuznetsova I.O., Van Khaybin, Uzdin A.M. & Shulman S.A. Seismoizolyatsiya – sposob proyektirovaniya sooruzheniy s zadannymi parametrami predelnykh sostoyaniy i stsenariyev nakopleniya povrezhdeniy [Seismic Isolation as a Method for Designing Structures with Set Parameters of Limit States and Damage Accumulation Scenarios]. *Izbrannyye stati professora O.A. Savinova i klyuchevyye doklady, predstavlennyye na VI Savinovskiye chteniya [Selected Articles by Professor O.A. Savinov and Key Reports Presented at the 6th Savinov Readings*]. St. Petersburg, 2010. Pp. 105-120.

9. Savelyev V.N., Uzdin A.M. & Khusid R.G. Boltovoye soyedineniye [Bolt Connection]. Invention Certificate A.S. SSSR N 1168755, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

10. Savelyev V.N., Uzdin A.M. & Khusid R.G. Boltovoye soyedineniye ploskikh detaley vstyk [Butt-to-Butt Bolt Connection of Flat Parts]. Invention Certificate A.S. SSSR N 1174616, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

11. Savelyev V.N. & Simkin A.Yu. *Seismostoykoye stroitelstvo – Seismic-Resistant Construction*, 1985, Is.10, pp. 20-24.

12. Savelyev V.N., Uzdin A.M., Khusid R.G. & Kisterskiy S.V. Sposob soyedineniya listov v paket [Method for Connecting Plates into Piles]. Invention Certificate A.S. SSSR N 1184981, MKI F 16 B 5/02, 35/04, 1983.

13. Uzdin A.M., Yelizarov S.V. & Belash T.A. Seismostoykiye konstruktsii transportnykh zdaniy i sooruzheniy : uchebnoye posobiye [Seismic-Resistant Designs for Transport Buildings and Structures : Course Guide]. Moscow, UMTs ZhDT, 2012. 500 p.

14. Hashem A.M. & Uzdin A.M. The use of the friction-movable braces for designing the seismic proof structures with predetermined parameters of ultimate conditions. *11th World Conf. Earthquake Eng*. Paper 51.

15. Kostarev V.V., Pavlov L.Yu., Schukin A.M. & Berkovsky A.M. Providing the earthquake stability and Increasing the reliability and resources of pipelines using viscous dampers. *Proc. Workshop "Bridges seismic isolation and large-scale modeling"*, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. St. Petersburg, 2010. Pp. 59-70.

*КУЗНЕЦОВА Инна Олеговна – канд. техн. наук, доцент, i-kuznetsova@mail.ru; ВАНИЧЕВА Светлана Сергеевна – начальник отдела (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ФРЕЗЕ Максим Владимирович – канд. техн. наук; ДОЛГАЯ Анжелика Александровна – канд. техн. наук, инженер-проектировщик (ОАО «Трансмост»); АЗАЕВ Тагир Магомедович – канд. техн. наук; ЗАЙНУЛАБИДОВА Ханзада Рауповна – канд. техн. наук (Дагестанский государственный технический университет).

УДК 629.463.32

В. И. Моисеев, Т. А. Комарова, А. В. Жебанов

ПРОБЛЕМА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК ЛЕТНИХ МАРОК ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ВОЗДУХА

Дата поступления: 08.07.2016
Решение о публикации: 30.09.2016

Цель: Теоретически проработать вопрос о возможности перевозки дизельного топлива летних сортов при низких температурах воздуха наличным подвижным составом, поскольку за время транспортирования топливо охлаждается до температур, при которых начинается физико-химическая реакция их фазового расслоения. **Методы:** Использованы математические методы расчета коэффициента теплоотдачи, тепловых и гидродинамических процессов. **Результаты:** Расчеты тепловых и гидродинамических процессов в окрестностях теплового аккумулятора обобщены рабочими формулами для коэффициента теплоотдачи с поверхности аккумулятора жидкому нефтепродукту. По результатам расчета предложено установить в цистернах тепловые аккумуляторы, возбуждающие термогравитационную конвекцию в массе жидкого нефтепродукта. **Практическая значимость:** Благодаря предложенным изменениям в конструкции цистерн с непрерывным перемешиванием и подогревом перевозимого топлива за счет установки теплового аккумулятора, возбуждающего термогравитационную конвекцию в массе жидкого нефтепродукта, появится возможность перевозить летнее дизельное топливо в зимнее время наличным подвижным составом.

Дизельное топливо, летний сорт, низкая температура, фазовое расслоение, термогравитационная конвекция, тепловой аккумулятор, вагон-цистерна.

***Vladimir I. Moiseyev**, D. Sci. (Eng.), professor, moiseev_v_i@list.ru (Petersburg State Transport University); **Tatyana A. Komarova**, Cand. Sci. (Eng.), lead researcher, komarova_tanusha@mail.ru (Scientific and implementational centre Disperse Systems); **Aleksandr V. Zhebanov**, senior lecturer, zhebanov@inbox.ru (Samara State Transport University) PROBLEM OF RAIL TRANSPORTATION OF SUMMER GRADES OF DIESEL FUEL IN LOW AIR TEMPERATURES

Objective: Theoretically consider the issue of possible transportation of summer-grade diesel fuel in low air temperatures by existing rolling stock, as during transportation the fuel cools down to temperatures under which physicochemical reaction of its phase separation starts. **Methods:** Mathematical methods for calculating heat emission coefficient, thermal and hydrodynamic processes were applied. **Results:** Calculations of thermal and hydrodynamic processes in the vicinity of thermal accumulator are combined by working formulae for heat emission coefficieny from the accumulator surface for liquid oil product. As a result of calculations, it is proposed to install in the tanks thermal accumulators which stimulate heat-gravitational convection of hydrocarbon oils. **Practical importance:** Thanks to the proposed amendments to the design of tanks with continual stirring and heating of the transported fuel by installing a heating accumulator which stimulates heat-gravitational convection of hydrocarbon oils, it would be possible to transport summer-grade diesel fuel in wintertime by existing rolling stock.

Diesel fuel, summer grade, low temperature, phase separation, heat-gravitational convection, thermal accumulator, tank car.

Проблемы доставки летнего дизельного топлива в зимнее время

Известно, что тяжелая колесная и гусеничная техника, тепловозы и суда используют дизельное топливо (ДТ). Для их нормальной работы необходимо, чтобы топливо свободно прокачивалось в топливных системах двигателя и сохраняло эксплуатационные характеристики.

В России возникла устойчивая тенденция к снижению объемов производства марок ДТ «зимнее» и «арктическое», регламентированных ГОСТ 305-2013 [4]. По условиям изготовления они требуют снижения температуры кипения дизельных фракций и депарафинизации сырья, что уменьшает выход продукта на 30–40 % от его потенциального содержания в нефти и делает производство нерентабельным. При общем росте выпуска летних сортов ДТ производство зимних марок сократилось более чем в три раза по сравнению с 2003 г. и уже не удовлетворяет запросам даже силовых ведомств по этим видам топлива.

Хранение летнего ДТ на обогреваемых складах и даже его эксплуатация на отдельных объектах в зимнее время допустимы, но его перевозка по железной дороге запрещена нормативными документами.

Все светлые нефтепродукты доставляют в цистернах, не имеющих тепловой изоляции котла, и зимой при длительных перевозках они могут охладиться до температур ниже –10 °С. Охлаждение летнего ДТ сопровождается фазовым расслоением и выделением кристаллов парафиновых углеводородов (н-алканов), содержание которых в топливе достигает 15–20 %. При повторном нагревании эта твердая фракция вторично в топливе не растворяется [11], и баланс содержащихся в нем присадок нарушается. Длительное охлаждение летнего ДТ при температурах ниже –10 °С вызывает его застывание с образованием осадков из парафина, накапливающихся в нижней части котла цистерны. Таким образом, при железнодорожных перевозках летнее ДТ снижает свои эксплуатационные характеристики вплоть до потери кондиционности, что и обусловливает запрет на его перевозку в зимний период. Этот запрет затрудняет обеспечение техникой промышленности, транспорта и строительства на севере страны и снабжение топливом вооруженных сил.

Необходимо разработать подвижной состав для перевозки летнего ДТ при низких температурах воздуха, при этом надо учитывать процессы, происходящие в самих жидких нефтепродуктах: охлаждение горячего топлива, рост его вязкости, фазовые превращения и термогравитационную конвекцию (ТГК), поскольку все нефтепродукты имеют большой коэффициент объемного теплового расширения ($\beta \approx 10^{-3}$ 1/град) [8].

ТГК в топливе, замедляющая образование кристаллов н-парафинов и выпадение их в осадок стимулируется установкой в цистерне тепловых аккумуляторов (ТА), заполненных теплоаккумулирующим материалом (ТАМ). Материал характеризуется большим удельным теплосодержанием ξ Дж/кг, обеспечиваемым фазовыми превращениями «плавление – затвердевание», происходящими при температурах $T_ф$, °С.

Рассмотрим вариант, когда аккумулятор выполнен в виде двух стальных цилиндрических труб диаметром 250 мм, установленных параллельно оси котла цистерны на высоте 0,3 м от его нижней поверхности. При расстоянии между осями труб 1 м сливной патрубок располагается между ними.

Если температура фазового перехода ТАМ выше начальной температуры нефтепродукта $T_ф > T_0$, аккумулятор разогревается до температур, не вызывающих кипения нефтегруза, которая у ДТ превышает +300 °С.

В качестве ТАМ можно использовать [11]:

• твердый парафин (ξ = 210 кДж/кг, $T_ф$ = = +87 °С);

• солевую смесь Локка $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ (50 %) + $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ (45 %) + $CaCl_2$ (1,5 %) + + глицерин (3,5 %) (ξ = 3120 кДж/кг, $T_ф$ = = +60 °С);

• солевые смеси типа $7NaNO_3 + 40NaNO_2 + 53KNO_3$ (ξ = 815 кДж/кг, $T_ф$ = +142 °С).

Закон изменения средней температуры нефтегруза в цистерне, $\overline{T}_ж$, движущейся при температуре воздуха T_g в течение времени t выражается через темп её охлаждения m, 1/с [1]:

$$\Theta^* = \left(\frac{\overline{T}_ж - T_g}{T_0 - T_g}\right) = e^{-mt}. \quad (1)$$

Темп охлаждения определяется площадью теплоотдающей поверхности $F_ц$ стального котла, м^2, коэффициентом теплопередачи в окружающее пространство $k_ц$, Вт/м^2 °С, и полной теплоемкостью C цистерны вместе с жидким нефтегрузом:

$$m_ц = \frac{k_ц F_ц}{C} = \frac{k_ц F_ц}{M_ж C_ж + M_{ст} C_{ст}} \approx \frac{k_ц F_ц}{M_ж C_ж}, \quad (2)$$

где $M_ж$ и $M_{ст}$ – соответственно, масса нефтегруза и корпуса котла, кг; $C_ж$ и $C_{ст}$ – удельная теплоемкость нефтепродукта и стали, соответственно, Дж/кг °С.

Для цистерны с ТА можно ввести «эквивалентную теплоемкость» [5]:

$$C_{экв} = M_{ст} C_{ст} + M_ж C_ж + \frac{\xi_0 M_{ТАМ}}{\tilde{T}_{ТАМ} - T_ф}, \quad (3)$$

где $M_{ТАМ}$ – масса ТАМ в аккумуляторе; $\tilde{T}_{ТАМ}$ – начальная температура ТАМ, ξ_0 – функция, определяемая равенством

$$\xi_0 = \begin{cases} \xi & \text{при } \tilde{T}_{ТАМ} > T_Ф \\ 0 & \text{при } \tilde{T}_{ТАМ} \le T_Ф \end{cases}.$$

Темп охлаждения нефтегруза в цистерне с ТА будет

$$m_1 = \frac{k_ц F_ц}{C_{экв}}. \quad (4)$$

Пренебрегая теплоемкостью обечайки котла из (2)–(4), получим отношение темпов охлаждения ДТ в цистерне с аккумулятором и без него:

$$\frac{m_{ц.т.а}}{m_ц} = \frac{1}{1 + \dfrac{\xi \cdot M_{ТАМ}}{(\tilde{T}_{ТАМ} - T_Ф) C_ж}}. \quad (5)$$

Пусть в цистерне, содержащей 60 т ДТ ($C_ж$ = 2,1 кДж/кг), установлен ТА, содержащий 2 т ТАМ ($M_{ТАМ}$ = 2000 кг) на основе смеси Локка. Исходя из характеристик этой смеси, получаем, согласно (5), $m_ц = 1{,}588 m_{ц.т.а}$. Из (1) следует, что время охлаждения нефтегруза t от начальной температуры до допустимого значения, равного 0 °С, возрастает в 1,588 раза.

Также можно снизить темп охлаждения летнего ДТ при перевозке в цистерне, уменьшив коэффициент теплопередачи $k_ц$ от горячего нефтегруза в окружающее пространство. Для этого на котел цистерны можно нанести временную теплоизолирующую оболочку, рассчитанную на сезонную эксплуатацию в один зимний период [6].

Учитывая большой диаметр котла, примем малый участок его поверхности за двухслойную плоскую стенку. Значение коэффициента теплопередачи для такой стенки будет

$$k_ц = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \dfrac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \dfrac{1}{\alpha_ж}},$$

где $\alpha_в$ и $\alpha_ж$ – коэффициенты теплоотдачи от стенки котла к наружному воздуху и от жидкости внутри котла к его стенке, соответственно, Вт/м^2 град; $\delta_{ст}$ и $\delta_{из}$ – толщина стальной стенки котла и слоя тепловой изоляции, соответственно, м; $\lambda_{ст}$ и $\lambda_{из}$ – коэффициенты теплопроводности стали и изоляции, соответственно, Вт/м °С.

Коэффициенты теплопередачи через стенку котла в отсутствие и при наличии на ней теплоизолирующей оболочки, соответственно, равны:

$$k_ц = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \dfrac{1}{\alpha_ж}}; \quad (6)$$

$$k_{ц.т.и} \approx \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_в} + \dfrac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \dfrac{1}{\alpha_ж}}. \quad (7)$$

Примем, что у стальной обечайки котла $\lambda_{ст}$ = 40 Вт/м^2 град, $\delta_{ст} = 10^{-2}$ м, временная те-

плоизолирующая оболочка имеет толщину $\delta_{из} = 0{,}02$ м и выполнена из пенополиуретана $\lambda_{из} = 0{,}025$ Вт/м °С, наносимого напылением на поверхность котла в условиях депо. Такой вариант оболочки отличается простотой и низкой себестоимостью изготовления, малыми трудозатратами и не требует специального оборудования [7]. Ориентировочная стоимость создания оболочки на одну цистерну 30–50 тыс. руб.

По мере износа оболочка легко удаляется скребком и смывкой.

При коэффициентах теплоотдачи $\alpha_в = 40$ Вт/м^2 град и $\alpha_ж = 5$ Вт/м^2 град из формул (6) и (7) находим:

$$k_ц = 4{,}5 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}; \; k_{ц.т.и} = 0{,}8 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}.$$

Из (2) следует, что отношение темпов охлаждения нефтегруза в цистерне без оболочки $m_ц$ и с оболочкой $m_{ц.т.и}$ равно

$$\frac{m_ц}{m_{ц.т.и}} = \frac{k_ц}{k_{ц.т.и}} = 5{,}6.$$

Соответственно, и время охлаждения ДТ от начальной температуры налива до 0 °С возрастает в 5,6 раза.

Тепловые аккумуляторы вводятся в конструкцию котла цистерны, а тонкая тепловая изоляция наносится с наступлением зимнего периода и снимается по мере необходимости.

Создание термогравитационной конвекции в жидком нефтепродукте тепловыми аккумуляторами

Остается важный вопрос об отдаче теплоты от нагретого аккумулятора к движущейся жидкости в условиях установившейся ТГК. Известны многочисленные экспериментальные исследования теплообмена такого рода, но теоретическая проработка вопроса еще не завершена.

Ожидается, что сравнительно низкая избыточная температура поверхности ТА относительно жидкости возбудит её медленное течение, близкое к ползущему, характеризуемому малыми числами Рейнольдса. В этом режиме силы инерции, пропорциональные квадрату скорости жидкости u^2, считаются пренебрежимо малыми по сравнению с силами трения, пропорциональными первой степени скорости u.

Ползущее движение жидкости охватывает всю поверхность ТА и имеет свойства, характерные для ламинарного пограничного слоя толщиной δ, в котором перенос теплоты происходит за счет теплопроводности.

Введем систему координат, где ось x направлена вертикально вверх, а ось y – горизонтально. Рассмотрим установившееся течение, в котором составляющие скорости u_x и u_y не меняются со временем:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0; \; \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0.$$

Величина δ является неопределенной, так как в пограничном слое скорость u_x изменяется от нуля на поверхности тела до скорости U вдали от неё. Жидкость вдали от ТА движется из-за колебаний вагона, его ускорения и торможения, но далее мы пренебрегаем этими движениями жидкости. Толщину пограничного слоя считаем изменяющейся по течению потока $\delta = \delta(x)$. Введем в рассмотрение безразмерные величины:

• Θ – температурный параметр, определяемый температурой среды внутри пограничного слоя T, за его пределами T_0 и стенки цилиндра T_w, °С,

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}; \qquad (8)$$

• координату точки внутри пограничного слоя

$$\eta = \frac{y}{\delta}; \qquad (9)$$

• критерии Грасгофа Gr_D и Прандтля Pr, которые определяются значениями диаметра D аккумулятора, ускорения свободного падения

g, м/с^2, и параметрами жидкости – коэффициентами объемного теплового расширения β, 1/град, кинематической вязкости ν, м^2/с, и температуропроводности a, м^2/с:

$$Gr_D = \frac{g\beta D^3 (T_w - T_0)}{\nu^2}; \qquad (10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \qquad (11)$$

Уравнения движения, неразрывности и теплопереноса, описывающие ТГК жидкости, в теории пограничного слоя имеют вид [9, 10]

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + Gr_D \cdot \Theta; \qquad (12)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0; \qquad (13)$$

$$u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \qquad (14)$$

Система уравнений (12)–(14) рассматривается с условиями:

$$u_y\Big|_{y=0} = 0;\ \frac{\partial u_x}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0;\ \Theta\Big|_{y=0} = 1; \qquad (15)$$

$$u_x\Big|_{y=\delta} = U(x) \approx 0;\ \Theta\Big|_{y=\delta} = 0;$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y}\Big|_{y=\delta} = 0. \qquad (16)$$

Интегральные соотношения, описывающие пограничный слой, получаем, умножая (10) на u_x и интегрируя это выражение по y в пределах толщины пограничного слоя:

$$\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy + \int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy = \\ = \int_0^\delta u_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} dy + \mathrm{Gr_D} \int_0^\delta u_x \Theta dy. \qquad (17)$$

Используя (13), (15) и (16), вычисляем каждый интеграл методом интегрирования по частям:

$$\int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy = \frac{1}{2}\int_0^\delta u_y \frac{\partial u_x^2}{\partial y} dy = \\ = \frac{U^2 u_y(x,\delta)}{2} - \frac{1}{2}\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_y}{\partial y} dy = \\ = \frac{U^2 u_y(x,\delta)}{2} + \frac{1}{2}\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy;$$

$$\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy + \int_0^\delta u_y u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} dy = \\ = \frac{U^2}{2}\left[U \frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d}{dx}\int_0^\delta u_x dy \right] + \frac{3}{2} \cdot \int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy.$$

Очевидно, что

$$\int_0^\delta u_x^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} dy = \frac{1}{3}\int_0^\delta \frac{\partial u_x^3}{\partial x} dy = \\ = \frac{d}{dx}\int_0^\delta \frac{u_x^3}{3} dy - \frac{U^3}{3}\frac{d\delta(x)}{dx}.$$

Использование краевых условий (15) дает

$$\int_0^\delta u_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} dy = -\int_0^\delta \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 dy.$$

Подставляя полученные результаты в (17), сводим это уравнение к виду

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dx}\int_0^\delta u_x^3 dy = -\int_0^\delta \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^3 dy + Gr_D \int_0^\delta u_x \Theta dy. \qquad (18)$$

Теперь преобразуем левую часть уравнения теплопереноса (14). Формально введем скорости под знак производных, выполним дифференцирование и, используя выражение (8), получим

$$\frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} = \left[u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] + \\ + \Theta \left[\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right] = u_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}.$$

При этом равенство (14) запишется таким образом:

$$\frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} + \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} = \frac{1}{Pr} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2}. \qquad (19)$$

Умножаем (19) на dy и интегрируем в пределах толщины пограничного слоя:

$$\int_0^\delta \frac{\partial \Theta u_x}{\partial x} dy + \int_0^\delta \frac{\partial \Theta u_y}{\partial y} dy = \frac{1}{Pr}\int_0^\delta \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} dy.$$

Вычисляя каждый интеграл в отдельности и учитывая граничные условия (16), получим уравнение теплового потока через пограничный слой [13]:

$$\frac{d}{dx}\int_0^\delta \Theta u_x dy = -\frac{1}{Pr}\frac{\partial \Theta}{\partial y}\bigg|_{y=0}. \qquad (20)$$

Подобные друг другу поля скоростей и температур в пограничном слое описываются уравнениями второй степени [1]:

$$u_x(x) = w(x)(1-\eta^2); \qquad (21)$$

$$\Theta = (1-\eta)^2, \qquad (22)$$

где $w(x)$ – функция, подлежащая определению. Подставляя (14) и (15) в интегральные соотношения (18) и (20), находим:

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dx}\left[w^3\delta\int_0^1 (1-\eta^2)^3 d\eta\right] =$$

$$= -\frac{w^2}{\delta}\int_0^1 \left[\frac{\partial}{\partial \eta}(1-\eta^2)\right]^2 d\eta +$$

$$+ Gr_D \cdot w \cdot \delta \int_0^1 (1-\eta^2)(1-\eta)^2 d\eta;$$

$$\frac{d}{dx}\left[w\cdot\delta\int_0^1 (1-\eta^2)(1-\eta)^2 d\eta\right] = \frac{2}{Pr\cdot\delta}.$$

Раскрываем скобки и выполняем интегрирование:

$$\frac{8}{35}\frac{d}{dx}(w^3\delta) = -\frac{4}{3}\frac{w^2}{\delta} + \frac{3}{10}Gr_D \cdot w \cdot \delta; \qquad (23)$$

$$\frac{3}{10}\frac{d}{dx}(w\delta) = \frac{2}{Pr}\cdot\frac{1}{\delta}. \qquad (24)$$

Ищем решения уравнений (23) и (24) в виде показательных функций с неизвестными коэффициентами и показателями степеней:

$$w(x) = C_1 x^m; \;\; \delta = \delta(x) = C_2 x^n. \qquad (25)$$

Подстановка (25) в уравнения (22) и (23) дает:

$$\frac{8}{35}(3m+n)C_1^3 C_2 x^{3m+n-1} = \\ = -\frac{4}{3}\frac{C_1^2}{C_2}x^{2m-n} + \frac{3}{10}Gr_D C_1 C_2 x^{m+n}; \qquad (26)$$

$$\frac{3}{10}C_1 C_2 (m+n)x^{m+n-1} = \frac{1}{\mathrm{Pr}}\cdot\frac{x^{-n}}{C_2}. \qquad (27)$$

Функции (25) считаются решениями рассматриваемой системы. Тогда выражения (26) и (27) должны выполняться при любых x, а для этого нужно, чтобы показатели степеней x в каждом слагаемом были одинаковы:

$$3m+n-1 = 2m-n;$$

$$2m-n = m+n;$$

$$m+n-1 = -n.$$

Отсюда легко найти, что $m = 1/2$, а $n = 1/4$. Подставляя найденные значения m и n в равенства (26) и (27), вторично получаем систему уравнений с неизвестными коэффициентами C_1 и C_2:

$$12C_1^2C_2^2 = -40C_1 + 9Gr_D C_2^2; \; 9C_1C_2^2 = \frac{20}{Pr}.$$

Из этой системы находим численные значения коэффициентов:

$$C_1 = \sqrt{2Gr_D}\cdot(2,67+Pr)^{-\frac{1}{2}};$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{113}{18}}(2,67+Pr)^{\frac{1}{4}}Pr^{-\frac{1}{2}}(Gr_D)^{-\frac{1}{4}}.$$

Значения критерия Прандтля (11) для ДТ при температурах –30…0 °С составляют Pr = 140–70. При этом первое слагаемое в скобках у полученных равенств пренебрежимо меньше второго. Эти равенства запишем так [12, 15]:

$$C_1 = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}}\,;\; C_2 = 2,5(Gr_D \cdot Pr)^{-1/4}.$$

Совместное влияние критериев Грасгофа (10) и Прандтля (11) для жидкостей с $Pr > 1$ выражают в виде числа Релея $Ra_D = Gr_D \cdot Pr$, оно удобно при описании процессов, связанных с ТГК в ограниченном объеме:

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr = \frac{g\beta(T_w - T_0)D^3}{\nu \cdot a}.$$

Подставляя значения m, n, C_1 и C_2 в равенства (20), получаем:

$$w(x) = C_1 x^m = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}}\,x\,; \qquad (28)$$

$$\delta(x) = C_2 x^n = 2,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{x}{Ra_D}}\,. \qquad (29)$$

Из (28) и (21) находим функцию, характеризующую распределение составляющей скорости u_x в пограничном слое в направлении течения:

$$u_x(x) = \sqrt{\frac{2Gr_D}{Pr}}(1-\eta^2)\cdot\sqrt{x}.$$

Тепловой баланс на поверхности нагретого цилиндра диаметром D находят из известного соотношения, определяющего граничные условия третьего рода, называемые также уравнением теплоотдачи:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{T_w - T_0}\left(\frac{dT}{dn}\right)_{n\to 0}, \qquad (30)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагретого тела в жидкой среде, Вт/м^2 °С; λ – коэффициент теплопроводности этой среды, Вт/м °С;

Используя равенства (8) и (9), перепишем (30) так:

$$\alpha(T_w - T_0) = \\ = -\lambda\frac{T_w - T_0}{D}\int_0^D\left(\frac{\partial\Theta}{\partial\eta}\cdot\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)_{y\to 0}dx\,. \qquad (31)$$

При этом из (22) и (9) следует, что

$$\left(\frac{\partial\Theta}{\partial\eta}\right)_{y\to 0} = \left(\frac{\partial\Theta}{\partial\eta}\right)_{\eta\to 0} = 2(1-\eta)_{\eta\to 0} = 2\,;$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial y} = \frac{1}{\delta}\,.$$

Таким образом, равенство (31) принимает вид

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha D_1}{\lambda} = 2\int_0^{D_1}\frac{dx}{\delta}\,. \qquad (32)$$

В левой части равенства записан комплекс, называемый числом Нуссельта – это безразмерный коэффициент теплоотдачи [2].

Верхний предел интегрирования определяется из условий, что в окрестностях нагретого цилиндра существует устойчивый слой, теплота из которого уносится конвекцией [3]. Толщину этого слоя экспериментально определил Ленгмюр (цит. по [8]), который установил, что $D_1 = 0,73$. В результате интегрирования (32) с учетом равенства (29) получаем безразмерный коэффициент теплоотдачи от ТА к нефтегрузу в цистерне:

$$Nu = 0,84(Ra_D)^{1/4}\,.$$

Академик М. А. Михеев, обобщая результаты экспериментов по теплоотдаче горизонтальных и вертикальных труб и плит в ламинарном режиме их обтекания различными жидкостями, получил аналогичную формулу, но с меньшим значением коэффициента:

$$Nu = 0,54(\mathrm{Ra})^{1/4}\,.$$

Тепловой аккумулятор не только разогревает [14], но и вызывает принудительную ТГК дизельного топлива в котле цистерны, которая выравнивает поле температур в нефтегрузе и препятствует его фазовому расслоению. Над ним образуется восходящий шлейф жидкости, непрерывно перемешивающий содержимое котла цистерны. С ростом высоты H от оси

цилиндра безразмерная температура жидкости (8) уменьшается достаточно медленно:

$$\Theta = 0,8\sqrt{\frac{D}{H}}\,.$$

Тепловой аккумулятор, установленный в цистерне, в принципе можно периодически заряжать, например перед операцией слива. Для этого внутри него надо установить трубы малого диаметра и пропускать через них острый пар. Данная операция пожаробезопасна и технически легко осуществима.

Заключение

Установка тепловых аккумуляторов внутри котла цистерны и временной теплоизолирующей оболочки на её наружной поверхности способны обеспечить тепловой режим в массе транспортируемого нефтепродукта, при котором обеспечивается возможность перевозки летних сортов дизельного топлива в зимнее время наличным подвижным составом для светлых нефтепродуктов.

Библиографический список

1. Андриевский А. П. Свободная конвекция при нелинейной зависимости плотности от температуры : плоские задачи / А. П. Андриевский, В. Н. Коровкин // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 2. – С. 381–386.

2. Бахмат Г. В. Хранение нефти и нефтепродуктов / Г. В. Бахмат. – Тюмень : Вектор, 2002. – 536 с.

3. Бронштейн И. С. Об одном приближенном методе решения уравнений пограничного слоя / И. С. Бронштейн, В. Е. Губин // Тр. ВНИИСПТ нефть. – 1971. – Вып. 8. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – С. 100–103.

4. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия.

5. Домбровский Л. А. Модель эффективной теплопроводности для расчета свободно-конвективного теплообмена при больших числах Рэлея / Л. А. Домбровский, Л. И. Зайчик, Ю. А. Зейгарник // Докл. РАН. – 1999. –Т. 366, № 4. – С. 479–482.

6. Жебанов А. В. Взаимодействие теплоизоляционного слоя цистерны с окружающей средой с точки зрения экологической безопасности и с учетом утилизация отходов / А. В. Жебанов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 19–23.

7. Жебанов А. В. Проблема железнодорожных перевозок летних марок дизельных топлив при низких температурах воздуха / А. В. Жебанов, В. И. Моисеев, Т. А. Комарова // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XXI междунар. науч.-технич. конф. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – С. 46–48.

8. Киселев И. Г. Способы и устройства экономии топлива на железнодорожном транспорте / И. Г. Киселев. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1991. – 57 с.

9. Кочин Н. Е. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2 / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – М. : Физматлит,1963. – С. 565–566.

10. Лейбензон Л. С. Энергетическая форма интегрального условия в теории пограничного слоя / Л. С. Лейбензон // Тр. ЦАГИ. – 1935. – Вып. 240.

11. Литвиненко А. Н. Экспериментально-теоретическое исследование зависимостей низкотемпературных свойств летних дизельных топлив и их смесей с топливами для реактивных двигателей и депрессорными присадками / А. Н. Литвиненко и др. // Химмотология горючего и технические средства нефтепродуктообеспечения ; под ред. А. Н. Литвиненко. – Ульяновск : ИП Качалин, 2009. – С. 96–104.

12. Минаковский В. М. Обобщенные переменные теории переноса / В. М. Минаковский. – Киев : Высш. шк., 1978. – 184 с.

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

14. Моисеев В. И. Применение аккумуляторов тепловой энергии на средствах и сооружениях железнодорожного транспорта / В. И. Моисеев и др. // Материалы IV всерос. конф. «Фундаментальные исследования в технических университетах». – СПб. : ГТУ, 2000. – 103 с.

15. Себиси Т. Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Брэдшоу. – М. : Мир, 1987. – 590 с.

References

1. Andriyevskiy A. P. & Korovkin V. N. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2000, T. 73, no. 2, pp 381-386.

2. Bakhmat G. V. Khraneniye nefti i nefteproduktov [Storage of Oil and Oil Products]. Tyumen, Vektor, 2002. 536 p.

3. Bronshteyn I. S. & Gubin V.Ye. Ob odnom priblizhennom metode resheniya uravneniy pogranichnogo sloya [On an Approximative Method of Solution for Boundary Layer Equations]. *Trudy VNIISPTneft – VNIISPTneft Proc.,* 1971. Is. 8. Transport and Storage of Oil and Oil Products, pp. 100-103.

4. State Standard GOST 305-2013. Toplivo dizelnoye. Tekhnicheskiye usloviya [Diesel Fuel. Technical Conditions].

5. Dombrovskiy L. A., Zaychik L. I. & Zeygarnik Yu. A. *Doklady RAN – Reports of the Russian Academy of Sciences*, 1999, Vol. 366, no. 4, pp. 479-482.

6. Zhebanov A. V. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Trans. Bull.*, 2012, no. 4, pp. 19-23.

7. Zhebanov A. V., Moiseyev V. I. & Komarova T. A. Problema zheleznodorozhnykh perevozok letnikh marok dizelnykh topliv pri nizkikh temperaturakh vozdukha [Problem of Rail Transportation of Summer-Grade Diesel Fuels in Low Air Temperatures]. *Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty: materialy XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Rolling STock of the 21st Century: Ideas, Requirements, Projects. Papers of the 21st Int. Sci. and Technical Conf.]*. St. Petersburg, FGBOU VO PRUPS, 2016. Pp. 46-48.

8. Kiselev I. G. Sposoby i ustroystva ekonomii topliva na zheleznodorozhnom transporte [Methods and Devices for Saving Fuel of Rail Transport]. Leningrad, Leningrad Railway Transp. Eng. Inst., 1991. 57 p.

9. Kochin N.Ye., Kibel I. A. & Roze N. V. Teoreticheskaya gidromekhanika [Theoretical Fluid Mechanics]. Pt. 2. Moscow, Fizmatlit, 1963. Pp. 565-566.

10. Leybenzon L. S. Energeticheskaya forma integralnogo usloviya v teorii pogranichnogo sloya [Energy Form of Integral Condition in Boundary Layer Theory]. *Trudy TsAGI [Proc. of TsAGI]*, 1935, Is. 240.

11. Litvinenko A. N. et al. Eksperimentalno-teoreticheskoye issledovaniye zavisimostey nizkotemperaturnykh svoystv letnikh dizelnykh topliv i ikh smesey s toplivami dlya reaktivnykh dvigateley i depressornymi prisadkami [Experimental and Theoretical Study of Dependencies of Low-Temperature Properties of Summer-Grade Diesel Fuels and Their Mixtures with Jet Propulsion Fuels and Depressor Additives]. *Khimmotologiya goryuchego i tekhnicheskiye sredstva nefteproduktoobespecheniya [Chemmotology of Fuel and Technical Means for Oil Products Supply]*; ed. A. N. Litvinenko. Ulyanovsk, IP Kachalin, 2009. Pp. 96-104.

12. Miakovskiy V. M. Obobshchennyye peremennyye teorii perenosa [Generalised Variable Transfer Theories]. Kiev, Vysshaya shkola, 1978. 184 p.

13. Mikheyev M. A. & Mikheyeva I. M. Osnovy teploperedachi [Heat Transfer Principles]. Moscow, Energiya, 1977. 344 p.

14. Moiseyev V. I. et al. Primeneniye akkumulyatorov teplovoy energii na sredstvakh i sooruzheniyakh zheleznodorozhnogo transporta [Application of Thermal Energy Accumulators on Devices and Structures of Rail Transport]. *Materialy IV vserossiyskoy konferentsii Fundamentalnyye issledovaniya v tekhnicheskikh universitetakh [Papers of the 4th All-Russian Conference for Fundamental Studies at Tech. Univ.]*. St. Petersburg, GTU, 2000. 103 p.

15. Sebisi T. & Bredshou P. Konvektivnyy teploobmen [Convective Heat Exchange]. Moscow, Mir, 1987. 590 p.

*МОИСЕЕВ Владимир Иванович – доктор техн. наук, профессор, moiseev_v_i@list.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КОМАРОВА Татьяна Александровна – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, komarova_tanusha@mail.ru, (НВЦ «Дисперсные системы»); ЖЕБАНОВ Александр Владимирович – старший преподаватель, zhebanov@inbox.ru (Самарский государственный университет путей сообщения).

УДК 62-272.2

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРУЖИН РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Дата поступления: 20.06.2016
Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Определить и уточнить механические свойства специальных пружин с коэффициентом статической прочности меньше единицы по разработанной и представленной в статье методике, изготовленных из стали марки 60С2ХФА с применением высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Определить общие характеристики свойств материала пружин, применяемых в рессорном подвешивании тележек моделей 18-9810 и 18-9855 из стали 60С2ХФА без эффекта ВТМО (модуль сдвига *G* и допускаемые касательные напряжения). **Методы:** Испытания образцов из стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО на кручение. Статические испытания специальных пружин с упрочнением ВТМО на сжатие. **Результаты:** Полученные данные по результатам испытаний образцов и специальных пружин свидетельствуют о наличии эффекта упрочнения пружин после ВТМО и позволяют сделать вывод, что в дальнейших расчетах следует руководствоваться значением $G = 80$ ГПа и допустимым касательным напряжением 1000 МПа для стали 60С2ХФА. **Практическая значимость:** Приведенный в работе анализ механических свойств материала пружин позволяет уточнить расчет пружины при проектировании или совершенствовании рессорного подвешивания.

Высокотемпературная термомеханическая обработка, модуль сдвига, допустимое касательное напряжение, испытания на кручение, коэффициент запаса статической прочности, условный предел текучести.

Anna M. Orlova, D. Sci. (Eng.), professor, aorlova@uniwagon.com; ***Artem V. Gusev**, postgraduate student, agusev@tt-center.ru (Petersburg State Transport University); **Yekaterina A. Rudakova**, Cand. Sci. (Eng.), dynamic analysis department chair, lead researcher, erudakova@tt-center.ru (All-Union Research and Development Centre for Transportation Technology LLC) MECHANICAL TEST OF STEEL FOR FREIGHT BOGIE SWING SUSPENSION SPRINGS

Objective: To define and refine mechanical properties of special springs with static strength coefficient below one using a newly developed method presented in the paper. The springs, produced from grade 60S2KhFA steel, were subjected to high-temperature thermomechanical treatment (HTMT). To establish general characteristics of material properties of springs used for swing suspension of model 18-9810 and model 18-9855 bogies, produced from grade 60S2KhFA steel without HTMT effect (shear modulus *G* and permissible shear stress). **Methods:** Torsion tests of samples produced from grade 60S2KhFA steel without HTMT effect. Static compression tests of special springs with HTMT treatment. **Results:** Data obtained from results of tests of samples and special springs indicate that spring strengthening effect does occur after HTMT, and allow to conclude that in further calculations the value of $G = 80$ hPa and permissible shear stress of 1,000 mPa for grade 60S2KhFA steel. **Practical importance:** Analysis of mechanical properties of spring material provided in the paper allows for refining calculation of springs during designing or improving swing suspension.

High-temperature thermomechanical treatment, shear modulus, permissible shearing strain, torsion tests, static capacity safety coefficient, conventional yield limit.

Состояние дел и постановка задач исследования

Согласно исследованиям О. И. Шаврина, повышение прочности и пластичности при высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) объясняется изменениями в структуре стали, которые приводят к диспергированию структуры, к изменению морфологии мартенсита, к его фрагментации и к увеличению плотности дислокаций [13].

Пружины рессорных комплектов тележек моделей 18-9810, 18-9855 [6] изготавливаются из стали марки 60С2ХФА с упрочнением ВТМО в процессе навивки и с последующим дробенаклепом [9]. Поскольку достоверных сведений о механических свойствах материала готовых пружин из указанной стали при применении ВТМО и о способе их определения нет, вопрос оценки механических свойств материала готовых пружин, изготовленных с применением технологии упрочнения ВТМО, открыт.

Характеристики пружины (жесткость, прочность, устойчивость) определяются обоснованностью принятия двух общих характеристик свойств материала проволоки: модуля сдвига G и допустимых касательных напряжений [1]. По этим двум характеристикам нет единообразия даже для пружинных сталей, упрочненных термической обработкой.

В «Нормах для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – Нормы) приведены значения G материала проволоки (без указания марки пружинной стали) – 80 ГПа [7]. Также в литературе есть разные данные по G проволоки пружинной стали:

• 77 ГПа для стали 60 С2ХФА в справочнике «Стали и сплавы. Марочник» [12];

• 78,5 ГПа в ГОСТ 13765-86 [4] без указания марки пружинной стали.

Имеется противоречие между допустимыми напряжениями и пределом текучести по касательным напряжениям сдвига для пружинной проволоки с термическим упрочнением. Так, в Нормах допустимые напряжения среза для I расчетного режима, основное требование которого – не допустить появления остаточных деформаций детали, составляют не менее 750 МПа для стали 55С2 и не менее 1000 МПа – для 60С2ХФА, а в Нормах более ранней редакции (1983 г.) – не менее 750 МПа для стали 55С2 и не менее 1050 МПа – для 60С2ХФА только для III расчетного режима [8], основное требование которого – не допустить усталостного разрушения детали.

Исходя из этого, были сформулированы задачи исследования:

• испытаниями определить механические характеристики при кручении образцов из стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО;

• разработать методику и определить механические характеристики материала специальных пружин из стали марки 60С2ХФА с упрочнением ВТМО.

Определение механических характеристик материала пружин при кручении

Материал пружин испытывали на кручение, чтобы определить основные механические характеристики стали марки 60С2ХФА без эффекта ВТМО по ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытания на кручение» [2].

Для испытаний были изготовлены образцы из материала пружины разного диаметра (рис. 1) с лабораторной закалкой и отпуском:

• с диаметром рабочей части 10 мм, длиной рабочей части 50 мм;

• с диаметром рабочей части 22 мм, длиной рабочей части 110 мм.

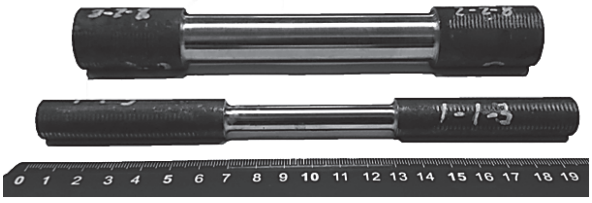


Рис. 1. Образцы материала пружины для испытаний на кручение

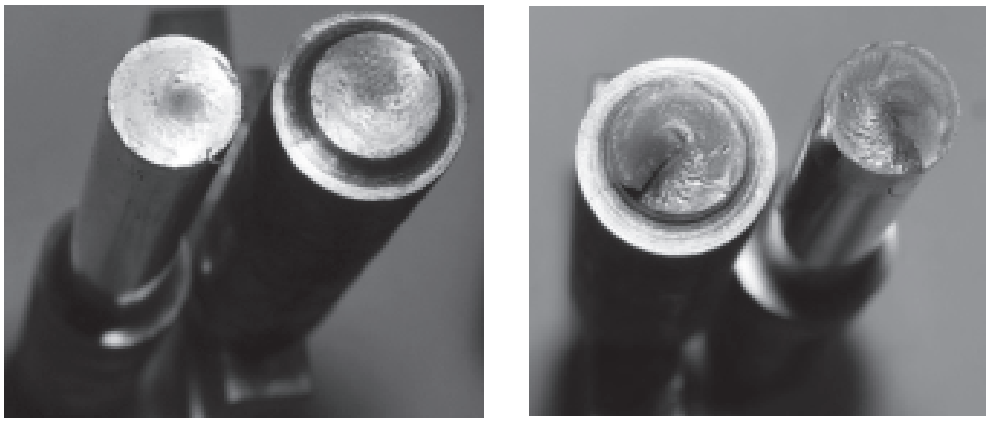


Рис. 2. Вид характерного разрушения образцов:
а) срез; б) отрыв

Основным типом разрушения образцов диаметром рабочей части 10 мм являлся срез, и лишь два образца имели отрыв (рис. 2).

Средняя величина *G* испытанных образцов с рабочим диаметром 10 мм и 22 мм для материала 60С2ХФА составила 81,82 ГПа и 81,92 ГПа, соответственно, что согласуется со значением *G* материала проволоки, приведенного в Нормах, – 80 ГПа.

Испытания на образцах с лабораторной закалкой и отпуском показали, что для материала 60С2ХФА пределы пропорциональности 763 МПа, текучести 863 МПа; предел прочности условный 1147 МПа, истинный 878 МПа. Полученные значения предела текучести отличаются от приведенных в Нормах значений (закалка с отпуском) – не менее 1000 МПа для 60С2ХФА.

Механические характеристики материала специальных пружин

Анализ геометрических и силовых характеристик партии пружин из стали марки 60С2ХФА рессорного подвешивания тележки 18-9855 показал их соответствие требованиям конструкторской документации. Наличие у представленных образцов пружин зоны пропорциональности до нагружения расчетной рабочей нагрузкой и отсутствие остаточной деформации после многократного приложения пробной нагрузки свидетельствуют о высокой точности изготовления и о качестве исходного материала прутка [5]. Данное заключение позволило разработать методику определения механических характеристик материала специальных пружин, основанную на применении линейной и нелинейной теории расчета пружин:

• проектирование и изготовление специальных пружин с применением технологии ВТМО и с коэффициентом запаса статической прочности меньше единицы;

• выбор критерия оценки статической прочности $\tau_т^{ВТМО}$ (предел текучести при кручении с ВТМО) $\leq \sigma_т^{то}$ (предел текучести при сжатии и термомеханической обработке);

• испытания для определения геометрических параметров и снятия непрерывной силовой характеристики в координатах «усилие – деформация» до излома пружин или до смыкания рабочих витков;

• пересчет $P_{пц}$ (сила, соответствующая пределу пропорциональности) и $P_т$ (сила, соответствующая пределу текучести) в $\tau_{пц}$ (предел пропорциональности по напряжениям среза) и $\tau_т$ (предел текучести по напряжениям среза) на основе линейной теории в упругой области и нелинейной – в области упруго-неупругих деформаций. Определение *G* в зоне пропорциональности;

• назначение допустимого значения напряжения среза для материала пружин $[\tau] \leq \tau_т$.

Для апробации разработанной методики были спроектированы и изготовлены специальные пружины (рис. 3) с упрочнением ВТМО с геометрическими параметрами, близкими к параметрам пружин рессорного подвешивания, но с коэффициентом запаса статической прочности меньше единицы. Геометрические параметры специальных пружин представлены в табл. 1.

После приложения к пружинам пробной нагрузки $F_{пр}$ наблюдалась остаточная деформация в связи с появлением в процессе нагружения площадки текучести. Один образец пружин каждого типа подвергался нагружению до пробной нагрузки $F_{пр}$ три раза для оценки диаграмм нагружения до и после прохода зоны текучести (рис. 4).

Анализ диаграмм показал, что после первого нагружения (обжатия) каждой пружины ее жесткость практически не изменилась (расхождение составило не более 1% между первым и последующим нагружениями), что свидетельствует о высококачественной технологии навивки.

На основе полученных диаграмм и геометрических измерений были определены предел пропорциональности по напряжениям среза $\tau_{пц}$ и так называемый условный предел текучести по напряжениям среза $\tau_т'$, предшествующий смыканию рабочих витков пружины, так как преждевременное смыкание рабочих витков пружин не позволило установить его точное значение.

Среднее по двум типам пружин значение предела пропорциональности $\tau_{пц}$ для стали марки 60С2ХФА составило 1037,2 ± 65,0 МПа; условного предела текучести $\tau_т'$ – 1120,2 ± ± 66,4 МПа.

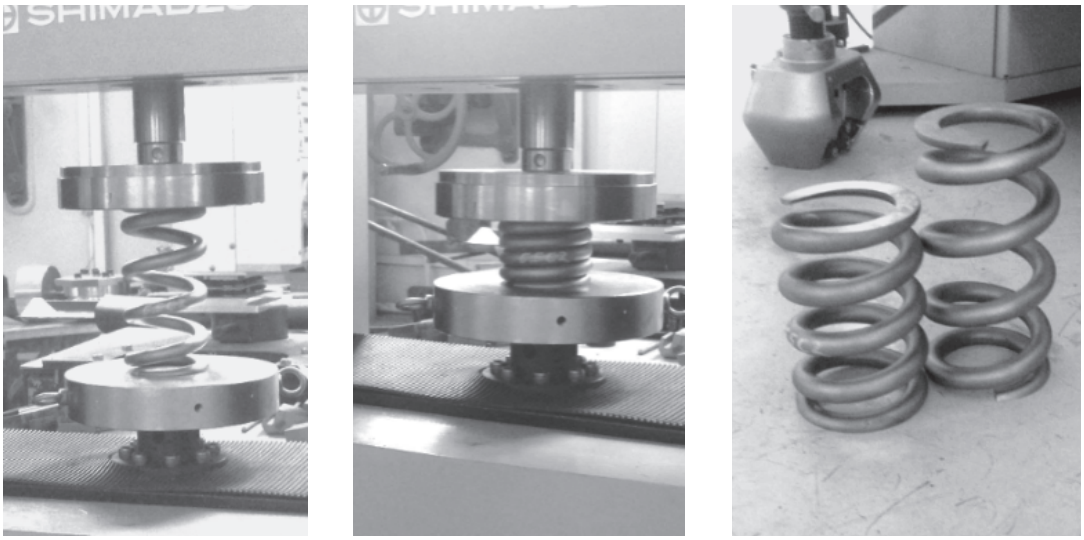


Рис. 3. Испытание на статическую прочность специальных пружин

ТАБЛИЦА 1. Геометрические параметры специальных пружин

Пружина	Диаметр прутка, d, мм	Внутренний диаметр, $D_{вн}$, мм	Полное число витков, n_1	Высота в свободном состоянии, $H_{св}$, мм	Индекс пружины, m	Коэффициент устойчивости, $K_{ус}$
Наружная	$22_{-0,13}$	$88^{+1,0}_{-0,5}$	6,00±0,13	290±2	5,0	2,64
Внутренняя	$14_{-0,11}$	56	5,00±0,13	160±2	4,0	2,86

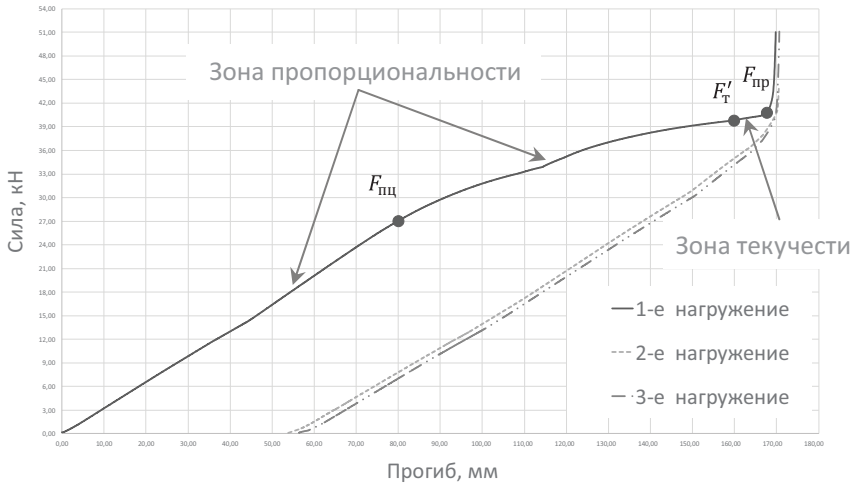


Рис. 4. Диаграмма трехкратного нагружения специальной пружины из стали марки 60С2ХФА

Также были определены значения характеристического модуля сдвига специальных пружин косвенным методом, по формуле Рело [10], среднее значение которого составило 69,7 ± 5,4 ГПа, что ниже значения модуля сдвига, указанного в Нормах, на 12,9 %.

Анализ результатов исследований

Сравнение минимально вероятных значений $\tau_{пц}$, $\tau_т$ и G по результатам испытаний представлено в табл. 2.

Полученные значения G при испытании прутков (закалка + отпуск) на кручение с высокой долей точности (максимальное отклонение не более ±3,5 %) совпадают со значением, указанным в Нормах (80 ГПа).

Среднее значение G по результатам статических испытаний пружин рессорного подвешивания и специальных пружин на сжатие, учитывающее эффект ВТМО, оказалось меньше значения, указанного в Нормах, в среднем на 8 и 13 %, соответственно.

Согласно исследованиям С. Д. Пономарева [11], пересчет нормальных напряжений текучести $\sigma_т$ и прочности $\sigma_в$ при растяжении в касательные напряжения при кручении можно реализовать с коэффициентом $\sqrt{3}$ ($\tau_т=\sigma_т/\sqrt{3}$, $\tau_в=\sigma_в/\sqrt{3}$), что также подтверждено в работе [15]. Касательные напряжения текучести для материала 60С2ХФА в соответствии с ГОСТ 14959-79 [3] составляют $\tau_т^{ГОСТ}$ = 849 МПа, согласно испытаниям прутков на кручение, $\tau_т^{кр}$ = 863 МПа. Таким образом, расхождение составило менее 1,6 %, что подтверждает исследование С. Д. Пономарева и свидетельствует о точном проведении испытаний на кручение с определением механических характеристик.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение значений $\tau_{пц}$, $\tau_т$ и G по результатам испытаний

Показатель	Испытание прутков на кручение	Статические испытания специальных пружин на сжатие	Статические испытания пружин рессорного подвешивания на сжатие
$\tau_{пц}$, МПа	763	972	–
$\tau_т$, МПа*	863	1054	–
G, ГПа	81,9 ± 0,9	69,7 ± 5,4	73,5±2,0

Примечание. * – определен условный предел текучести.

При навивке специальных пружин с использованием ВТМО напряжение текучести стали возросло на 20% до значения $\tau_т' = 1054$ МПа, что свидетельствует о наличии эффекта повышения прочности стали.

Выводы

Таким образом, механические константы материала пружин и определенные прочностные характеристики близки, поэтому при прочностных расчетах следует руководствоваться допустимым касательным напряжением 1000 МПа для стали 60 С2ХФА.

Принимая во внимание, что до настоящего времени в расчетах параметров пружин руководствовались значением модуля сдвига $G = 80$ ГПа (это соответствует значению модуля сдвига прутка при испытании на кручение) и что пружины не имеют массовых изломов и остаточной деформации, но имеют избыточный запас усталостной прочности, для расчетов рекомендовано принимать значение $G = 80$ ГПа.

Разработанная методика определения механических свойств материала пружины позволяет уточнить комплексный расчет пружины в соответствии с Нормами и ГОСТ 13765-86 при проектировании нового рессорного подвешивания [14] тележек грузовых вагонов для повышенных осевых нагрузок.

Библиографический список

1. Батанов М. В. Пружины / М. В. Батанов, Н. В. Петров. – М. : Машиностроение, 1968. – 216 с.

2. ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение.

3. ГОСТ 14959-79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.

4. ГОСТ 13765-86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров.

5. Давиденков Н. Н. Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин / Н. Н. Давиденков. – М. : Машгиз, 1956.

6. Лесничий В. С. Тележки грузовых вагонов : учеб. пособие / В. С. Лесничий, И. К. Самаркина, В. Н. Белоусов, А. В. Жеменов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 40 с.

7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ВИИВ-ВНИИЖТ, 1996.

8. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1983.

9. Остроумов В. П. Производство винтовых цилиндрических пружин / В. П. Остроумов. – М. : Машиностроение, 1970. – 135 с.

10. Пономарев С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М. : ОНТИ, 1938.

11. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.

12. Стали и сплавы. Марочник : справ. / под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

13. Шаврин О. И. Исследование влияния термомеханической обработки на прочность пружинных сталей в условиях статического и циклического нагружения : дис. … канд. техн. наук / О. И. Шаврин. – Ижевск : Ижевский механ. ин-т, 1967.

14. Эстлинг А. А. Проектирование рессорного подвешивания вагонов. Ч. 1 : метод. указания / А. А. Эстлинг. – СПб. : ПГУПС, 1993. – 26 с.

15. Wahl A. M. Mechanical Springs / A. M. Wahl. – Cleveland : Publ. by Penton publ. co., 1944.

References

1. Batanov M. V. & Petrov N. V. Pruzhiny [Springs]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968. 216 p.

2. State Standard GOST 3565-80. Metally. Metod ispytaniya na krucheniye [Metals. Torsion Test Method].

3. State Standard GOST 14959-79. Prokat iz ressorno-pruzhinnoy uglerodistoy i legirovannoy stali. Tekhnicheskiye usloviya [Rolled Products Made from Spring Carbonic and Alloyed Steel. Technical Conditions].

4. State Standard GOST 13765-86. Pruzhiny vintovyye tsilindricheskiye szhatiya i rastyazheniya iz stali kruglogo secheniya. Oboznacheniye parametrov, metodika opredeleniya razmerov [Compression and Extension Coiled Cylindrical Springs Made of Steel of Circular Section. Parameter Identification, Dimensional Measurement Methods].

5. Davidenkov N. N. Voprosy proyektirovaniya, izgotovleniya i sluzhby pruzhin [Issues of Designing, Production and Service of Springs]. Moscow, Mashgiz, 1956.

6. Lesnichiy V. S., Samarkina I. K., Belousov V. N. & Zhemenov A. V. Telezhki gruzovykh vagonov: uchebnoye posobiye [Freight Car Bogies: Course Guide]. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2012. 40 p.

7. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Normatives for Calculation and Designing of Transport Ministry Railways' Non-Self-Propelled Carriages of 1520 mm Gauge]. Moscow, VIIV–VNIIZhT, 1996.

8. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Normatives for Calculation and Designing of New and Modernised Transport Ministry Railways' Non-Self-Propelled Carriages of 1520 mm Gauge]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT, 1983.

9. Ostroumov V. P. Proizvodstvo vintovykh tsilindricheskikh pruzhin [Production of Coiled Cylindrical Springs]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1970. 135 p.

10. Ponomarev S. D. Raschet i konstruktsiya vitykh pruzhin [Calculation and Design of Coiled Springs]. Moscow, ONTI, 1938.

11. Ponomarev S. D. & Andreyeva L. Ye. Raschet uprugikh elementov mashin i priborov [Calculation of Elastic Elements of Engines and Instruments]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1980. 326 p.

12. Stali i splavy. Marochnik: spravochnik [Steels and Alloys. Grade Guide: Reference Book]; ed. V. G. Sorokin & M. A. Gervasyev. Moscow, Intermet Inzhiniring, 2001. 608 p.

13. Shavrin O. I. Issledovaniye vliyaniya termomekhanicheskoy obrabotki na prochnost pruzhinnykh staley v usloviyakh staticheskogo i tsiklicheskogo nagruzheniya [A Study into the Influence of Thermomechanical Processing on Strength of Spring Steels under the Conditions of Static and Cyclic Loading]. Izhevsk, Izhevskiy mekhanicheskiy institut, 1967.

14. Estling A. A. Proyektirovaniye ressornogo podveshivaniya vagonov [Designing Carriage Spring Suspension]. Pt. 1, Methodology Guidelines. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 1993. 26 p.

15. Wahl A. M. Mechanical Springs. Cleveland, Publ. by Penton publ. co., 1944.

ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, профессор, aorlova@uniwagon.com; *ГУСЕВ Артем Владимирович – аспирант, agusev@tt-center.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, руководитель отдела динамических расчетов, ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru (ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий»).

УДК 004.896+656:25

Д. В. Седых

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТОПОЛОГИЙ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ В ОТРАСЛЕВОМ ФОРМАТЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА УСТРОЙСТВА СЦБ

Дата поступления: 26.07.2016
Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Исследовать возможность представления и описания конфигураций рельсовых цепей для проектирования и ведения технической документации в отраслевом формате технической документации. **Методы:** Используются методы теории графов. **Результаты:** Разработан формат описания рельсовых цепей, достаточных для решения задач хозяйства СЦБ. Формат описания рельсовых цепей утвержден в качестве отраслевого в ОАО «РЖД» и в настоящее время активно используется как в системе ведения технической документации, так и в задачах смежных систем. Модуль формирования описания действует полностью автоматически и сохраняет данные в утвержденном формате. Разработан способ идентификации одинаковых рельсовых цепей независимо от того, как их нарисовал проектировщик на схеме станции. Данный способ реализован в виде алгоритма и программы, которая автоматически формирует марку топологии рельсовой цепи по двухниточному плану. Приведены результаты идентификации топологий рельсовых цепей для реальной станции. **Практическая значимость:** Использование предложенного метода представлений топологий рельсовых цепей позволяет упростить разработку модулей сверки технической документации.

Проектирование, напольное технологическое оборудование, АРМ-ВТД, экспертиза технической документации, рельсовые цепи, отраслевой формат, техническая документация.

Dmitriy V. Sedykh, engineer, sedyhdmitriy@gmail.com (Petersburg State Transport University)
IDENTIFICATION OF TOPOLOGIES OF RAIL TRACK CIRCUITS IN INDUSTRY-SPECIFIC FORMAT OF ENGINEERING DOCUMENTATION FOR SIGNALLING ARRANGEMENTS

Objective: To study possibilities for presenting and describing configurations of rail track circuits for designing and keeping engineering documentation in industry-specific format of engineering documentation. **Methods:** Graph theory methods were applied. **Results:** A format for describing rail track circuits was developed, sufficient for the purposes of signalling infrastructure. A format for describing rail track circuits was approved by Russian Railways JSC as industry-specific and is regularly used at present both in the system for keeping engineering documentation and in the tasks of related systems. A module for forming a description operates fully autonomously and saves the data in approved format. A method for identification of similar rail circuits was developed, independent from how a designer drew them on a station scheme. The method was realised as an algorithm and a program which automatically forms rail track circuit topology mark on double-rail track circuit. Results of identification of rail track circuits' topologies are provided for a real-life station. **Practical importance:** Application of the proposed method of presenting rail track circuits' topologies allows for simplification of development of modules for comparative check of engineering documentation.

Designing, floor-standing processing equipment, automated workstation for keeping technical documents (ARM–VTD), examination of engineering documentation, rail track circuits, industry-specific format, engineering documentation.

В области железнодорожной автоматики и телемеханики активно развиваются системы автоматизированного проектирования и электронного документооборота [3–5, 7–9, 19]. Чтобы интегрировать различные системы и разработчиков, разработан отраслевой формат технической документации (ОФ-ТД).

ОФ-ТД способен представить всю необходимую документацию на технические устройства транспортной отрасли. ОФ-ТД содержит в себе не только информацию об изображении чертежа (в универсальном формате векторной графики – Scalable Vector Graphics (SVG)), но и модель изображенного на ней элемента или схемы. При этом приложение может извлекать необходимую информацию по требованию (только графику, или только модель, или и то, и другое). Также чертеж в ОФ-ТД может быть прочитан не только специализированным приложением, но и обычным браузером. В настоящее время в ОАО «РЖД» ОФ-ТД уже используется для обмена информацией между автоматизированными системами, а также для обмена данными с системами автоматизированного проектирования

Один из чертежей напольного технологического оборудования – двухниточный план станции и перегона (рис. 1) [18]. Формат данных для этого чертежа является самым сложным среди чертежей напольного оборудования, так как он насыщен графически, кроме того, он должен содержать в себе описание дополнительных параметров оборудования, не отображаемых на чертеже, структур данных и связей.

Двухниточный план станции является следующим шагом при проектировании напольного технологического оборудования: на схематическом плане станции есть только понятие «секция», а на двухниточном возникает понятие «рельсовая цепь». К описанию

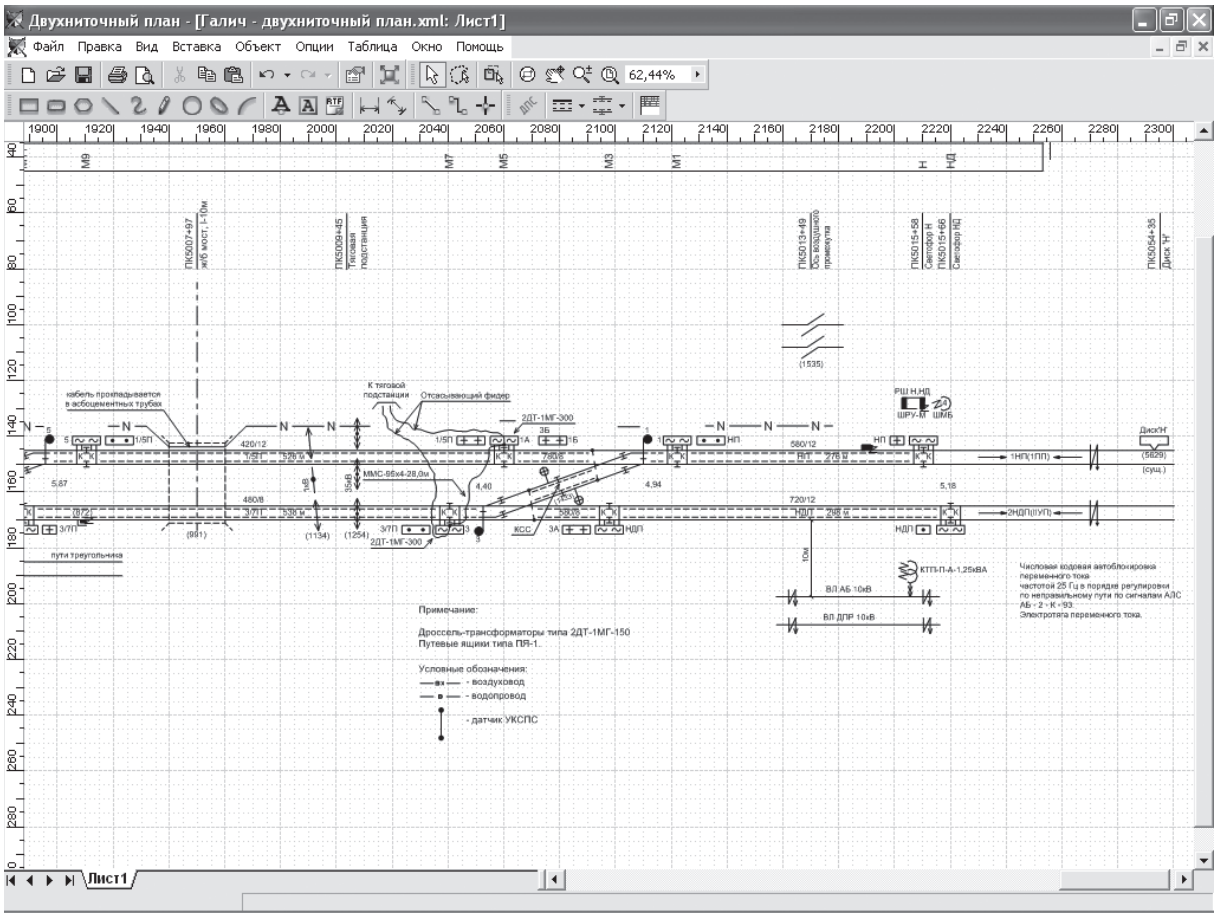


Рис. 1. Двухниточный план станции

схематического плана добавляется информация об оборудовании рельсовых цепей и месте его установки, о канализации обратного тягового тока, местах установки дроссель-трансформаторов и их точках подключения, о полярности или частотах разграничения рельсовых цепей [6, 10, 11, 17]. Можно сказать, что на схематическом плане есть только топология будущей рельсовой цепи – секция, а на двухниточном понятие секции оснащается всем необходимым оборудованием и появляется рельсовая цепь. Выделение понятия рельсовой цепи в отдельную структуру необходимо, так как оно используется в дальнейшем как для автоматизации выполнения самого двухниточного плана, так и для проектирования постовой части устройств СЦБ. Также понятие рельсовой цепи применимо для автоматизированной экспертизы технической документации, что будет показано ниже.

Формат описания рельсовых цепей

Описание рельсовой цепи как обособленного объекта необходимо для многих задач. В результате возникла потребность разработать формат описания и модуль для автоматического формирования описания рельсовой цепи по двухниточному плану станции.

В отраслевом формате технической документации на устройства СЦБ (ОФ-ТД СЦБ) описание рельсовой цепи вошло как отдельная составляющая описания формата двухниточных планов станций [1, 19]. Как и остальные сущности, описание включает в себя элементы и атрибуты.

Атрибуты описания рельсовой цепи (рис. 2) можно разделить на несколько групп:

• графические – для описания изображения рельсовой цепи на чертеже;

• параметры – для описания характеристик рельсовой цепи и ее составляющих;

• флаги – обозначают наличие определенных свойств у рельсовой цепи. Иногда могут дублировать другие описания параметров, но в одной комплексной оценке.

В зависимости от характеристик конкретной рельсовой цепи, для которой строится описание, атрибуты могут быть внесены в описание, а могут и нет. Правила формирования всех атрибутов описаны в соответствующей документации на ОФ-ТД.

Кроме атрибутов описание рельсовой цепи должно содержать основную информацию и ссылки на входящие в нее элементы и сущности (рис. 3). Элементы чертежа, входящие в рельсовую цепь:

• участок пути;

• стрелочный перевод;

• изолирующей стык;

• ссылки на другие сущности и элементы.

Ссылки на другие сущности необходимы для хранения данных в рельсовой цепи для решения специфичных задач. Например, ссылка на переезд или пешеходную дорожку, пересекающие данную рельсовую цепь. Данная информация необходима для модулей расчета сигнализации извещения.

Отдельной сущностью является «Конец рельсовой цепи». Конец – это отдельная структура, описывающая оборудование и характеристики границы рельсовой цепи (рис. 4). Кроме того, у каждой границы рельсовой цепи есть свой список входящих в него элементов (рис. 5) со своими характеристиками:

• изолирующий стык;

• дроссель-трансформатор;

• путевой ящик.

Описание рельсовой цепи, полученное автоматически, записывается в отраслевой формат, основой которого является формат XML. Пример описания рельсовой цепи в отраслевом формате представлен на рис. 6.

Топология рельсовой цепи

Одна из важных проблем в описании рельсовой цепи – идентификация топологии, так как одна и та же топология на двухниточном плане может быть представлена по-разному, являясь по сути одним и тем же (рис. 7, 8). Идентификация топологии необходима для

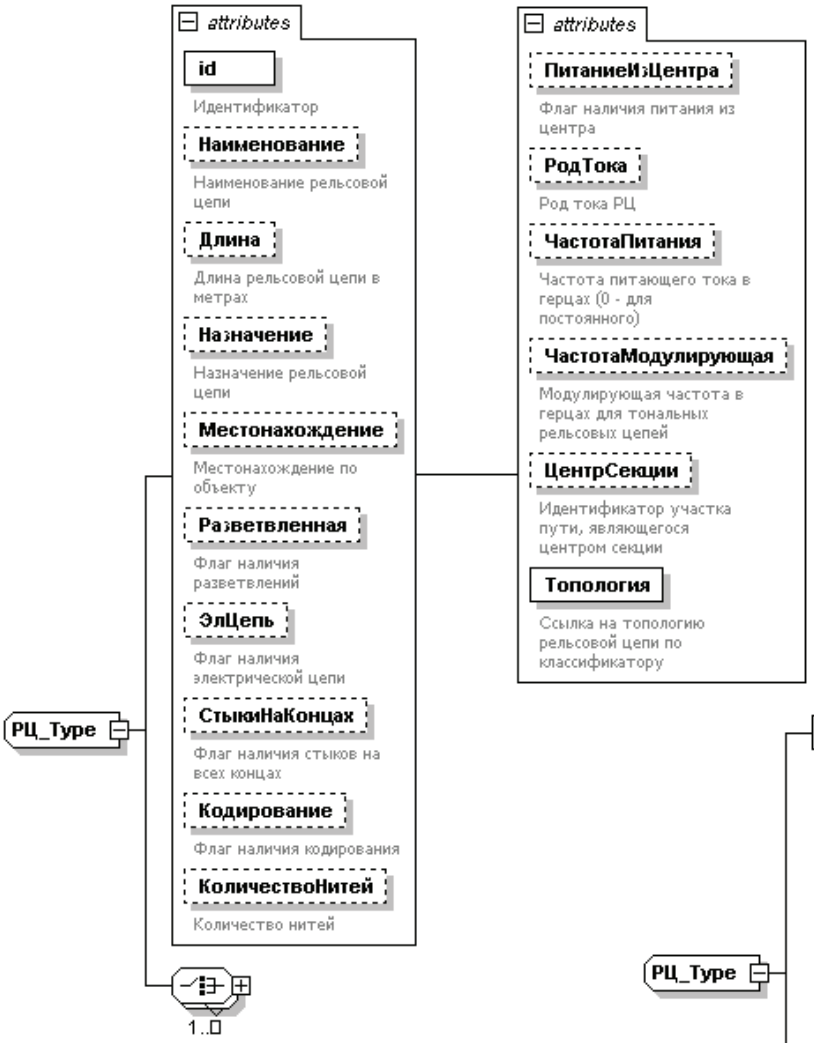


Рис. 2. Атрибуты элемента рельсовой цепи

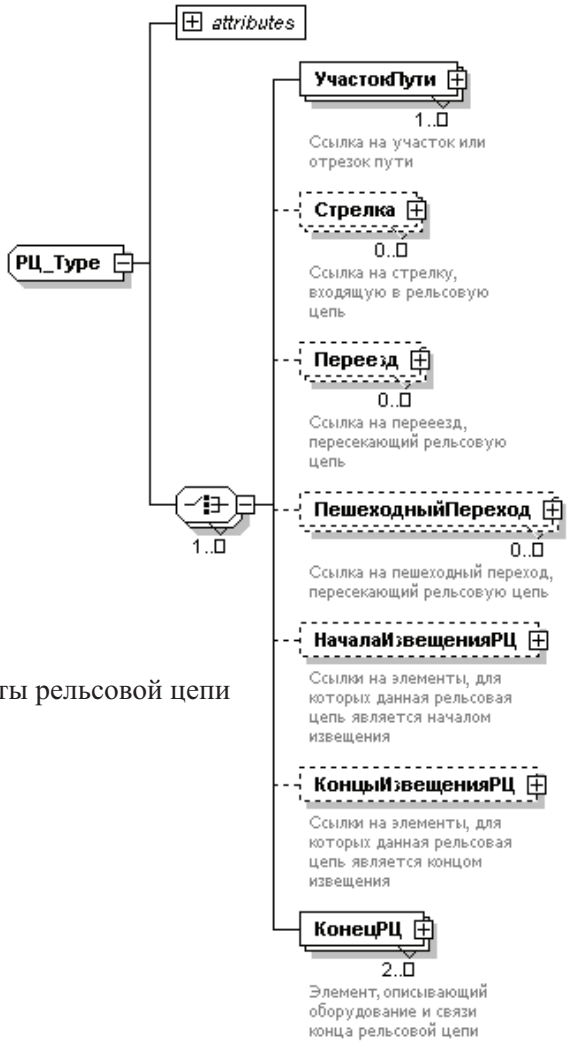


Рис. 3. Элементы рельсовой цепи

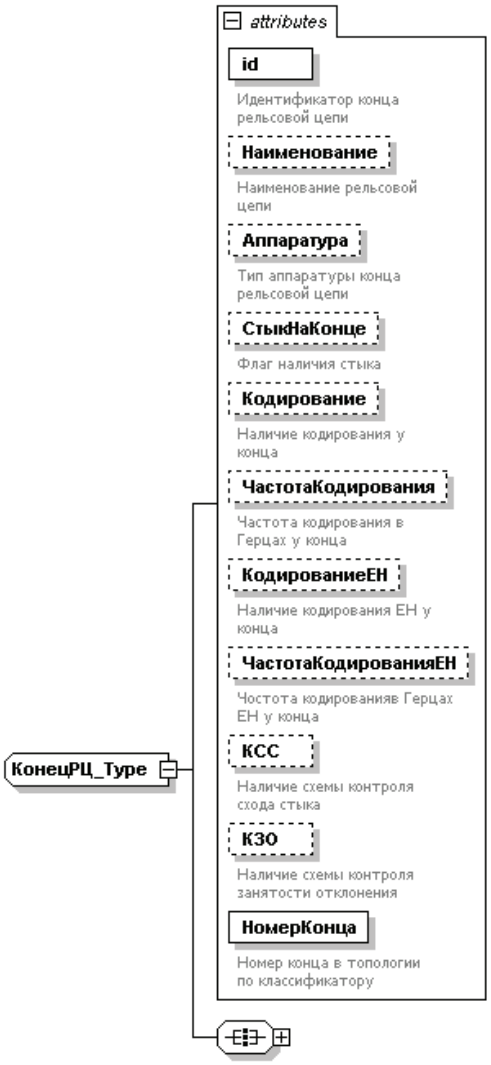


Рис. 4. Описание границы рельсовой цепи

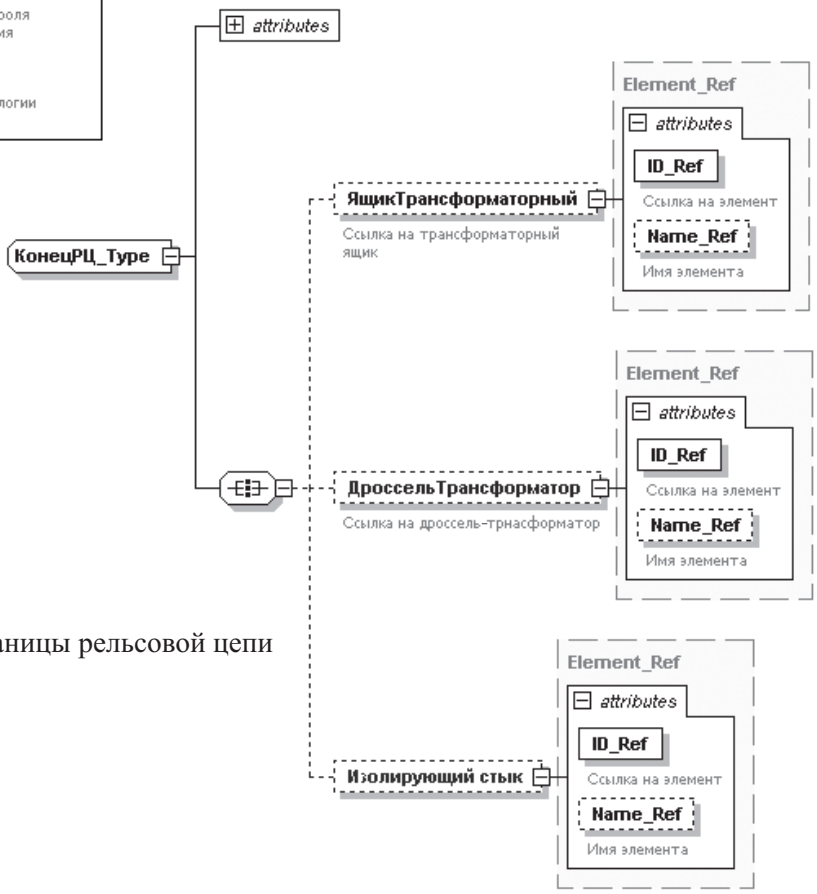


Рис. 5. Элементы границы рельсовой цепи

```xml
<?xml version="1.0" encoding="windows-1251" ?>
- <RC id="1801" Наименование="6СП" Длина="125" Назначение="Стрелочная секция"
    Местонахождение="Станция" Разветвленная="Да" ЭлЦепь="Да" СтыкиНаКонцах="Да" Кодирование="Нет"
    КоличествоНитей="Две" ПитаниеИзЦентра="Нет" РодТока="Нет" ЧастотаМодулирующая="" ЧастотаПитания=""
    ЦентрСекции="240" Топология="К1КК">
    <УчастокПути ID_Ref="240" />
    <Стрелка ID_Ref="95" />
    <УчастокПути ID_Ref="239" />
    <УчастокПути ID_Ref="270" />
  - <КонецРЦ id="1798" Наименование="6" Аппаратура="Питающая" Кодирование="Нет"
      ЧастотаКодирования="0" КодированиеЕН="Нет" КСС="Нет" КЗО="Нет" СтыкНаКонце="Да" НомерКонца="1">
      <Изолирующий_Стык ID_Ref="94" />
      <УчастокПути ID_Ref="240" />
      <Ящик_трансформаторный ID_Ref="348" />
    </КонецРЦ>
  - <КонецРЦ id="1799" Наименование="6А" Аппаратура="Релейная" Кодирование="Нет"
      ЧастотаКодирования="0" КодированиеЕН="Нет" КСС="Нет" КЗО="Нет" СтыкНаКонце="Да" НомерКонца="2">
      <Изолирующий_Стык ID_Ref="96" />
      <УчастокПути ID_Ref="239" />
      <Ящик_трансформаторный ID_Ref="347" />
    </КонецРЦ>
  - <КонецРЦ id="1800" Наименование="6Б" Аппаратура="Релейная" Кодирование="Нет"
      ЧастотаКодирования="0" КодированиеЕН="Нет" КСС="Нет" КЗО="Нет" СтыкНаКонце="Да" НомерКонца="3">
      <Изолирующий_Стык ID_Ref="107" />
      <УчастокПути ID_Ref="270" />
      <Ящик_трансформаторный ID_Ref="350" />
    </КонецРЦ>
  </RC>
```


Рис. 6. Формат описания рельсовой цепи

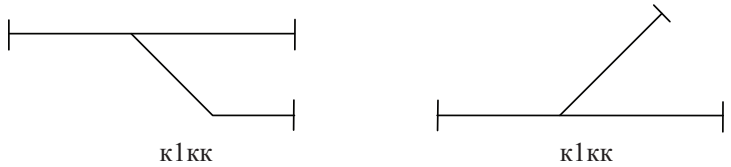


Рис. 7. Схематичные варианты топологии рельсовой цепи одной марки

многих задач, например, для модулей автоматического расчета параметров рельсовых цепей, задач АСУ-Ш2, экспертизы технических решений, расчета параметров рельсовых цепей и др.

Предложенный формат рельсовых цепей содержит все данные, которые необходимы для идентификации топологии рельсовой цепи. В нем предусмотрен отдельный параметр, который содержит идентификатор топологии рельсовой цепи (марку топологии). Для доказательства возможности автоматического построения классификатора топологий и их идентификаторов (марок) разработан автоматический модуль синтеза идентификатора топологии по описанию рельсовой цепи. Модуль позволяет автоматически определить марку рельсовой цепи, которая будет одинаковой для идентичных топологий (рис. 9).

Так что же представляет собой марка топологии рельсовой цепи? По сути марка – это текстовый идентификатор, который однозначно определяет топологию конкретной рельсовой цепи. Он не должен зависеть от способа рисования рельсовой цепи, от того, как она расположена на чертеже, как повернута и как отражена по разным осям. На марку топологии не должны влиять графические параметры элементов, а самое главное – количество и расположение участков путей между границами рельсовой цепи и стрелочными переводами.

Формирование марки топологии рельсовой цепи

Рассмотрим кодировку марки топологии. Марка топологии может содержать пять раз-

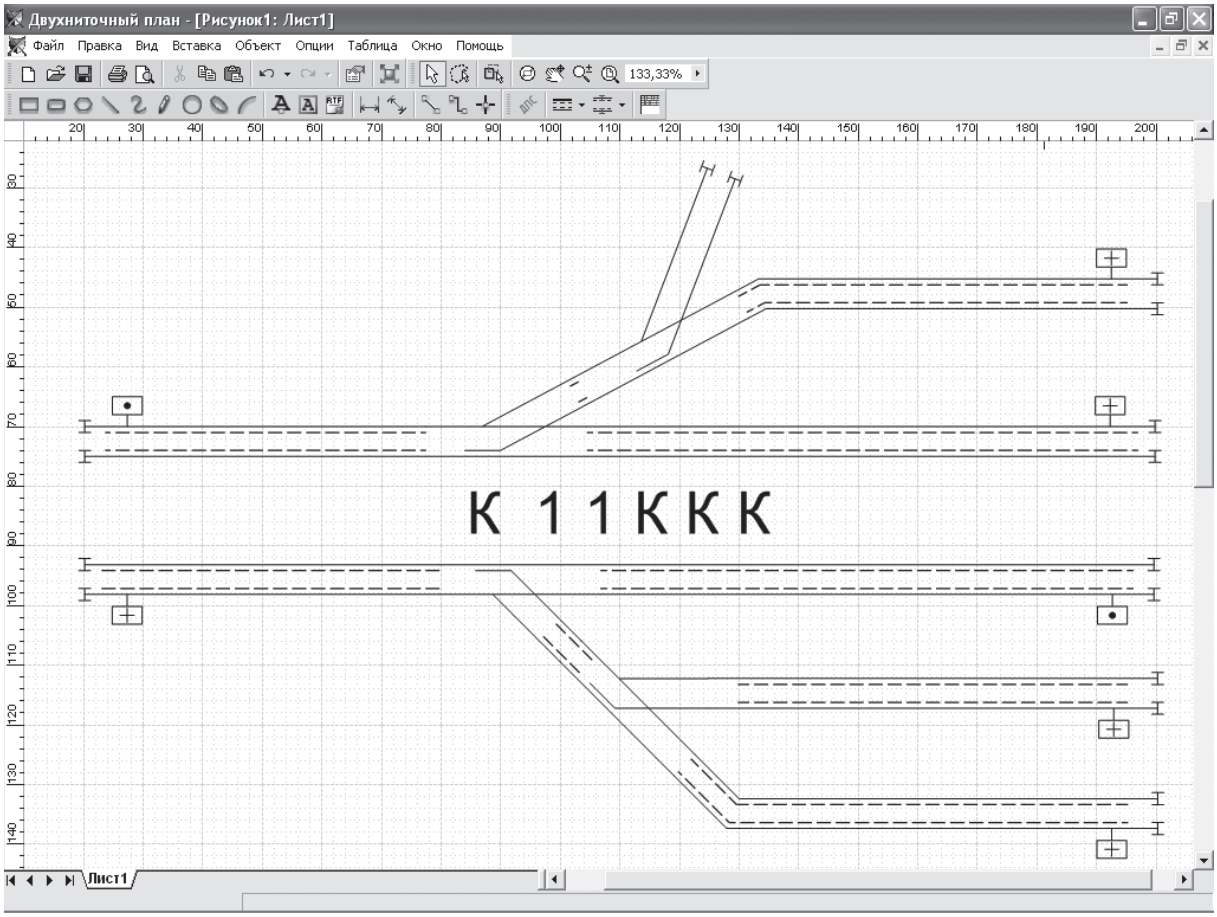


Рис. 8. Варианты топологии рельсовой цепи одной марки на двухниточном плане станции

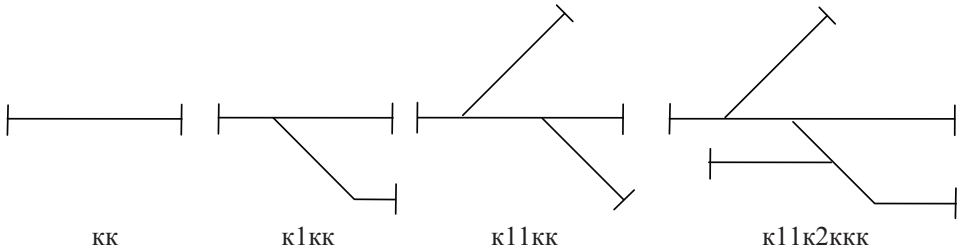


Рис. 9. Восстановление рисунка рельсовой цепи по марке

ных символов: «к», «1», «2», «3», «4». С точки зрения сущностей, входящих в определение топологии, их всего две: стрелка и граница рельсовой цепи для упрощения пути опускаются, так как не содержат смысловой нагрузки для данной задачи. Символ «к» означает границу рельсовой цепи (конец рельсовой цепи, поэтому «к»), символы с «1» до «4» – номер примыкания к стрелочному переводу. У обычного стрелочного перевода четыре точки примыкания (направления заезда на стрелочный перевод):

«1» – движение на стрелку в пошерстном направлении;

«2» – движение на стрелку в противошерстном направлении с примыкания без отклонения;

«3» – движение на стрелку в противошерстном направлении с примыкания с отклонением;

«4» – данный вид движения возможен только для перекрестных стрелок.

Частные случаи стрелочных переводов только с двумя примыканиями – это сбрасывающие остряки, сбрасывающие стрелки, с точки зрения формата представления сюда же относятся сбрасывающие башмаки и противооткатные упоры. Порядок символов при построении марки определяется рекурсивным алгоритмом прохождения по рельсовой цепи от одного из концов во все остальные по связям элементов. При этом предполагается, что отклонения по стрелкам происходят последовательно: сначала в прямом направлении движения, а потом – по отклонению. При этом, как видно из примера, марка всегда начинается с символа «к», так как начинается с границы рельсовой цепи, и заканчивается символом «к», так как на одной из границ она всегда заканчивается. Также символы «к» могут быть в середине марки топологии – для тех границ, которые были пройдены по мере прохождения по всей рельсовой цепи.

Важный фактор: в зависимости от того, с какой границы мы начали строить марку топологии, сформированные марки будут разные. Так, для простой рельсовой цепи из одной стрелки могут быть получены следующие марки топологии: «к1кк», «к2кк», «к3кк». Все зависит от точки, с которой начался алгоритм. Необходимо определить способ выбора марки топологии, которая была бы однозначна для двух рельсовых цепей независимо от выбора начальной точки. Один из способов решения данной задачи – выбор начальной границы, которая является центром секции этой рельсовой цепи. Но данный подход ограничит однозначное определение марки топологии только для типовых рельсовых цепей и не позволит использовать марку топологии для идентификации более крупных структур. К тому же не все рельсовые цепи могут иметь центр секции, это довольно распространенное явление в случае организации перекрестного съезда в горловинах. Для решения данной проблемы в настоящий момент алгоритм формирует все возможные марки топологии рельсовой цепи, после этого сформированный массив сортируется в алфавитном порядке и по увеличению количества символов. Выбирается первая марка топологии по списку. Данный способ позволяет выбрать самую короткую марку топологии и однозначно определить ее независимо от начальной точки старта алгоритма.

Марка несет также смысловую нагрузку: она содержит описание топологии рельсовой цепи, позволяющее восстановить ее по марке. Схемы, представленные на рис. 9, автоматически сформированы по заданным маркам рельсовых цепей и позволяют графически показать пользователю, какая именно рельсовая цепь представлена каждой маркой.

Все идентифицированные топологии рельсовых цепей сгруппированы по типам марок. Там, где можно формировать имя, оно автоматически получается из имен входящих в них стрелок. Если имена стрелок не обозначены на двухниточном плане, то рельсовая цепь обозначается «<без имени>». Такое может быть для путевого развития в маневровых районах и на подъездных путях.

Метод сверки схем напольного технологического оборудования с использованием рельсовых цепей

Актуальная задача при экспертизе технической документации – сверка технической документации [2]. Это важно для ряда чертежей, получаемых в результате сквозного проектирования друг из друга. Например, схематический план станции является первичной схемой при любом проектировании устройств СЦБ. На его основе строится двухниточный план станции и далее – схема канализации тягового тока. Все эти чертежи строятся на основе другого и содержат новые подмножества параметров и дополнительных элементов по сравнению с предыдущим чертежом. Все данные схемы (их основа) представляют собой связанные графы, где вершинами являются основные элементы топологического

развития, а ребрами – участки путей (рельсы). В общем случае задача сравнения таких схем сводится к идентификации вершин графа на соответствие и к сравнению графов между собой.

Использование описания рельсовых цепей в отраслевом формате с разработанной структурой позволило значительно упростить задачу сверки. Теперь схему можно представить графом меньшей размерности, где вершинами являются рельсовые цепи, а ребрами – связи между границами рельсовой цепи. Данное представление позволило не только использовать второй раз многие алгоритмы «как есть», но и сократить время работы алгоритма в несколько раз.

Заключение

Разработанный формат описания рельсовых цепей в настоящее время утвержден в качестве отраслевого формата в ОАО «РЖД». Модуль формирования описания рельсовых цепей внедрен во все продукты ООО «ИМСАТ» для работы с технической документацией напольного технологического оборудования. В настоящее время формат используется и как внутренний (для описания рельсовых цепей), и как внешний формат интеграции с другими информационными системами.

Разработка системы экспертизы показала, что применение данного формата и описаний рельсовых цепей для схем напольного технологического оборудования позволяет упростить разработку модулей сверки технической документации.

Описанная технология формирования технической документации напольного технологического оборудования рельсовых цепей помимо отмеченных преимуществ имеет и другие перспективные направления приложения, например, в задачах автоматизации проектирования внешних средств технического диагностирования [12–16]. Решение этих и других задач – ближайшая перспектива развития систем автоматизации проектирования и электронного документооборота в области железнодорожной автоматики и телемеханики.

Библиографический список

1. Балуев Н. Н. Проблемы внедрения отраслевого формата / Н. Н. Балуев, М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 3. – С. 2.

2. Безродный Б. Ф. Автоматизация проверки проектов на основе АРМ-ТЕСТ / Б. Ф. Безродный, М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 3. – С. 22–24.

3. Булавский П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 81–94.

4. Булавский П. Е. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 4. – С. 418–432.

5. Василенко М. Н. Методы выделения текстовых выражений принципиальных электрических схем железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Р. А. Ковалев // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 4.

6. Василенко М. Н. Насчет параметров и проверка работоспособности бесстыковых тональных рельсовых цепей / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Растегаев // Изв. ПГУПС. – 2006. – Вып. 2. – С. 104–112.

7. Василенко М. Н. Принципы организации электронного документооборота технической документации / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, Д. В. Седых // Транспорт РФ. – 2006. – № 7. – С. 31–35.

8. Василенко М. Н. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.

9. Горбачев А. М. Автоматизация анализа, экспертизы и сверки технической документации

системы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. М. Горбачев // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 4. – С. 73–78.

10. Денисов Б. П. Автоматизация проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на базе АРМ-ПТД версии 6 / Б. П. Денисов, Н. И. Рубинштейн, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожниковв. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 66–74.

11. Денисов Б. П. Методы контроля корректности построения схем замещения тональных рельсовых цепей в АРМ-ТРЦ / Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 4. – С. 110–120.

12. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Урала. – 2013. – № 1. – С. 36–42.

13. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.

14. Ефанов Д. В. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Д. В. Ефанов, А. А. Лыков. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 59 с.

15. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 124–148.

16. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : моногр. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016.

17. Растегаев С. Н. Автоматизация формирования схем замещения для расчета ТРЦ / С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 4. – С. 12–13.

18. Сапожников Вл. В. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, И. М. Кокурин, В. А. Кононов и др. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2006. – 247 с.

19. Седых Д. В. Применение отраслевого формата технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики для интеграции приложений / Д. В. Седых, С. А. Суханов // Изв. ПГУПС. – 2005. – Вып. 3. – С. 74–79.

References

1. Baluyev N. N., Vasilenko M. N., Trokhov V. G. & Sedykh D. V. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2010, no. 3, pp. 2.

2. Bezrodnyy B. F., Vasilenko M. N., Denisov B. P. & Sedykh D. V. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2008, no. 3, pp. 22-24.

3. Bulavskiy P.Ye. & Markov D. S. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2016, T. 2, no. 1, pp. 81-94.

4. Bulavskiy P.Ye., Markov D. S., Sokolov V. B. & Konstantinova T.Yu. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, T. 1, no. 4, pp. 418-432.

5. Vasilenko M. N. & Kovalev R. A. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2016, T. 2, no. 4.

6. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Kultin V. B. & Rastegayev S. N. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2006, Is. 2, pp. 104-112.

7. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskiy P.Ye. & Sedykh D. V. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2006, no. 7, pp. 31-35.

8. Vasilenko M. N., Trokhov V. G., Zuyev D. V. & Sedykh D. V. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2015, no. 1, pp. 14-16.

9. Gorbachev A. M. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2012, Is. 4, pp. 73-78.

10. Denisov B. P., Rubinshteyn N. I., Rastegayev S. N. & Vorobey N.Yu. Avtomatizatsiya proyektirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na baze ARM-PTD versii 6 [Automation of Designing Rail Automatics and Telematics Systems with the Automated Workstation ARM-PTD Version 6].

Aktualnyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sbornik nauchnykh trudov [Current Issues in Development of Rail Automatics and Telematics Systems: Coll. Sci. Papers]; ed. Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2013. Pp. 66-74.

11. Denisov B. P., Kultin V. B., Rastegayev S. N. & Vorobey N. Yu. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2010, Is. 4, pp. 110-120.

12. Yefanov D. V. & Bodganov N. A. *Transport Urala – Urals Transport*, 2013, no. 1, pp. 36-42.

13. Yefanov D. V. *Transport Urala – Urals Transport*, 2015, no. 1, pp. 35-40.

14. Yefanov D. V. & Lykov A. A. Osnovy postroyeniya i printsipy funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnoye posobiye [Basic Course of Designing and Functioning Principles of Technical Diagnostics and Monitoring Systems for Rail Automatics and Telematics Devices: Course Guide]. St. Petersburg, PGUPS, 2012. 59 p.

15. Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2016, T. 2, no. 1, pp. 124-148.

16. Yefanov D. V. Funktsionalnyy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional Control and Monitoring of Rail Automatics and Telematics Devices: A Monograph]. St. Petersburg, FGBOU VO PGUPS, 2016.

17. Rastegayev S. N. & Vorobey N. Yu. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2011, no. 4, pp. 12-13.

18. Sapozhnikov Vl. V., Kokurin I. M., Kononov V. A., Lykov A. A. & Nikitin A. B. Ekspluatatsionnyye osnovy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Operational Basics of Automatics and Telematics: Course Book for Railway Transport Universities]; ed. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut, 2006. 247 p.

19. Sedykh D. V. & Sukhanov S. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2005, Is. 3, pp. 74-79.

СЕДЫХ Дмитрий Владимирович – инженер, sedyhdmitriy@gmail.com (Петербургскийо государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.143.541

М. С. Чусовитин, К. С. Малышев

ИСПЫТАНИЕ РЕЛЬСОВОЙ ПОДКЛАДКИ НА ДЕРЕВЯННОЙ ШПАЛЕ

Дата поступления: 27.05.2016
Решение о публикации: 17.08.2016

Цель: Подтвердить эффективность и практическую применимость расчета прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале, разработанного на основе новой теоретической методики оценки прочности рельсовой подкладки. **Методы:** Произведен теоретический расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале. Проведено лабораторное испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале с использованием испытательной машины INSTRON SATEC 1200KN, с фиксацией результатов тензометрической станцией «Геркулес» и штангенциркулем Electronic Digital Caliper. **Результаты:** Получено подтверждение применимости новой методики расчёта прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале с учетом переменного сечения рельсовой подкладки. Получены значения прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале в зависимости от применяемой нагрузки. **Практическая значимость:** Применение данной методики оценки прочности рельсовых подкладок позволяет более точно определить запас прочности рельсовой подкладки с различными размерами на проектной стадии.

Деревянная шпала, прогиб, рельсовая подкладка, прочность, вертикальные перемещения.

Maksim S. Chusovitin, postgraduate student, chusmaksimus@mail.ru; ***Konstatin S. Malyshev**, postgraduate student, m_kostya88@mail.ru (Petersburg State Transport University) TESTING OF RAIL PLATES FOR WOODEN SLEEPER

Objective: To confirm efficiency and practical applicability of a calculation method for deflection of rail plates for wooden sleeper which was developed on the basis of a new theoretical model for evaluation of rail plate bearing capacity. **Methods:** Theoretical calculation of deflection of rail plate for wooden sleeper was conducted. Laboratory testing of rail plate for wooden sleeper was conducted on test machine Instron Satec 1200KN, with results recorded by strain-gauge station Gerkules and by Electronic Digital Caliper. **Results:** A confirmation was obtained for applicability of the new calculation method for deflection of rail plate for wooden sleeper taking into account variable cross-section of a rail plate. Values for deflection of rail plate for wooden sleeper depending on applied pressure were obtained. **Practical importance:** Application of this method of evaluation of the bearing capacity of a rail plate for wooden sleeper allows for a more precise estimation of degree of safety of rail plates of various sizes at designing stage.

Wooden sleeper, deflection, rail plate, bearing capacity, vertical movements.

Традиционные методы расчета рельсовых прокладок на прочность используют упрощенную расчетную схему подкладки постоянного поперечного сечения, опирающейся на плоское основание, равномерно упругое по всей длине [1, 3, 4].

В 2012 г. Н. Н. Султанов и А. В. Колтаков предложили теоретический метод расчета прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале [5]. Они доработали методику расчета прогибов рельсовой подкладки, предложенную профессором С. П. Першиным в 1968 г.

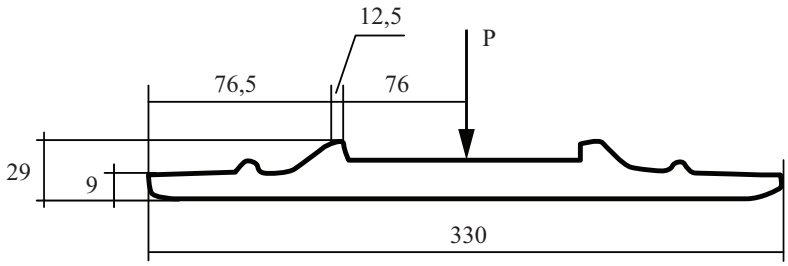


Рис. 1. Расчётная схема (размеры в мм)

[10]. Для полноты оценки практических результатов лабораторного испытания произведем теоретические расчеты по схеме, указанной на рис. 1. Расчет произведен для нагрузки в 5, 10 и 15 т.

Теоретический расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале

Итак, берем за основу следующие данные: расчётная нагрузка $P = 5$ т; коэффициент постели шпал $k(x) = 100$ кг/см^3; модуль продольной упругости стали $E = 2{\cdot}10^5$ МПа, делаем расчеты по известным формулам, используя дифференциальные зависимости [2, 13, 15]:

1) определим поперечные силы; сечение $i = 0{,}03825$ м

$$Q_i = \int_0^i q dx = \int_0^{0.03825} 148636{,}4 dx =$$
$$= 148636{,}4 \cdot (0{,}03825 - 0) = 5685{,}3 \text{ н};$$

2) определим значение момента сил; сечение $i = 0{,}03825$ м

$$M_i = \int_0^i Q dx = \int_0^{0.03825} qx dx =$$
$$= 148636{,}4 \cdot 0{,}03825^2 / 2 -$$
$$-148636{,}4 \cdot 0^2 / 2 = 108{,}73 \text{ н} \cdot \text{м};$$

3) определим угол поворота; сечение $i = 0{,}127$ м

$$\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)} = \int_{-0{,}076}^{0} \frac{qx^2}{2EI(x)} =$$
$$= \frac{148636{,}4 \cdot (-0{,}076)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1{,}416667 \cdot 10^{-8}} -$$
$$- \frac{148636{,}4 \cdot (0)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1{,}416667 \cdot 10^{-8}} =$$
$$= -0{,}003838 \text{ рад};$$

4) определим значение прогиба подкладки; сечение $i = 0{,}03825$ м

$$Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)} = \int_0^{0{,}03825} \frac{qx^3}{6 \cdot EI(x)} =$$
$$= \frac{148636{,}4 \cdot (0{,}03825)^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 1{,}416667 \cdot 10^{-8}} -$$
$$- \frac{148636{,}4 \cdot (0)^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 1{,}416667 \cdot 10^{-8}} =$$
$$= 0{,}0000516 \text{ м}.$$

Таким образом рассчитаны параметры для каждого сечения. Аналогично произведены расчёты для нагрузок 10 и 15 т (табл. 1). Обобщённые результаты теоретического расчета прогибов рельсовой подкладки в сечениях 0,08275; 0,165; 0,24725 для рассматриваемых видов нагрузки приведены в табл. 2.

Практическое определение прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале

При лабораторных испытаниях вертикальные перемещения измерялись следующим образом: абсолютная линейная деформация фиксировалась испытательной машиной INSTRON SATEC 1200KN с отображением данных на

ТАБЛИЦА 1. Расчёт прогибов рельсовой подкладки

X_i, м	Q_i, н	M_i, н·м	$J(x)$, см	Θ_i, рад	Y_i, м
При нагрузке 5 т при q_i, н/м, 148636,4					
0,03825	5685,3	108,7321449		–0,009234	0,0000516
0,0765	11370,7	434,9285795		–0,003844	0,0008215
0,0765	11370,7	434,9285795		–0,003844	0,0008215
0,08275	12299,7	508,8983949	4,318885	–0,003839	0,0008215
0,089	13228,6	588,6743182		–0,003838	0,0008215
0,089	13228,6	588,6743182		–0,003838	0,0008215
0,127	18876,8	1198,677955	1,416667	–0,000480	0,0008261
0,165	24525,0	2023,3125		0,000000	0,0008945
0,165	–24525,0	2023,3125		0,000000	0,0008945
0,203	–18876,8	1198,677955	1,416667	0,000480	0,0008261
0,241	–13228,6	588,6743182		0,003838	0,0008215
0,241	–13228,6	588,6743182		0,003838	0,0008215
0,24725	–12299,7	508,8983949	4,318885	0,003839	0,0008215
0,2535	–11370,7	434,9285795		0,003844	0,0008215
0,2535	–11370,7	434,9285795		0,003844	0,0008215
0,29175	–5685,3	108,7321449	0,129094	0,009234	0,0000516
0,33	0	0		0,046800	0,0000000
При нагрузке 10 т при q_i, н/м, 297272,7					
0	0	0		–0,093599	0,0000000
0,03825	11370,7	217,4642898	0,129094	–0,018469	0,0001032
0,0765	22741,4	869,8571591		–0,007687	0,0016431
0,0765	22741,4	869,8571591		–0,007687	0,0016431
0,08275	24599,3	1017,79679	4,318885	–0,007678	0,0016431
0,089	26457,3	1177,348636		–0,007676	0,0016431
0,089	26457,3	1177,348636		–0,007676	0,0016431
0,127	37753,6	2397,355909	1,416667	–0,000960	0,0016522
0,165	49050,0	4046,625		0,000000	0,0017889
0,165	–49050,0	4046,625		0,000000	0,0017889
0,203	–37753,6	2397,355909	1,416667	0,000960	0,0016522
0,241	–26457,3	1177,348636		0,007676	0,0016431
0,241	–26457,3	1177,348636		0,007676	0,0016431
0,24725	–24599,3	1017,79679	4,318885	0,007678	0,0016431
0,2535	–22741,4	869,8571591		0,007687	0,0016431
0,2535	–22741,4	869,8571591		0,007687	0,0016431
0,29175	–11370,7	217,4642898	0,129094	0,018469	0,0001032
0,33	0	0		0,093599	0,0000000

Окончание табл. 1

X_i, м	Q_i, н	M_i, н·м	$J(x)$, см	Θ_i, рад	Y_i, м
При нагрузке 15 т при q_i, н/м, 445909,1					
0,03825	17056,0	326,1964347	0,129094	–0,027703	0,0001548
0,0765	34112,0	1304,785739		–0,011531	0,0024646
0,0765	34112,0	1304,785739	4,318885	–0,011531	0,0024646
0,08275	36899,0	1526,695185		–0,011516	0,0024646
0,089	39685,9	1766,022955		–0,011514	0,0024646
0,089	39685,9	1766,022955	1,416667	–0,011514	0,0024646
0,127	56630,5	3596,033864		–0,001439	0,0024783
0,165	73575,0	6069,9375		0,000000	0,0026834
0,165	–73575,0	6069,9375	1,416667	0,000000	0,0026834
0,203	–56630,5	3596,033864		0,001439	0,0024783
0,241	–39685,9	1766,022955		0,011514	0,0024646
0,241	–39685,9	1766,022955	4,318885	0,011514	0,0024646
0,24725	–36899,0	1526,695185		0,011516	0,0024646
0,2535	–34112,0	1304,785739		0,011531	0,0024646
0,2535	–34112,0	1304,785739	0,129094	0,011531	0,0024646
0,29175	–17056,0	326,1964347		0,027703	0,0001548
0,33	0	0		0,140399	0,0000000

ТАБЛИЦА 2. Обобщение результатов теоретического расчёта прогибов рельсовой подкладки для трёх сечений

Сечение подкладки	Приложенная нагрузка Р, т		
	5	10	15
0,08275	0,8215 мм	1,6431 мм	2,4646 мм
0,165	0,8945 мм	1,7889 мм	2,6834 мм
0,24725	08215 мм	1,6431 мм	2,4646 мм

графике зависимости нагрузки от удлинения (рис. 2). Также перемещения измерялись вертикальными стержнями, соединёнными с тензометрической станцией «Геркулес» (рис. 3). Схема приложения нагрузки к рельсовой подкладки соответствовала схеме теоретического расчета (см. рис. 1).

Профессор В. С. Лысюк [6–8] отметил, что при приложении нагрузки под рельсовой подкладкой волóкна деревянной шпалы уплотняются, при этом зона наиболее интенсивного смятия древесины занимает всю центральную часть площади подкладки. Во время лабораторного эксперимента фиксировалось смятие волокна древесины (рис. 4) и остаточное смятие волокна древесины деревянной шпалы после снятия приложенной нагрузки (рис. 5).

Принимая во внимание смятие волокна древесины [9], при приложении нагрузки расчёт вертикального перемещения сечений рельсовой подкладки на новой деревянной шпале будет складываться из двух составляющих: перемещения от изгиба подкладки относительно поверхности шпалы и величины

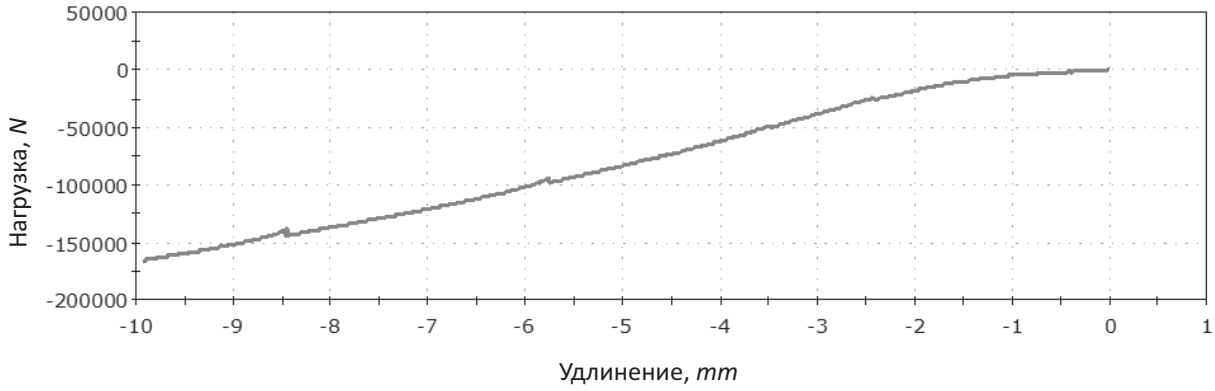


Рис. 2. Отображение данных испытательной машиной INSTRON SATEC 1200KN на графике зависимости нагрузки от удлинения

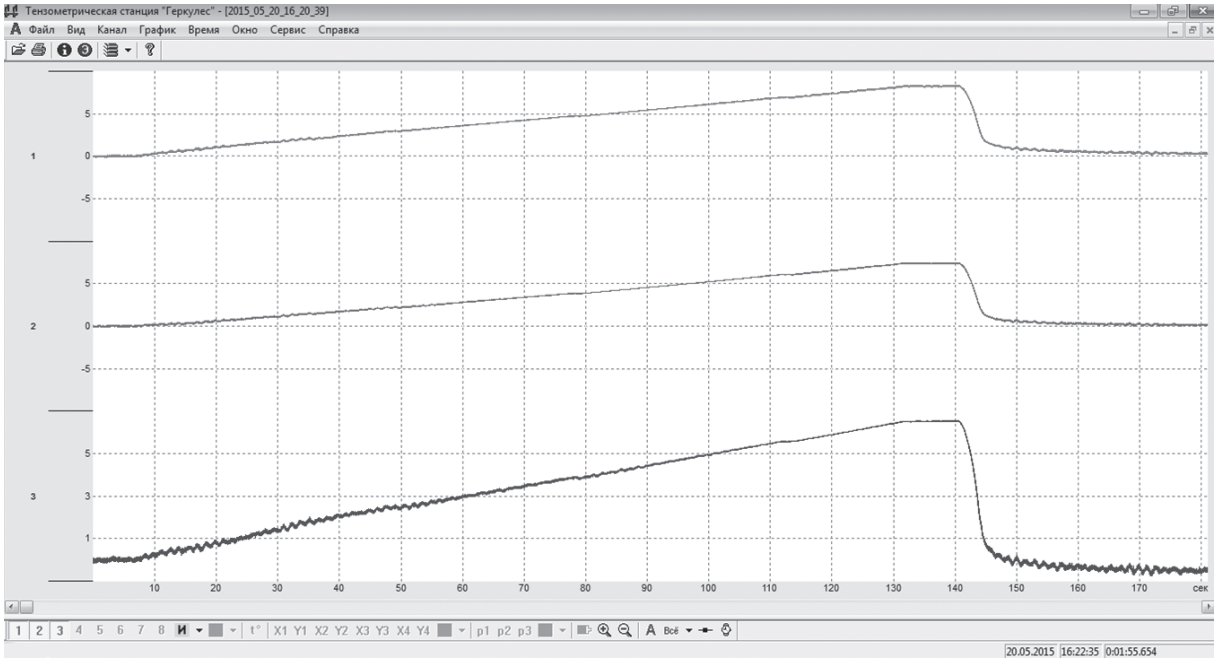


Рис. 3. График перемещения вертикальных стержней, фиксируемый тензометрической станцией «Геркулес», т. е. прогиб сечений рельсовой подкладки

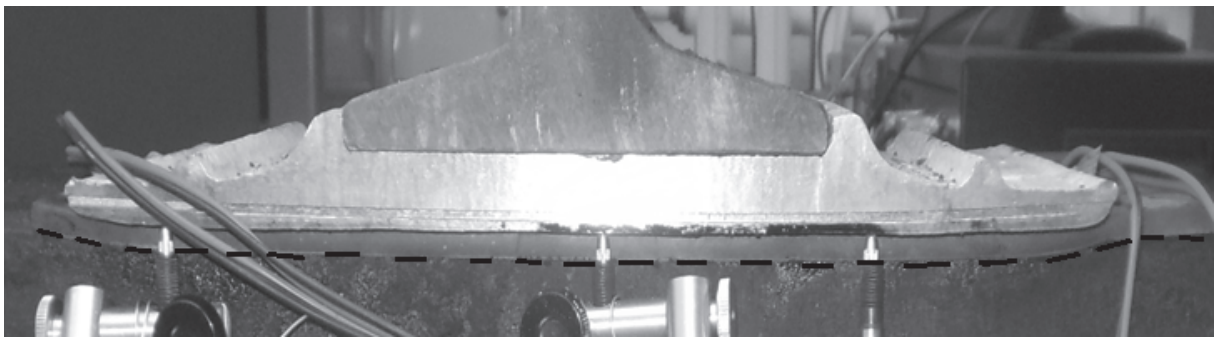


Рис. 4. Смятие волокна древесины деревянной шпалы

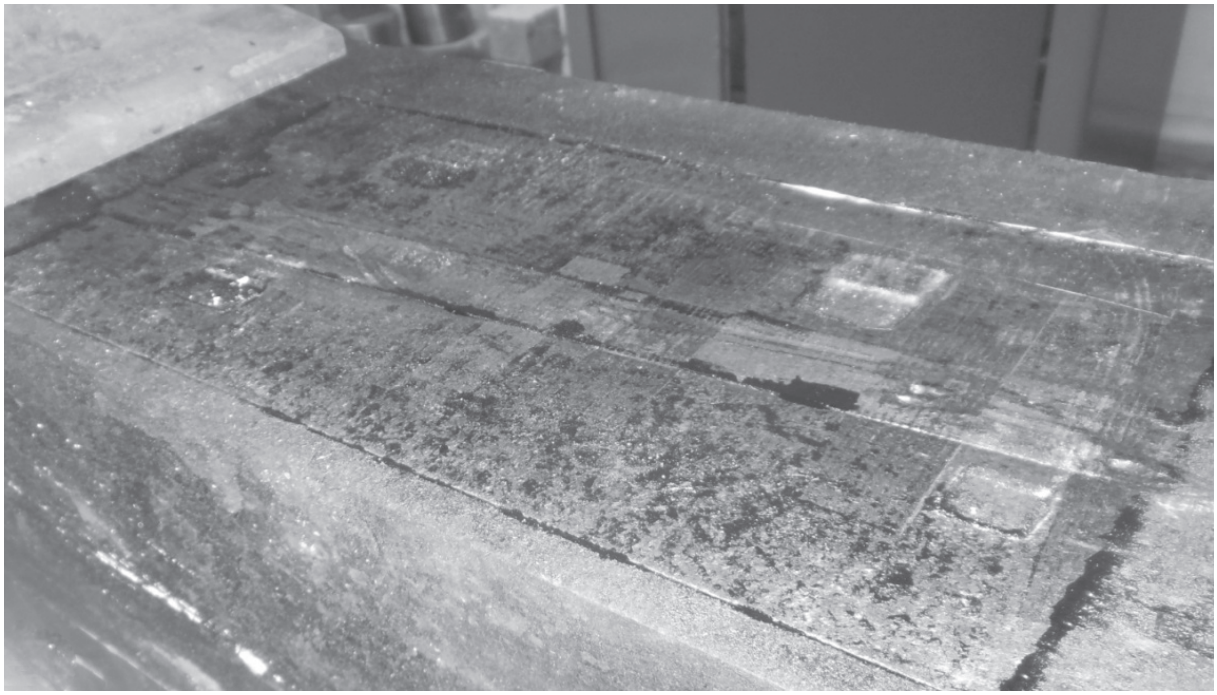


Рис. 5. Остаточное смятие волокна древесины деревянной шпалы после снятия приложенной нагрузки

совместной деформации изогнутой рельсовой подкладки и основания (волокна древесины шпалы) [11]. Также на величину перемещения влияли зазоры между неровностями поверхностей элементов используемых материалов при испытаниях (между шпалой и основанием, между головкой рельса и поверхностью пресса и т. д.) [14]. Обобщённые результаты прогибов рельсовой подкладки в сечениях 0,08275; 0,165; 0,24725 для всех приложенных видов нагрузки при лабораторных испытаниях рельсовой подкладки приведены в табл. 3.

При лабораторном испытании для фиксации величины прогиба рельсовой подкладки дополнительно промеряли ее штангенциркулем Electronic Digital Caliper. Измеряли расстояние между подошвой рельсовой подкладки и неподвижным основанием пресса испытательной машины в двух случаях: без приложения и с приложением нагрузки к рельсовой подкладке (5, 10 и 15 т). После вычисляли разницу между двумя измерениями, которая и являлась искомой величиной прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале при приложении нагрузки. Средние значения измеренного прогиба рельсовой подкладки для сечения 0,165 после обработки результатов [12] приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 3. Обобщение усреднённых результатов лабораторных испытаний прогибов рельсовой подкладки для трёх сечений на новой шпале

Нагрузка, т	Новая шпала, нагрузка по центру				Новая шпала с резиновой прокладкой, нагрузка по центру			
	1	2	3	Абс.	1	2	3	Абс.
5	2,4	1,8	2,0	3,5	3,0	2,2	2,5	3,7
10	5,5	4,6	4,5	6	5,8	5,1	5,1	6
15	7,6	6,8	6	9	5,7	5,0	5,0	9,5

ТАБЛИЦА 4. Обобщение усреднённых результатов лабораторных испытаний прогибов рельсовой подкладки для сечения 0,165, измеренных штангенциркулем на новой шпале

Сечение подкладки 0,165	Приложенная нагрузка *P*, т		
	5	10	15
Расчетное	0,9	1,8	2,7
Экспериментальное	1,4	1,9	2,3

Выводы

Теоретический метод расчета прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале позволяет корректно описать процесс прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале, что было доказано лабораторными испытаниями.

Полученные результаты вполне удовлетворительны. В теоретическом расчете учитывался прогиб подкладки без учета сжатия поперечных волокон древесины шпалы под нагрузкой. В лабораторном испытании величину сжатия волокна древесины не измеряли. В дальнейшем для расчета нужны теоретические исследования деформации основания. Кроме того, для учета необходимы экспериментальные исследования прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале в зависимости от вогнутой формы древесины под подкладкой (т. е. на деревянной шпале, имеющий износ древесины в зоне рельсовой подкладки).

Библиографический список

1. Абросимов В. И. Расчет стрелочной подкладки на прочность / В. И. Абросимов, Л. Н. Фролов, А. И. Лисков // Труды ЛИИЖТа. – 1969. – Вып. 296.

2. Елизаров С. В. Сопротивление материалов : базовый курс лекций / С. В. Елизаров, Ю. П. Каптелин. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2007. – 254 с.

3. Исследование деревянных шпал и скреплений для них / под ред. Г. М. Шахунянца // Труды МИИТа. – 1968. – Вып. 272.

4. Исследование работы подкладок стрелочных переводов при осевых нагрузках 30–50 тонн : науч.-техн. отчёт по теме № 22/(20–72) / Архив Ленпромтранспроект, инв. № 2783-73. – Л., 1973.

5. Колтаков А. В. Расчёт прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале / А. В. Колтаков, Н. Н. Султанов // Транспорт : наука, техника, управление. – 2012. – Вып. 4. – С. 47–49.

6. Лысюк В. С. Износ деревянных шпал и борьба с ним / В. С. Лысюк // Труды ВНИИЖТ. – 1971. – Вып. 445.

7. Лысюк В. С. Причины ослабления деревянных шпал в зонах рельсовой подкладок / В. С. Лысюк // Вестн. ЦНИИ. – 1961. – № 7.

8. Лысюк В. С. Прокладки защищают шпалы / В. С. Лысюк, Л. С. Лапкина, А. В. Каширин // Путь и путевое хозяйство. – 1966. – Вып. 12.

9. Павлов А. П. Местное смятие древесины / А. П. Павлов // Труды ЛИИЖТа. – 1956. – Вып. 150.

10. Першин С. П. Расчет рельсовых подкладок для деревянных шпал / С. П. Першин // Труды МИИТа. – 1968. – Вып. 272. – С. 46–61.

11. Попов В. В. Гниение шпал в пути и меры борьбы с ним / В. В. Попов // Труды ВНИИЖТ. – 1967. – Вып. 329.

12. Румшиский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшиский. – М. : Наука, 1971.

13. Снитко Н. К. Теория и расчет балок на упругом основании переменного сечения / Н. К. Снитко // Вестн. инженеров и техников. – 1935. – Вып. 8.

14. Титов В. П. Перемещения и деформации в конструкциях железнодорожного пути / В. П. Титов // Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – № 6. – С. 8–16.

15. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : Наука, 1980.

References

1. Abrosimov V. I., Frolov L. N. & Liskov A. I. Raschet strelochnoy podkladki na prochnost [Strength Calculation of Switch Plate]. *Trudy LIIZhTa – Proc. of Leningrad Railway Transp. Eng. Inst.*, 1969, Is. 296.

2. Yelizarov S. V. & Kaptelin Yu. P. Soprotivleniye materialov: bazovyy kurs lektsiy [Resistance of Materials: Basic Lecture Course]. St. Petersburg, PGUPS, 2007. 254 p.

3. Issledovaniye derevyannykh shpal i skrepleniy dlya nikh [Study of Wooden Sleepers and Clamps for Them]; ed. G. M. Shakhunyants. *Trudy MIITa – Proc. of MIIT*, 1968, Is. 272.

4. Issledovaniye raboty podkladok strelochnykh perevodov pri osevykh nagruzkakh 30–50 tonn [Study into Operation of Switch Plates under Axial Loads of 30–50 Tonnes]. Scientific and engineering report on the subject N 22/(20–72). Lenpromtransproyekt archive, inv. N 2783-73. Leningrad, 1973.

5. Koltakov A. V. & Sultanov N. N. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transport: Science, Engineering, Management*, 2012, Is. 4, pp. 47-49.

6. Lysyuk V. S. Iznos derevyannykh shpal i borba s nim [Wooden Sleeper Wear and Fight against It]. *Trudy VNIIZhTa – Proc. of VNIIZhT*, 1971, Is. 445.

7. Lysyuk V. S. Prichiny oslableniya derevyannykh shpal v zonakh relsovykh podkladok [Causes of Degeneration of Wooden Sleepers in Rail Plate Zone]. *Vestnik TsNII – TsNII Bull.*, 1961, no. 7.

8. Lysyuk V. S., Lapkina L. S. & Kashirin A. V. Prokladki zashchishchayut shpaly [Plates Protect Sleepers]. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 1966, Is. 12.

9. Pavlov A. P. Mestnoye smyatiye drevesiny [Wood Buckling]. *Trudy LIIZhTa – Proc. of Leningrad Railway Transp. Eng. Inst.*, 1956, Is. 150.

10. Pershin S. P. Raschet relsovykh podkladok dlya derevyannykh shpal [Calculations of Rail Plates for Wooden Sleepers]. *Trudy MIITa – Proc. of MIIT*, 1968, Is. 272, pp. 46-61.

11. Popov V. V. Gniyeniye shpal v puti i mery borby s nim [Rotting of Sleepers on the Tracks and Measures to Fight against It]. *Trudy VNIIZhTa – Proc. of VNIIZhT*, 1967, Is. 329.

12. Rumshiskiy L. Z. Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta [Mathematical Processing of Experimental Results]. Moscow, Nauka, 1971.

13. Snitko N. K. Teoriya i raschet balok na uprugom osnovanii peremennogo secheniya [Theory and Calculation of Beams on Elastic Cushion of Variable Cross-Section]. *Vestnik inzhenerov i tekhnikov – Eng. and Tech. Bull.*, 1935, Is. 8.

14. Titov V. P. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bull.*, 1994, no. 6, pp. 8-16.

15. Tikhonov A. N., Vasilyeva A. B. & Sveshnikov A. G. Differentsialnyye uravneniya [Differential Equations]. Moscow, Nauka, 1980.

ЧУСОВИТИН Максим Сергеевич – аспирант, chusmaksimus@mail.ru, *МАЛЫШЕВ Константин Сергеевич – аспирант, m_kostya88@mail.ru. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.72

С. О. Вихарев, Е. Т. Мирончиков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ, УСТОЙЧИВЫХ К АТАКЕ «ВЫРЕЗАНИЕ»

Дата поступления: 09.06.2016
Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Показать эффективность методики построения цифровых водяных знаков, устойчивых к атаке «вырезание». **Методы:** Используемые в статье методы относятся к области теории информации и стеганографии. **Результаты:** Представлены результаты имитационного моделирования методики построения цифровых водяных знаков на основе БЧХ-синхрокодов; пример встраивания в цифровой аудиосигнал предлагаемых водяных знаков, а также пример их выделения даже после удаления из аудиосигнала некоторых случайных отсчётов. **Практическая значимость:** Представленные в статье цифровые водяные знаки можно использовать в качестве средства для внедрения дополнительной информации в цифровой аудиосигнал, так что даже после атаки «вырезание» на аудиосигнал с предлагаемыми цифровыми водяными знаками остаётся возможность восстановить внедрённую информацию.

БЧХ-код, синхронизация, цифровой водяной знак, цифровой аудиосигнал, атака «вырезание».

***Sergy O. Vikharev**, postgraduate student, vso9@yandex.ru; **Yevgeniy T. Mironchikov**, D. Sci. (Eng.), professor (Petersburg State Transport University) EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A METHOD FOR BUILDING DIGITAL WATERMARKS RESISTANT TO CUTTING ATTACK

Objective: To demostrate efficiency of a method for building digital watermarks resistant to cutting attacks. **Methods:** Methods applied in the paper fall within the domain of information theory and steganography. **Results:** Results of simulation modelling of a method for building digital watermarks based on BCH-codes are presented, as are an example of building proposed watermarks into digital audio signal, and an example of their extraction even after some accidental counts were removed from audio signal. **Practical importance:** Digital watermarks proposed in the paper can be used as a means for introducing additional information into digital audio signal, thus even after a cutting attack on audio signal with proposed digital watermarks it is still possible to recover embedded information.

BCH-code, synchronization, digital watermark, digital audio signal, cutting attack.

Цифровые аудиосигналы как объекты, содержащие аудиоинформацию, могут иметь большую ценность. Так, они могут представлять собой результат работы музыкантов и певцов и удовлетворять эстетические потребности людей. Или быть вместилищем информации для работы, например, секретарей, журналистов, следователей, работников служб безопасности и т. д.

Рассмотрим два вида аудиоинформации: музыкальную и речевую. Общая цель – встроить цифровой водяной знак (ЦВЗ) в аудио-

контейнер для борьбы с атакой «вырезание» [9–11]. Эта атака представляет собой удаление некоторой доли отсчётов из цифрового аудиосигнала, в результате чего теряется возможность восстановить встроенную информацию [12, 14]. При этом ЦВЗ не должен быть слышимым [7]. Другими словами, отношение сигнал/шум должно удовлетворять порогам слышимости [6, 13].

Для достижения этой цели нужно разработать систему встраивания и извлечения информационных синхросигналов в аудиосигнал [2, 3]. При этом информационные синхросигналы, представляя собой ЦВЗ, должны быть устойчивыми к атаке «вырезание».

Атака «вырезание» может привести к тому, что некоторые элементы информационных синхросигналов будут утеряны. Вследствие этого возникает сбой синхронизации. Предлагаемые в работе ЦВЗ обладают устойчивостью к сбоям синхронизации, а именно позволяют определить, сколько элементов от информационного синхросигнала осталось.

Различают два вида сбоев синхронизации: потерю синхронизации, когда теряется начало информационного синхросигнала; избыток синхронизации, когда теряется конец информационного синхросигнала.

Процессы встраивания и выделения ЦВЗ в аудиосигнал

В качестве основы для информационных синхросигналов рекомендуется использовать синхрокоды на основе БЧХ-кодов, так как они хорошо изучены, просты и дешевы для применения в аппаратуре [1, 4, 5].

Для эксперимента используется двоичный БЧХ-код со следующими параметрами: длина кодового слова 63, количество информационных символов 30. Порождающий полином

$$g(x) = 1 + x + x^2 + x^5 + x^6 + x^8 + \\ + x^9 + x^{11} + x^{13} + x^{14} + x^{15} + x^{20} + \\ + x^{22} + x^{23} + x^{26} + x^{27} + x^{28} + x^{29} + \\ + x^{30} + x^{32} + x^{33}.$$

Однако перед встраиванием БЧХ – кодового слова выполняется преобразование, операции которого позволяют получить кодовые слова так называемых синхрокодов. Благодаря синхрокодам можно определить величину и вид сбоя синхронизации. Синхрокодовые слова строятся путём прибавления специального полинома, который называется смещающим. В нашем случае таким полиномом будет $p(x) = x + 1$. Синхрокод с такими параметрами позволяет определить величину сдвига синхронизации вплоть до

$$r_c = \left[\frac{n-k-s-1}{2}\right] = 15,$$

где $s = 1$ – степень смещающего полинома; $n = 63$ – длина кодового слова синхрокода; $k = 30$ – количество информационных символов в синхрокодовом слове. При этом следует учесть, что сложение не выполняется напрямую с самим смещающим полиномом. Вместо это смещающий полином масштабируется полиномом $1/x$, а уже результат масштабирования складывается с БЧХ – кодовым словом. Но в нашем случае в качестве масштабирующего полинома следует использовать полином, который является обратным к полиному x^{-1} по модулю порождающего полинома $g(x)$ над полем $GF(2)$, т. е. полином

$$w(x) = 1 + x + x^4 + x^5 + x^7 + x^8 + \\ + x^{10} + x^{12} + x^{13} + x^{14} + x^{19} + x^{21} + \\ + x^{22} + x^{25} + x^{26} + x^{27} + x^{28} + x^{29} + x^{31} + x^{32}.$$

Атака «вырезание» в общем случае может быть предпринята на любую часть аудиосигнала. Следовательно, чтобы вполне использовать свойство предлагаемых ЦВЗ, быть устойчивыми к сбоям синхронизации, их элементы следует встраивать в каждый отчёт аудиосигнала.

Наиболее распространённым методом встраивания информации в аудиосигнал является изменение младших битов числовых значений отсчётов аудиосигнала. Так, в [8] предлагается следующий подход. Предполо-

жим, что ЦВЗ представляет собой двоичный вектор

$$\mathbf{c} = (c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_N),$$

где $c_i \in \{0,1\}$, а сам аудиосигнал представлят собой вектор

$$\mathbf{y} = (y_1 \quad y_2 \quad \cdots \quad y_N),$$

где $y_i \in \{0,1,\ldots,2^{16}-1\}$. Тогда числовое значение каждого элемента вектора **y** заменяется на числовое значение по следующему правилу:

$$y_i' = \begin{cases} \left\lfloor \dfrac{y_i}{S} \right\rfloor \cdot S + \dfrac{3S}{4}, & \text{если } c_i = 1, \\ \left\lfloor \dfrac{y_i}{S} \right\rfloor \cdot S + \dfrac{S}{4}, & \text{если } c_i = 0, \end{cases}$$

где $\lfloor \ \rfloor$ – операция «пол»; S – «сила» встраивания. Величина S ограничена порогом слышимости. Процесс выделения встроенных двоичных символов выполняется следующим образом [15]:

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{если } y_i' - \left\lfloor \dfrac{y_i'}{S} \right\rfloor \cdot S \geq \dfrac{S}{2}, \\ 0, & \text{если } y_i' - \left\lfloor \dfrac{y_i'}{S} \right\rfloor \cdot S < \dfrac{S}{2}, \end{cases}$$

Покажем на примере процедуру встраивания и выделения. Пусть

$$\mathbf{y} = (1000 \quad 1100 \quad \cdots \quad 7200).$$

Если «сила» встраивания S = 32, а ЦВЗ представляет собой полином

$$c_1(x) = (x^{33} m(x) - r(x) + w(x)p(x)) \bmod 2,$$

где $m(x) = \sum_{i=0}^{29} x^i$; $r(x)$ – остаток от деления x^{33} $m(x)$ на $g(x)$. В векторном виде получается

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_1 = (&1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \\ &1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \\ &1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \\ &1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \\ &1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \\ &1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \\ &0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \\ &1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \\ &0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0). \end{aligned}$$

Тогда аудиосигнал **y** после встраивания будет таким:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' = (&1016 \quad 1112 \quad 1208 \quad 1304 \quad 1400 \quad 1496 \quad 1624 \\ &1720 \quad 1816 \quad 1912 \quad 2008 \quad 2104 \quad 2200 \quad 2296 \\ &2424 \quad 2520 \quad 2616 \quad 2712 \quad 2808 \quad 2904 \quad 3000 \\ &3096 \quad 3224 \quad 3320 \quad 3416 \quad 3512 \quad 3608 \quad 3704 \\ &3800 \quad 3880 \quad 4024 \quad 4104 \quad 4200 \quad 4312 \quad 4408 \\ &4504 \quad 4600 \quad 4680 \quad 4824 \quad 4904 \quad 5016 \quad 5096 \\ &5192 \quad 5288 \quad 5400 \quad 5496 \quad 5624 \quad 5704 \quad 5816 \\ &5912 \quad 5992 \quad 6088 \quad 6184 \quad 6280 \quad 6424 \quad 6504 \\ &6600 \quad 6712 \quad 6792 \quad 6904 \quad 6984 \quad 7096 \quad 7208). \end{aligned}$$

Процесс выделения встроенной информации можно рассматривать как состоящий из двух стадий: выполнение указанных арифметических действий – первая; вынесение решения – вторая. Результат первой стадии для рассматриваемого случая представляет собой вектор следующего вида:

(24 24 24 24 24 24 24
24 24 24 24 24 24 24
24 24 24 24 24 24 24
24 24 24 24 24 24 24
24 8 24 8 8 24 24
24 24 8 24 8 24 8
8 8 24 24 24 8 24
24 8 8 8 8 24 8
8 24 8 24 8 24 8).

Видно, что после второй стадии – принятия решения – будет получен встроенный вектор. При такой «силе» встраивания изменению подвергаются пять младших разрядов.

Пример определения вида и величины сбоя синхронизации

Наиболее важной характеристикой системы, устойчивой к атаке «вырезание», является величина допустимого сбоя синхронизации. Для приведённого примера допустимой величиной сбоя синхронизации является r_c = = 15. Убедимся в этом. Определение произошедшей величины сбоя синхрониации требует наличия хотя бы двух ЦВЗ. В качестве второго ЦВЗ используем полином

$$c_2(x) = (x^{33}m(x) - r(x) + w(x)p(x)) \bmod 2,$$

где $m(x) = \sum_{i=3}^{29} x^i$, который в векторной форме имеет вид

$\mathbf{c_2}$ = (1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 0
0 1 1 1 0 1 1
0 0 1 0 1 1 0
1 0 1 0 0 0 0
1 0 0 1 1 1 1
1 0 1 0 0 0 1).

Предположим, что аудиосигнал теперь представляет собой вектор

$$\mathbf{y} = \begin{matrix}(1000 & 1100 & \ldots & 7200 \\ 7300 & 7400 & \ldots & 13\,500).\end{matrix}$$

Тогда аудиосигнал **y** после последовательного встраивания векторов $\mathbf{c_1}$ и $\mathbf{c_2}$ станет таким:

y' = (1016 1112 1208 1304 1400 1496 1624
1720 1816 1912 2008 2104 2200 2296
2424 2520 2616 2712 2808 2904 3000
3096 3224 3320 3416 3512 3608 3704
3800 3880 4024 4104 4200 4312 4408
4504 4600 4680 4824 4904 5016 5096
5192 5288 5400 5496 5624 5704 5816
5912 5992 6088 6184 6280 6424 6504
6600 6712 6792 6904 6984 7096 7208
7320 7416 7512 7608 7704 7800 7896
8024 8120 8216 8312 8408 8504 8600
8696 8824 8920 9016 9112 9208 9304
9400 9496 9624 9720 9816 9912 9992
10088 10200 10296 10424 10504 10616 10712
10792 10888 11000 11080 11224 11320 11400
11512 11592 11704 11784 11880 12008 12104
12216 12296 12392 12504 12600 12696 12824
12920 13000 13112 13192 13288 13384 13496).

Если атака «вырезание» привела к тому, что были потеряны первые три отсчёта, то после выделения встроенной информации вместо первого ЦВЗ будет получен вектор

$$\mathbf{c'} = (1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 0\ \ 1$$
$$0\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 0$$
$$1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 0\ \ 0$$
$$0\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ 1\ \ 0$$
$$1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 1).$$

Полином, по которому определяется величина и вид сбоя синхронизации для полученного вектора $\mathbf{c}'$, следующий:

$$r(x) = ((x^{r_c+1}(c'(x) -$$
$$- w(x)p(x))) \bmod g(x)) \bmod 2 =$$
$$= x^{19} + x^{18} + x^{16} + x^{15}.$$

Так как $19 > r_c + s$, видно, что произошла потеря синхронизации в $3 = 19 - r_c - s$ символа.

Теперь рассмотрим случай, когда в результате атаки «вырезание» утеряны пять последних отсчётов аудиосигнала $\mathbf{y}'$. В этом случае вместо второго кодового слова будет получен вектор

$$\mathbf{c'} = (0\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 0\ \ 0\ \ 1$$
$$1\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 0\ \ 0$$
$$1\ \ 0\ \ 1\ \ 1\ \ 0\ \ 1\ \ 0$$
$$1\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 1\ \ 0$$
$$0\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 0).$$

Получаем соответствующий полином:

$$r(x) = ((x^{r_c+1}(c'(x) -$$
$$- w(x)p(x))) \bmod g(x)) \bmod 2 =$$
$$= x^{16} + x^{14} + x^{12} + x^{10}.$$

Так как $10 < r_c$, видно, что произошел избыток синхронизации в $5 = r_c - 10$ символов. Полином $r(x)$ зависит от формы представления ЦВЗ. Так, он может отличаться у систематического и несистематического представления кодового слова БЧХ-кода. Однако результат оценки величины сбоя и вида синхронизации совпадают.

В общем случае предлагаемый ЦВЗ позволяет определить величину и вид сбоя синхронизации вплоть до потери количества символов в начале или в конце ЦВЗ, равного r_c.

Результаты имитационного моделирования

Важной характеристикой ЦВЗ, ориентированных на атаку «вырезание», является зависимость вероятности ошибки восстановления встроенной в ЦВЗ информации от доли удаляемых вырезанием отсчётов. Если позиции удаляемых отсчётов равномерно распределены по всей длине вектора, описывающего цифровой аудиосигнал, то для рассмотренного выше ЦВЗ, основанного на (63,30) БЧХ-коде, эта характеристика более сложна (см. таблицу).

Зависимость вероятности ошибки восстановления встроенной в ЦВЗ информации от доли удаляемых вырезанием отсчётов

Доля отсчётов аудиосигнала с ЦВЗ, подвергшихся атаке «вырезание»	Вероятность восстановления хранимой в ЦВЗ информации
0	1
0,01	0,52
0,02	0,27
0,03	0,16
0,04	0,09
0,05	0,04
0,06	0,02
0,07	0,01
0,08	0,009
0,09	0,004
0,1	0,002

Заключение

Рассмотрены процедуры создания ЦВЗ, устойчивых к сбоям синхронизации, вызванным атакой «вырезание», проведённой на случайные отсчёты аудиосигнала. Результаты имитационного моделирования показали, что предлагаемые ЦВЗ позволяют восстановить с положительной вероятностью встроенную в ЦВЗ информацию даже при доле удалённых отсчётов, равной 0,1.

Библиографический список

1. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования : моногр. / Э. Берлекэмп – М. : Мир, 1971. – 479 с.

2. Вихарев С. О. Методика построения цифровых водяных знаков, устойчивых к сбоям синхронизации / С. О. Вихарев, Е. Т. Мирончиков, М. В. Гофман // Изв. ПГУПС. – 2016. – Т. 13, Вып. 1 (46). – С. 60–67.

3. Вихарев С. О., Мирончиков Е. Т., Гофман М. В. Свидетельство № 2016615347 от 20 мая 2016 г. о государственной регистрации программы для ЭВМ «Компьютерная модель оценки вероятности устойчивости цифровых водяных знаков, встроенных в аудиосигналы, к сбоям синхронизации, вызванным атакой «вырезание».

4. Золотарёв В. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы : справ. / В. В. Золотарёв, Г. В. Овечкин ; под. ред. чл.-корр. РАН Ю. Б. Зубарева. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.

5. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки : моногр. / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М. : Мир, 1976. – 594 с.

6. Bender W. Techniques for data hiding / W. Bender et al. // IBM Syst. J. – 1996. – Т. 35, № 3.4. – P. 313–336.

7. Boney L. Digital watermarks for audio signals / L. Boney, A. H. Tewfik, K. N. Hamdy // Proc. Third IEEE Int. Conf. Multimedia Computing and Systems, 1996. – IEEE, 1996. – P. 473–480.

8. Chen B. Quantization index modulation methods for digital watermarking and information embedding of multimedia / B. Chen, G. W. Wornell // J. VLSI Sig. Proc. Syst. Sig., Image and Video Technol. – 2001. – Т. 27, № 1–2. – P. 7–33.

9. Chen N. A robust zero-watermarking algorithm for audio / N. Chen, J. Zhu // EURASIP J. Adv. Sig. Proc. – 2008. – Т. 2008. – P. 103.

10. Cox I. J. Digital watermarking / I. J. Cox et al. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002. – Т. 1558607145.

11. Digital Audio Watermarking Techniques and Technologies: Applications and Benchmarks / ed. N. Cvejic. – IGI Global, 2007.

12. Steinebach M. StirMark benchmark: audio watermarking attacks / M. Steinebach et al. // Proc. Int. Conf. Inf. Technol. : Coding and Computing, 2001. – IEEE, 2001. – P. 49–54.

13. Swanson M. D. Robust audio watermarking using perceptual masking / M. D. Swanson et al. // Signal Proc. – 1998. – Т. 66, № 3. – P. 337–355.

14. Voloshynovskiy S. Attacks on digital watermarks: classification, estimation based attacks, and benchmarks / S. Voloshynovskiy et al. // IEEE Commun. Mag. – 2001. – Т. 39, № 8. – P. 118–126.

15. Wu S. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission / S. Wu et al. // IEEE Trans. Broadcast. – 2005. – Т. 51, № 1. – P. 69–76.

References

1. Berlekemp E. Algebraicheskaya teoriya kodirovaniya: monografiya [Algebraic Coding Theory: A Monograph]. Moscow, Mir, 1971. 479 p.

2. Vikharev S. O., Mironchikov Ye. T. & Gofman M. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ*., 2016, T. 13, Is. 1 (46), pp. 60-67.

3. Vikharev S. O., Mironchikov Ye. T. & Gofman M. V. Certificate No. 2016615347, issued on May 20, 2016, On State Registration of Computer Program „Computer Model of Probability Assessment of Resistance of Digital Watermarks Built into Audio Signal to Synchronisation Errors Caused by Cutting Attack“.

4. Zolotarev V. V. & Ovechkin G. V. Pomekhoustoychivoye kodirovaniye. Metody i algoritmy: spravochnik [Noiseless Coding. Methods and Algorithms: Reference Book]; ed. Russian Academy of Sciences

corresponding member PAH Yu. B. Zubarev. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom, 2004. 126 p.

5. Piterson U. & Ueldon E. Kody, ispravlyayushchiye oshibki: monografiya [Error-Correcting Codes: A Monograph]. Moscow, Mir, 1976. 594 p.

6. Bender W. et al. Techniques for data hiding. *IBM Syst. J.*, 1996, T. 35, no. 3.4, pp. 313-336.

7. Boney L., Tewfik A. H. & Hamdy K. N. Digital watermarks for audio signals. *Proc. Third IEEE Int. Conf. Multimedia Computing and Systems*, 1996. IEEE, 1996. Pp. 473–480.

8. Chen B. & Wornell G. W. Quantization index modulation methods for digital watermarking and information embedding of multimedia. *J. VLSI Sig. Proc. Syst. Sig., Image and Video Technol.*, 2001, T. 27, no. 1-2, pp. 7-33.

9. Chen N. & Zhu J. A robust zero-watermarking algorithm for audio. *EURASIP J. Adv. Sig. Proc.*, 2008, T. 2008, pp. 103.

10. Cox I. J. et al. Digital watermarking. San Francisco, Morgan Kaufmann, 2002. T. 1558607145.

11. Digital Audio Watermarking Techniques and Technologies: Applications and Benchmarks; ed. N. Cvejic. IGI Global, 2007.

12. Steinebach M. et al. StirMark benchmark: audio watermarking attacks. *Proc. Int. Conf. Inf. Technol.: Coding and Computing*, 2001. IEEE, 2001. Pp. 49-54.

13. Swanson M. D. et al. Robust audio watermarking using perceptual masking. *Signal proc.*, 1998, T. 66, no. 3, pp. 337-355.

14. Voloshynovskiy S. et al. Attacks on digital watermarks: classification, estimation based attacks, and benchmarks. *IEEE Commun. Mag.*, 2001, T. 39, no. 8, pp. 118-126.

15. Wu S. et al. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission. *IEEE Trans. Broadcast.*, 2005, T. 51, no. 1, pp. 69-76.

Благодарность

Авторы благодарят за помощь в организации и проведении имитационного моделирования к.т.н. М. В. Гофмана, доцента кафедры «Информатика и информационная безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

*ВИХАРЕВ Сергей Олегович – аспирант, vso9@yandex.ru; МИРОНЧИКОВ Евгений Тимофеевич – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.233.22

В. В. Гарбарук, В. Н. Фоменко

УЧЕТ АПРИОРНОЙ ИНФОРАЦИИ О ПАРАМЕТРЕ В МЕТОДЕ НАИБОЛЬШЕГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Дата поступления: 15.05.2016
Решение о публикации: 16.06.2016

Цель: Создать вероятностную модель, в которой параметры распределения рассматриваются как компоненты случайного вектора, в рамках этой модели построить состоятельные статистические оценки параметров распределения генеральной совокупности, которые учитывали бы априорную информацию об исследуемых величинах. **Методы:** Применены такие теории вероятностей и математической статистики, как апостериорная оценка гипотез по методу Байеса, метод наибольшего правдоподобия, частные и условные распределения, теория статистического оценивания параметров распределения. Все исследование проводится в рамках стандартной системы аксиом теории вероятностей. **Результаты:** Даны точечные оценки параметров, обладающие большей эффективностью, чем стандартные оценки. Под эффективностью оценки в работе понимается отношение среднего квадрата отклонения предложенной статистики и стандартной эффективной статистики от оцениваемого параметра. Получены общие выражения, определяющие как локальную (при заданном значении параметра), так и интегральную (средневзвешенную по априорному распределению параметра) эффективность полученных оценок. На примере математического ожидания нормально распределенной генеральной совокупности вычисляется эффективность при априорном нормальном и гамма-распределении математического ожидания. Показано, что полученные оценки имеют более высокую точность, чем стандартные «эффективные» оценки. Результаты, относящиеся к эффективности оценок, проиллюстрированы графически. **Практическая значимость:** Повышается точность статистических методов исследования в случае, когда объем эмпирических данных невелик. В частности, предложенный подход может оказаться полезным при проведении дорогостоящих экспериментов, некоторых видов опросов внутри небольших групп населения.

Математическая статистика, параметр распределения, точечная оценка, нормальное распределение, гамма-распределение, байесовская оценка, априорная информация.

Viktor V. Garbaruk, Cand. Sci. (Eng.), professor, vmkaf@pgups.ru; ***Viktor N. Fomenko**, Dr. Sci. (Phys.-math.), professor, vfomenko1943@gmail.com (Petersburg State Transport University) TAKING INTO ACCOUNT A PRIORI INFORMATION ON PARAMETER IN MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD

Objective: To create a probability model in which distribution parameters are considered as components of random vector, to build consistent statistical estimates for statistical population distribution parameters within the framework of this model capable of accounting for a priori information on parameters under study. **Methods:** Probability and mathematical statistics theories were applied, including a posteriori hypothesis estimate by Bayes' method, maximum-likelihood method, marginal and conditional distributions, distribution parameter estimation theory. The entire study is being carried out within the framework of standard axioms system of probability theory. **Results:** Point estimates of parameters were provided, possessing higher degree of efficiency than standard estimates. In this study, estimate efficiency is understood as mean-square ratio of deviation of proposed statistics and standard efficient statistic from the estimated parameter. Common expressions were obtained, determining both local

(with set parameter value) and integral (weighted average by a priori distribution of a parameter) efficiency of estimates obtained. On the example of mathematical expectation of normally distributed statistical population, efficiency is calculated for a priori normal and gamma-distribution of mathematical expectation. The estimates obtained were demonstrated to be more accurate than standard "efficient" estimates. Results concerning estimate efficiency were graphically illustrated. **Practical importance:** Accuracy of statistical study methods is increased in case when the size of empirical data is small. The proposed approach can be useful when conducting expensive experiments or certain types of polls amongst small groups of population.

Mathematical statistics, distribution parameter, point estimate, normal distribution, gamma-distribution, Bayes estimate, a priori information.

При статистическом оценивании параметров априорная информация о них, как правило, не принимается во внимание [5, 7–9]. Это не очень существенно, если оценка основывается на выборке большого объема, которая содержит достаточную информацию о параметре, и сама может использоваться для создания или уточнения базы априорной информации. Однако при малом объеме опытных данных учет априорных знаний может существенно увеличить надежность и точность оценки. Важность данного аспекта подчеркивалась в нескольких работах в области математической статистики (см., например, [1, 2]). Изложенный подход основывается на байесовской оценке апостериорных вероятностей событий, причем в качестве последних рассматриваются события, предполагающие, что параметр распределения принимает некоторое значение. При этом вероятностное пространство никак не переопределяется. Очевидно, такая трактовка параметра распределения как случайной величины некорректна.

В данной работе мы вводим вероятностное пространство случайных векторов, одной из компонент которого является параметр распределения. Основной объект рассмотрения в нашем подходе – двумерный случайный вектор $\Xi = (\gamma, \xi)$. Плотность распределения вектора Ξ задается функцией $h(g,x)$, где g рассматривается как параметр распределения ξ. Функция $p(g) = \int h(g,x)dx$ устанавливает распределение параметра в отсутствие результатов измерений ξ (априорное распределения параметра).

Введем в рассмотрение плотность условного распределения [9, 14, 15]

$$f(x \mid g) = \frac{h(g,x)}{p(g)}.$$

Результат серии n измерений вектора Ξ представляется совокупностью из $n+1$ случайной величины:

$$(\gamma, \xi_1, \ldots, \xi_n),$$

где $\xi_1, \ldots, \xi_n$ – взаимно независимые случайные величины с той же плотностью распределения $f(x|\gamma)$, что и у генеральной совокупности ξ, γ играет роль параметра распределения случайной величины ξ.

Точечная оценка параметра

Если $\varphi(x_1, ..., x_n; g)$ – плотность распределения выборки [11–15], то

$$\varphi(x_1, \ldots, x_n; g) = p(g)\prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g);$$

$$\ln\varphi(x_1, \ldots, x_n; g) = \tag{1}$$

$$= \ln p(g) + \sum_{i=1}^{n} \ln f(x_i \mid g).$$

Определим условную плотность распределения выборки при заданном параметре

$$\omega(x_1, \ldots, x_n; g) =$$

$$= \frac{\varphi(x_1, \ldots, x_n; g)}{p(g)} = \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g) \tag{2}$$

и условную плотность распределения параметра γ при заданной выборке

$$\psi(x_1,\ldots,x_n;g)=\frac{\varphi(x_1,\ldots,x_n;g)}{\int\varphi(x_1,\ldots,x_n;g')dg'}.$$

Пусть g_n – стационарная точка плотности $\varphi(x_1, ..., x_n; g)$ или, что то же самое, величины $\ln\varphi(x_1, ..., x_n; g)$ относительно g, т. е. корень уравнения

$$\frac{\partial\ln\varphi(x_1,\ldots,x_n;g_n)}{\partial g_n}=0. \qquad (3)$$

Можно показать, что статистика g_n – состоятельная (смещенная) оценка параметра g, что является ее необходимым и достаточным обоснованием. Однако доказательство этого факта выходит за рамки данной статьи и будет опубликовано в отдельной работе.

Для дальнейшего изложения уравнение (3) удобно записать следующим образом:

$$\frac{\partial\ln p(g_n)}{\partial g_n}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial\ln f(x_i\mid g_n)}{\partial g_n}=0. \qquad (4)$$

Байесовский подход к точечной оценке

Отметим, что уравнение (3) может рассматриваться как байесовская оценка гипотезы о значении параметра [2–4]. Действительно, разобьем область изменения параметра g на K частей с точками деления g_k, ($g_{k+1}>g_k$). Введем гипотезы

$$H_k=\{\omega\in\Omega\mid g(\omega)\in[g_k,g_{k+1})\}.$$

Тогда апостериорные вероятности гипотез

$$P(H_k\mid x_1,\ldots,x_n)=$$
$$=\frac{P(H_k)P(x_1,\ldots,x_n\mid H_k)}{\sum_{m=1}^{K}P(H_m)P(x_1,\ldots,x_n\mid H_m)}. \qquad (5)$$

Для независимой выборки

$$P(x_1,\ldots,x_n\mid H_k)=\prod_{i=1}^{n}\frac{\int_{g_k}^{g_{k+1}}f(x_i\mid g)p(g)dg}{\int_{g_k}^{g_{k+1}}p(g)dg}$$

и

$$P(H_k)=\int_{g_k}^{g_{k+1}}p(g)dg.$$

Переходя к пределу $\delta=\max_k(g_{k+1}-g_k)\to 0$, получаем из (5)

$$P(g\mid x_1,\ldots,x_n)=$$
$$=\lim_{\delta\to 0}\frac{P(H_k)}{g_{k+1}-g_k}=$$
$$=\frac{p(g)\prod_{i=1}^{n}f(x_i\mid g)}{\int p(g')\prod_{i=1}^{n}f(x_i\mid g')dg'}=$$
$$=\psi(g\mid x_1,\ldots,x_n).$$

Критерий Байеса состоит в выборе гипотезы с максимальной апостериорной вероятностью. Таким образом, оценка параметра принимается в виде

$$g_n=\arg\max_g\psi(g\mid x_1,\ldots,x_n). \qquad (6)$$

В случае дифференцируемости плотности $\Psi(g|x_1, ..., x_n)$ выражение (6) эквивалентно уравнениям (3) и (4).

Эффективность точечной оценки параметра

Прежде всего, отметим, что в асимптотическом пределе [11, 12] $n\to\infty$ уравнение (3), определяющее оценку g_n, переходит в обычное уравнение метода наибольшего правдоподобия. Отсюда вытекает, что оценка g_n асимптотически эффективна и нормально распределена [13–15].

Минимально возможная (в регулярном случае) дисперсия несмещенной точечной оценки, согласно неравенству Рао – Крамера, равна $1 / (nJ(g))$, где $J(g) = \int(\partial \ln f(x|g) / \partial g)^2 \times f(x|g)dg$ – информация Фишера [6, 10, 14, 15]. Несмещенная оценка с такой дисперсией обычно называется эффективной и под эффективностью какой-либо оценки часто понимается отношение минимально возможной дисперсии к дисперсии исследуемой оценки. Однако в данном случае этот критерий неприменим, так как оценка g_n является смещенной.

В этой работе под эффективностью оценки мы понимаем квадрат отношения среднеквадратических ошибок для стандартной «эффективной» оценки $g_n^{(e)}$ и оценки g_n, полученной в данном подходе:

$$E_0 = \frac{\int dgp(g)\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g)\left[g - g_n^{(e)}(x_1,\ldots,x_n)\right]^2 dx_i}{\int dgp(g)\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g)[g - g_n(x_1,\ldots,x_n)]^2 dx_i}.$$

Величину E_0 мы называем интегральной эффективностью.

Так как

$$\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g)(g - g_n^{(e)})^2 dx_i = \mathrm{D}\, g_n^{(e)} = (nJ(g))^{-1},$$

для эффективности получаем

$$E_0 = \frac{\int \frac{p(g)}{J(g)} dg}{n\int dgp(g)\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g)[g - g_n(x_1,\ldots,x_n)]^2 dx_i}. \quad (7)$$

Эффективность оценки при фиксированном значении параметра g определяется выражением

$$E_0 = \frac{1}{nJ(g)\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g)[g - g_n(x_1,\ldots,x_n)]^2 dx_i}. \quad (8)$$

Примеры точечных оценок для некоторых законов распределения

В этом разделе приведем точечные оценки математического ожидания в случае, когда исследуемая величина имеет нормальное распределение (m, σ) при заданной дисперсии σ^2. Предположим, что априорное распределение математического ожидания имеет либо нормальное, либо γ-распределение. Параметры априорного распределения снабжаются нижним индексом 0.

Априорная плотность распределения параметра и плотность распределения значений выборки для нормального закона равны

$$p(g) = p_N(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0}\exp\left[-\frac{(g-m_0)^2}{2\sigma_0^2}\right];$$
$$f(x \mid g) = f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-g)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (9)$$

Априорная плотность для γ-распределения имеет вид

$$p(g) = p_\gamma(g) = \frac{1}{\Gamma(r_0)}\left(\frac{r_0}{m_0}\right)^{r_0} g^{r_0-1}\exp\left(-\frac{r_0}{m_0}g\right). \quad (10)$$

Параметр формы r_0 связан с математическим ожиданием и дисперсией соотношением $r_0 = m_0^2/\sigma_0^2$. Ниже мы рассматриваем только случай $r_0 \geq 1$.

Уравнение (4) приводит к следующим выражениям для оценок:

$$NN: g_n = \frac{1}{\sigma^2 + n\sigma_0^2}\left(m_0\sigma^2 + \sigma_0^2\sum_{i=1}^{n} x_i\right); \quad (11а)$$

$$N\gamma: g_n = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i - \frac{r_0\sigma^2}{nm_0}\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i - \frac{r_0\sigma^2}{nm_0}\right)^2 + \frac{\sigma^2}{n}(r_0 - 1)}. \quad (11б)$$

Исследуем эффективность полученных оценок согласно критериям (7) и (8). Информация Фишера для нормального распределения в случае, когда в качестве параметра рассматривается математическое ожидание, равна

$$J(g) = -\mathrm{M}\frac{\partial^2 \ln f(\xi \mid g)}{\partial g^2} = \frac{1}{\sigma^2}.$$

Введем удобные обозначения – приведенные априорные математическое ожидание и дисперсию:

$$\tilde{m}_0 = \frac{m_0}{\sigma}; \tilde{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma}.$$

Тогда формула для интегральной эффективности принимает вид

$$E_0 = 1 + \frac{1}{n\sigma_0^2}.$$

Локальная эффективность задается выражением

$$E(g) = 1 + \frac{2\tilde{\sigma}_0^2 - \left(\frac{g}{\sigma} - \tilde{m}_0\right)^2 + \frac{1}{n}}{n\left[1 + \frac{1}{n\tilde{\sigma}_0^2}\left(\frac{g}{\sigma} - \tilde{m}_0\right)^2\right]}.$$

Рис. 1 и 2 представляют интегральную и локальную эффективности для нормального априорного распределения. На рис. 2 $\tilde{m}_0 = \tilde{\sigma}_0 = 1$. Подъем при $\tilde{\sigma}_0 \to 0$ объясняется тем, что при малой априорной дисперсии априорная информация почти полностью определяет параметр.

Обратимся теперь к случаю априорного γ-распределения. Из (11б) и (10) получаем для интегральной эффективности оценки

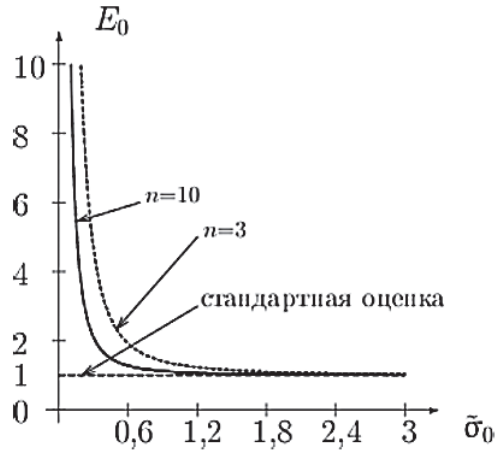


Рис. 1. Интегральная эффективность оценки математического ожидания при нормальном априорном распределении

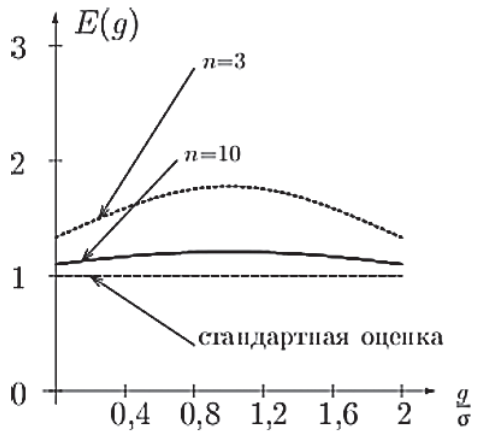


Рис. 2. Локальная эффективность оценки математического ожидания при нормальном априорном распределении при $\tilde{m}_0 = \tilde{\sigma}_0 = 1$

$$E_0 = \left[\begin{array}{l} \dfrac{n}{\Gamma(\frac{\tilde{m}_0^{\,2}}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}})} \left(\dfrac{\tilde{m}_0}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}} \right)^{\frac{\tilde{m}_0^{\,2}}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}}} \int\limits_0^{\infty} \gamma^{\frac{\tilde{m}_0^{\,2}}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}}-1} \times \\ \times \exp\left(-\dfrac{\tilde{m}_0}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}} \gamma \right) \Phi_n(\gamma, \tilde{m}_0, \tilde{\sigma}_0) d\gamma \end{array} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Эффективность при определенном значении параметра определяется формулой

$$E(g) = \frac{\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g) \left[g - g_n^{(e)}(x_1, \ldots, x_n) \right]^2 dx_i}{\int \prod_{i=1}^{n} f(x_i \mid g) [g - g_n(x_1, \ldots, x_n)]^2 dx_i} = \frac{1}{\Phi_n(\frac{g}{\sigma}, \tilde{m}_0, \tilde{\sigma}_0)}. \quad (13)$$

В уравнениях (12) и (13) мы ввели обозначение

$$\Phi_n(\gamma, \tilde{m}_0, \tilde{\sigma}_0) = \sqrt{\frac{n}{2\pi}} \int\limits_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-n(t-\gamma)^2 \right] \times \left[\begin{array}{c} \dfrac{1}{2}\left(t - \dfrac{\tilde{m}_0}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}} \right) + \\ + \sqrt{\dfrac{1}{4}\left(t - \dfrac{\tilde{m}_0}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}} \right)^2 + \dfrac{1}{n}\left(\dfrac{\tilde{m}_0^{\,2}}{\tilde{\sigma}_0^{\,2}} - 1 \right)} - \gamma \end{array} \right]^2 dt.$$

На рис. 3 приведена интегральная эффективность E_0 (см. (12)) как функция $\tilde{\sigma}_0$ для случая $\tilde{\sigma}_0 = \tilde{m}_0$ (показательное распределение) при двух объемах выборки. Эффективность при учете априорной информации, по меньшей мере, в два раза превышает стандартную эффективную оценку. Рис. 4 показывает, как учет априорной информации влияет на локальную эффективность оценки. Оценка вычислена по формуле (13) при $\tilde{\sigma}_0 = \tilde{m}_0 = 1$.

Заключение

Исследования на примере математического ожидания нормально распределенной генеральной совокупности показывают, что использование априорной информации об изучаемом параметре может существенно (в несколько раз) уточнить его статистическую оценку. Это особенно полезно при выборке малого объема, когда точность стандартной оценки низка и эффект от априорной информации наибольший.

Следующим шагом в направлении использования априорных знаний могло бы стать построение оценок для нескольких параметров одновременно, принимая во внимание их корреляционные свойства, известные заранее.

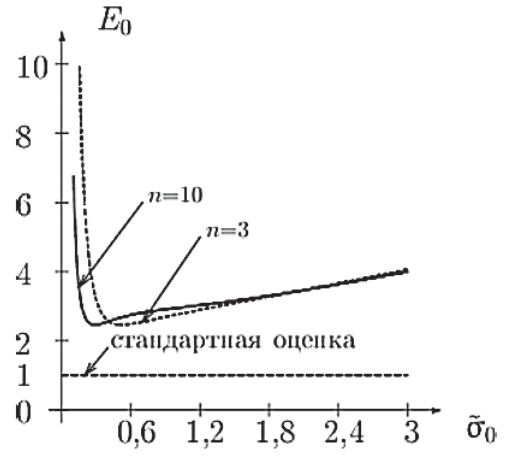


Рис. 3. Интегральная эффективность оценки математического ожидания при показательном априорном распределении

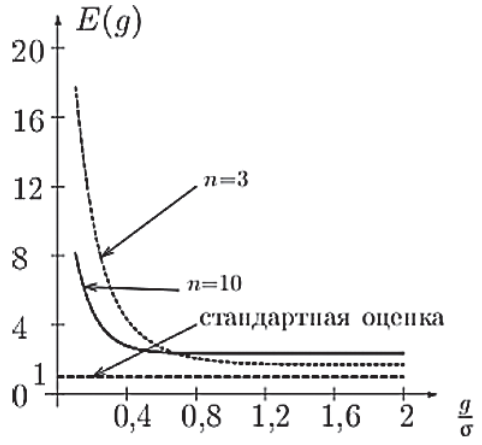


Рис. 4. Локальная эффективность оценки математического ожидания при показательном априорном распределении при $\tilde{m}_0 = 1$

Библиографический список

1. Айвазян С. А. Байесовский подход в эконометрическом анализе / С. А. Айвазян // Прикладная эконометрика. – 2008. – № 9. – С. 93–108.

2. Буре В. М. Байесовский подход / В. М. Буре, Л. В. Грауэр. – СПб. : ШАД, 2013. – 36 с.

3. Вентцель Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Радио и связь, 1983. – 365 с.

4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 564 с.

5. Ивченко Г. И. Математическая статистика / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. – М. : Высш. шк., 1984. – 352 с.

6. Кибзун А. И. Лекции по теории вероятностей / А. И. Кибзун, А. В. Наумов. – М. : МАИ, 2000. – 100 с.

7. Кожевников Ю. В. Введение в математическую статистику / Ю. В. Кожевников. – Казань : КГТУ, 1996. – 250 с.

8. Колемаев В. А. Теория вероятностей и математическая статистика / В. А. Колемаев, О. В. Староверов, В. Б. Турундаевский. – М. : Высш. шк., 1991. – 400 с.

9. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.

10. Лавренченко А. С. Лекции по математической статистике и теории случайных процессов / А. С. Лавренченко. – М. : МАИ, 1974. – 140 с.

11. Пугачев В. С. Введение в теорию вероятностей / В. С. Пугачев. – М. : Наука, 1968. – 368 с.

12. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / В. С. Пугачев. – М. : Наука, 1979. – 496 с.

13. Розанов Ю. А. Лекции по теории вероятностей / Ю. А. Розанов. – М. : Наука, 1968. – 324 с.

14. Севастьянов Б. А. Курс теории вероятностей и математической статистики / Б. А. Севастьянов. – М. : Наука, 1982. – 255 с.

15. Чистяков В. П. Курс теории вероятностей / В. П. Чистяков. – М. : Наука, 1987. – 255 с.

References

1. Ayvazyan S. A. *Prikladnaya ekonometrika – Applied Econometrics*, 2008, no. 9, pp. 93-108.

2. Bure V. M. & Grauer L. V. Bayyesovskiy podkhod [Bayes' Approach]. St. Petersburg, ShAD, 2013. 36 p.

3. Ventsel Ye. S. & Ovcharov L. A. Prikladnyye zadachi teorii veroyatnostey [Applied Tasks for Probability Theory]. Moscow, Radio i svyaz, 1983. 365 p.

4. Ventsel Ye. S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1969. – 564 c.

5. Ivchenko G. I. & Medvedev Yu. I. Matematicheskaya statistika [Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1984. 352 p.

6. Kibzun A. I. & Naumov A. V. Lektsii po teorii veroyatnostey [Lectures on Probability Theory]. Moscow, MAI, 2000. 100 p.

7. Kozhevnikov Yu. V. Vvedeniye v matematicheskuyu statistiku [Introduction to Mathematical Statistics]. Kazan, KGTU, 1996. 250 p.

8. Kolemayev V. A., Staroverov O. V. & Turundayevskiy V. B. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1991. 400 p.

9. Kramer G. Matematicheskiye metody statistiki [Mathematical Mathods in Statistics]. Moscow, Mir, 1975. 648 p.

10. Lavrenchenko A. S. Lektsii po matematicheskoy statistike i teorii sluchaynykh protsessov [Lectures on Mathematical Statistics and Theory of Random Processes]. Moscow, MAI, 1974. 140 p.

11. Pugachev V. S. Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey [Introduction to Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1968. 368 p.

12. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka, 1979. 496 p.

13. Rozanov Yu. A. Lektsii po teorii veroyatnostey [Lectures in Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1968. 324 p.

14. Sevastyanov B. A. Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki [Probability Theory and Mathematical Statistics Course]. Moscow, Nauka, 1982. 255 p.

15. Chistyakov V. P. Kurs teorii veroyatnostey [Probability Theory Course]. Moscow, Nauka, 1987. 255 p.

ГАРБАРУК Виктор Владимирович – канд. техн. наук, доцент, профессор, vmkaf@pgups.ru; *ФОМЕНКО Виктор Николаевич – доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор, vfomenko1943@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.22

Н. В. Климова, Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, И. Р. Романова

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОТПРАВЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРНЫХ БЛОК–ПОЕЗДОВ ПО РАСПИСАНИЮ НА СТАНЦИЯХ ПРИМЫКАНИЯ ТЫЛОВЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТЕРМИНАЛОВ В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ

Дата поступления: 09.08.2016
Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Стабилизировать отправление поездов по расписанию в морские торговые порты, для этого обосновать размер учитываемого фактора неравномерности при нормировании продолжительности основных технологических операций с составами контейнерных блок-поездов на тыловых логистических терминалах и станциях их примыкания в транспортных узлах. **Методы:** Из действующих автоматизированных систем собраны и обработаны с использованием программного обеспечения MS Excel 2010 статистические данные за четыре месяца (123 дня), определены математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и дисперсия продолжительности операций с составом блок-поезда на железнодорожных путях тылового контейнерного терминала и станции его примыкания. Гипотеза о нормальном законе распределения случайной величины продолжительности каждой из основных операций на терминале и станции проверена по критерию согласия «хи-квадрат». **Результаты:** Описано распределение случайной величины продолжительности операций на терминале и станции с использованием нормального закона распределения; определены показатели неравномерности для каждой операции; построены технологические графики обработки состава контейнерного блок-поезда на путях тылового контейнерного терминала и железнодорожной станции его примыкания. **Практическая значимость:** Практические рекомендации позволят увеличить технологические нормы времени обработки блок-поездов на путях тылового контейнерного терминала и железнодорожной станции его примыкания на 1,5 величины среднеквадратичных отклонений для учета неравномерности и межоперационных перерывов. В результате суммарное время обработки блок-поездов по отправлению на путях терминала и станции не превысит увеличенную технологическую норму в 95 % случаев. Такая надежность уровня выполнения технологических операций приемлема для стабилизации отправления поездов по расписанию. Повысятся конкурентоспособность и доходность железнодорожных контейнерных перевозок в транспортных узлах.

Состав, контейнерный блок-поезд, тыловой логистический терминал, железнодорожная станция примыкания, отправление по расписанию, продолжительность технологических операций, статистические данные, нормальный закон распределения, технологический график.

***Nadezhda V. Klimova**, postgraduate student, nadya.climowa2012@yandex.ru; **Gennadiy M. Groshev**, D. Sci. (Eng.), professor, spbgroshev@gmail.com; **Aleksey G. Kotenko**, D. Sci. (Eng.), associate professor; **Irina Yu. Romanova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor (Petersburg State Transport University)

STABILISATION OF DISPATCHING OF CONTAINER BLOC-TRAINS ACCORDING TO SCHEDULE AT CONNECTING STATIONS OF REAR LOGISTICAL TERMINAL IN TRANSPORTATION HUB

Objective: To stabilise dispatching of trains according to schedule to maritime trading ports. In order to do that, justify the value of irregularity factor counted into rate setting for the duration of main processing operations of container bloc-train formation at rear logistical terminals and their connecting stations at transportation hubs. **Methods:** Statistical data covering four months (123 days) were collected from

control systems being operated and processed on MS Excel 2010 software. Mathematical expectation, mean-square deviation and variability of duration of operations with bloc-train formation on railway tracks of a rear container terminal and its connecting station were determined. A hypothesis on normal distribution law of random values of duration of each of the main operations at the terminal and the station was checked by chi-square test for goodness of fit. **Results:** Distribution of random value of duration of operations at a terminal and at a station was described with the use of normal distribution law. Irregularity values for each operation were determined. Operation schedules for processing container bloc-train formation on the tracks of a container terminal and its connecting station were built. **Practical importance:** Practical recommendations would permit to increase technology-based standards of processing duration of bloc-trains at rear container terminal tracks and its connecting station by 1.5 values of mean-square deviation to account for irregularities and inter-operation pauses. As a result, the combined duration of processing bloc-trains for departure at terminal and station tracks would not exceed the increased technology-based standard in 95 per cent of the cases. Such reliability of the level of conducting processing operations is acceptable for stabilisation of dispatching trains on schedule. Competitiveness and profitability of container transportation by rail at transportation hubs would increase.

Formation, container bloc-train, rear logistical terminal, connecting railway station, dispatching on schedule, duration of processing operations, statistical data, normal distribution law, operation schedule.

Технологическая схема использования контейнерных блок-поездов в транспортных узлах регулирует транспортировку контейнеров в морские торговые порты по железной дороге с припортовых тыловых логистических терминалов (ТЛТ). Такие ТЛТ обеспечивают формирование поездов, время отправления которых со станции примыкания ТЛТ и прибытия на припортовую станцию жестко фиксируется и увязывается с подходом судов в морском торговом порту (МТП) [1, 14, 15].

Сбои в пропуске поездов по расписанию на железнодорожных станциях, в том числе на станциях примыкания ТЛТ, приводят к значительным экономическим потерям [3, 8].

Установление теоретических законов распределения, адекватно отражающих характер статистических распределений продолжительности основных технологических операций с составами поездов, позволяет совершенствовать нормирование эксплуатационной работы станций и участков.

Нормирование продолжительности основных технологических операций с составами контейнерных блок-поездов на ТЛТ и станциях их примыкания на основе многофакторного анализа дает возможность стабилизировать отправление этих поездов в узлах по расписанию [4, 11].

В статье изложен метод статистических исследований и математической обработки данных [5], позволяющий стандартизировать определение реальной продолжительности основных операций – элементов технологической модели обработки составов контейнерных блок-поездов на ТЛТ и станции его примыкания; сформулированы и обоснованы предложения по их нормированию с учетом обеспечения высокой надежности отправления поездов по графиковым расписаниям.

Постановка задачи нормирования продолжительности операций с контейнерными блок-поездами

Будем считать, что продолжительность выполнения той или иной операции с поездом X является случайной величиной, тогда для ее нормирования необходимо [9]:

• оценить ее среднее значение, среднеквадратическое отклонение и дисперсию;

• проверить гипотезу о нормальном законе распределения случайной величины X;

• дать обоснованные рекомендации по нормированию продолжительности элемента с учетом неравномерности и оценить возможные отклонения от установленной нормы.

Выборка определенного объема из генеральной совокупности X должна быть задана в формате таблицы. Оценим математическое ожидание $\mathbf{M}X = a$, среднеквадратичное отклонение σ, дисперсию $\mathbf{D}X = \sigma^2$ генеральной совокупности X; проверим гипотезу о нормальном законе распределения генеральной совокупности X по критерию Пирсона («хи-квадрат») с уровнем значимости $\alpha = 0{,}05$.

Решение задачи нормирования продолжительности технологических операций с контейнерными блок-поездами

Данные о продолжительности элементов технологических операций на путях ТЛТ и станции его примыкания получены из информационно-справочной системы автоматизированной системы управления грузовой станцией (ИСС АСУГС) и автоматизированной системы оперативного управления перевозками второго поколения (АСОУП-2) [2,7]. Статистические данные собирали за четыре месяца (июнь, июль, декабрь, январь) – 123 дня – по каждому элементу технологических операций на путях ТЛТ ОАО «Модуль» и станции примыкания Предпортовая. Данные о продолжительности операций по завершению таможенного оформления взяты по МТП «Большой порт Санкт-Петербург», поскольку на ТЛТ на данном этапе нет таможенного досмотра контейнеров при отправлении на экспорт. Использовано программное обеспечение MS Excel 2010 [6, 13].

Пусть даны выборки $x_1, x_2, \ldots, x_n$ из генеральной совокупности X, в которой предоставлена продолжительность основных технологических операций с составом блок-поезда на путях ТЛТ.

Для графического представления выборки ее элементы группируются. Обозначим через A и B, соответственно, наименьший и наибольший элементы выборки, объем которой составляет n элементов. Разобьем отрезок $[A, B]$ на k равных частей точками $t_0 = A, t_1, \ldots, t_к = B$. Шаг разбиения $h = (B - A) / k$. Обозначим через $x_i = (t_{i-1}+t_i) / 2$ середину i-го отрезка, а через n_i – эмпирическую частоту, т. е. число точек выборки, попавших в промежуток $[t_{i-1}, t_i]$.

В программе MS Excel 2010 данные действия выполняются автоматически. В результате получаем гистограмму распределения случайной величины (рис. 1).

Состоятельной и практически несмещенной оценкой математического ожидания $\mathbf{M}X = a$ генеральной совокупности X будет выборочное среднее

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot x_i,$$

т. е. верны следующие равенства:

$$\lim_{n\to\infty} \overline{x} = a;$$

$$M\overline{x} \approx a.$$

Состоятельной и практически несмещенной оценкой дисперсии $\mathbf{D}X = \sigma^2$ генеральной

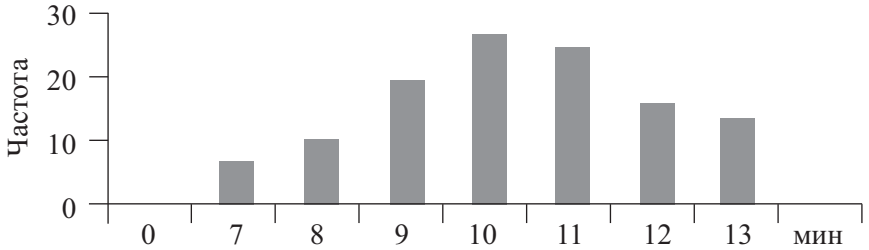


Рис. 1. Пример гистограммы распределения случайной величины для операции «Следование состава блок-поезда на пути ТЛТ» (продолжительность в минутах)

совокупности X будет выборочная дисперсия

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{k} n_i \cdot (\overline{x}_i - \overline{x})^2,$$

т. е. верны следующие равенства:

$$\lim_{n\to\infty} s^2 = \sigma^2;$$

$$Ms^2 \approx \sigma^2.$$

Квадратный корень из выборочной дисперсии, т. е. s, называют выборочным среднеквадратичным отклонением.

Для каждой технологической операции с составом блок-поезда эти основные числовые характеристики также определены автоматически с помощью статистических функций в программе MS Excel 2010 (см. рис. 2).

С учетом полученных значений продолжительности операций – элементов технологической модели – строят технологические графики (диаграммы Ганта) обработки состава (рис. 3).

Гипотезу о нормальном законе распределения случайной величины проверим по критерию согласия «хи-квадрат».

Вычисляем вероятность попадания случайной величины X в промежуток $[z_{r-1}, z_j)$:

$$p_j = P(z_{j-1} \le X < z_j) =$$

$$= \Phi_0\left(\frac{z_j - \overline{x}}{s}\right) - \Phi_0\left(\frac{z_{j-1} - \overline{x}}{s}\right).$$

Сравним вычисленную вероятность p_j с относительной выборочной частотой n_j / n, где n_j – число точек выборки, попавших в промежуток $[z_{j-1}, z_j)$. Если наша гипотеза верна, то величина $(n_j / n - p_j)^2$ должна быть небольшой. Следовательно, небольшой должна быть и сумма r таких величин, взятых с коэффициентами n / p_j:

$$Z = \sum_{j=1}^{r} \frac{n}{p_j}\left(p_j - \frac{n_j}{n}\right)^2 = \sum_{j=1}^{r} \frac{(n_j - n \cdot p_j)^2}{n \cdot p_j}.$$

Если гипотеза верна, то вероятность, с которой статистика Z будет меньше z, можно найти по формуле

$$P(Z < z) = P(\chi^2(l) < z) =$$

$$= \frac{1}{\Gamma(l/2)2^{l/2}} \cdot \int_0^z x^{\frac{l-1}{2}} \cdot e^{-x/2} dx = \gamma.$$

Если последнее уравнение решить относительно z, то его решение $z(\gamma) = \chi^2_{\text{крит}}$ будут называть квантилью распределения $\chi^2(l)$ с l степенями свободы и считать критическим значением выборочной статистики Z, соответствующим уровню значимости $\alpha = 1 - \gamma$. Если значение выборочной статистики Z будет не больше $\chi^2_{\text{крит}}$, то у нас нет основания отвергнуть гипотезу о нормальном законе распределения колебаний исследуемой величины, и она, как правило, будет принята.

В табл. 1 в качестве примера представлены результаты проверки гипотезы о нормальном законе распределения случайной величины по критерию «хи-квадрат» для операции «Следование состава блок-поезда на пути ТЛТ», выполненной в MS Excel 2010.

В табл. 2 представлены результаты проверок гипотезы о нормальном законе распределения случайной величины по критерию

Следование на пути ТЛТ	Объем	124
	Максимум	13
	Минимум	7
	Среднее $\overline{x}$=	10,33871
	СКО σ =	1,666929
	Дисперсия σ^2 =	2,778652

Рис. 2. Значение средней величины, среднеквадратического отклонения и дисперсии выборки для операции «Следование состава блок-поезда на пути ТЛТ» (продолжительность в минутах)

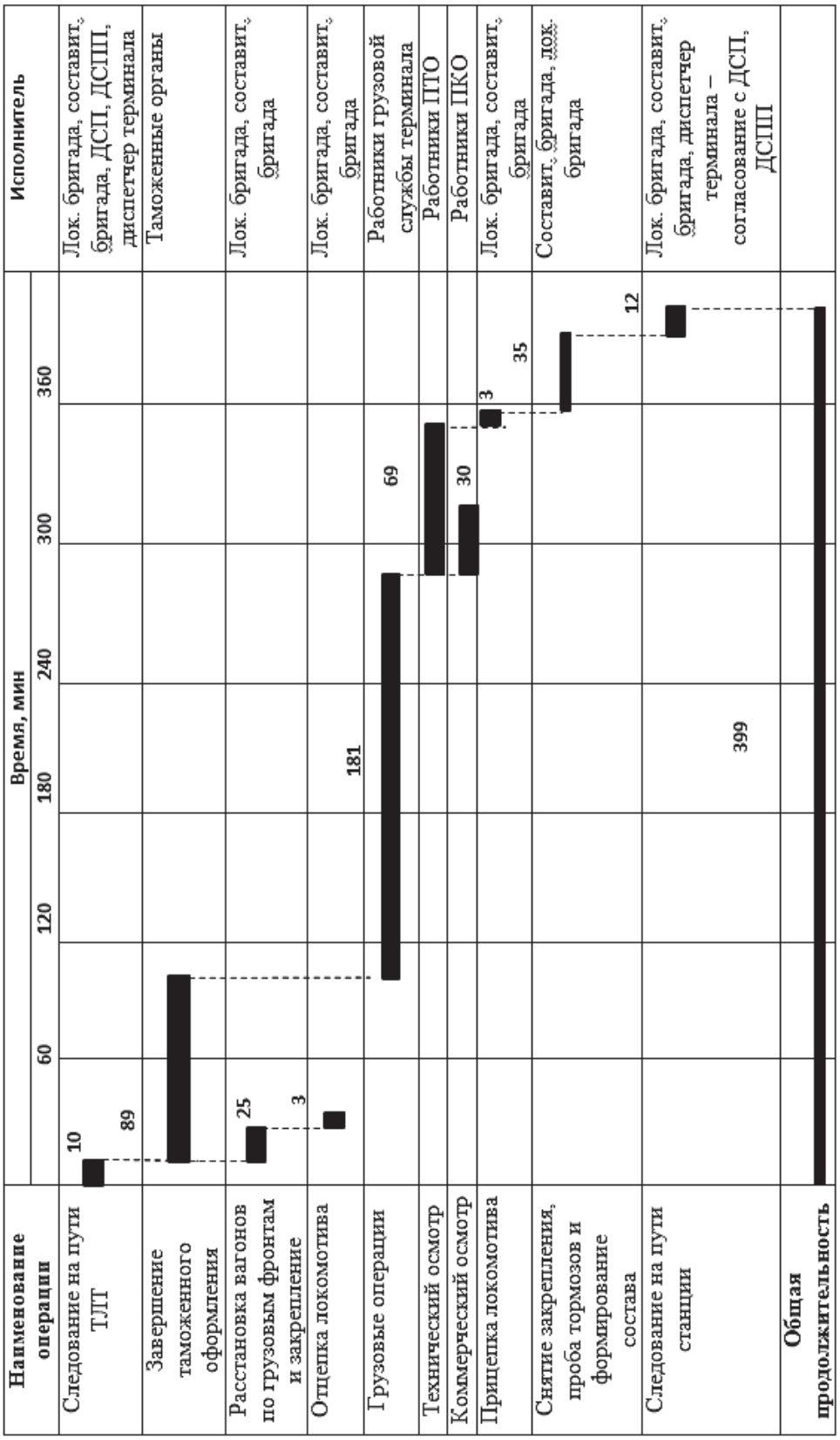


Рис. 3. Технологический график обработки состава блок-поезда на путях ТЛТ

ТАБЛИЦА 1. Пример результатов проверки гипотезы о нормальном законе распределения случайной величины по критерию «хи-квадрат»

Карман	Частота (nj)	Теоретическая вероятность	Теоретическая частота	Проверка
0	0	$Pj = F(Bj) - F(Aj)$	$N \cdot pj$	$(nj - n \cdot pj)^2 / n \cdot pj$
7	7	0,022 593 439	2,801 586 441	6,291 676 797
8	11	0,057 714 227	7,156 564 136	2,064 118 892
9	20	0,130 650 963	16,20 071 947	0,89 098 096
10	28	0,208 533 136	25,85 810 886	0,177 418 144
11	26	0,234 718 226	29,10 506	0,331 261 903
12	17	0,186 314 876	23,1 030 446	1,61 221 839
13	15	0,159 475 133	19,77 491 651	1,152 967 075
			χ^2	12,52 064 216
			χ^2 критич	12,59 158 724

«хи-квадрат» для основных операций с составом блок-поезда на путях ТЛТ. Уровень значимости принят равным 0,05.

Согласно результатам проверки по критерию «хи-квадрат», колебания продолжительности каждой операции с составом блок-поезда на путях ТЛТ подчиняются нормальному закону распределения.

Данный вывод можно подтвердить графически, построив эмпирические и теоретические кривые вероятности распределения продолжительности выполнения каждой операции. Если указанные кривые приблизительно совпадают, можно утверждать, что колебания случайной величины подчиняются нормальному закону распределения (рис. 4).

Аналогичные статистические исследования и проверки гипотезы о законе распределения случайной величины по критерию «хи-квадрат» выполнены для операций по отправлению блок-поезда на путях станции примыкания ТЛТ. Установлено, что колебания их продолжительности также подчиняются нормальному закону распределения.

Технологический график обработки состава блок-поезда на путях станции представлен на рис. 5.

Известно, что сумма любого числа нормально распределенных случайных величин также подчиняется нормальному закону распределения [10]. Следовательно, будет подчиняться нормальному закону распределения и общая продолжительность обработки состава контейнерного блок-поезда на путях ТЛТ и станции его примыкания как сумма продолжительностей всех операций с составом блок-поезда, колебания продолжительности которых подчиняются нормальному закону распределения.

Также известно, что величина показателя, колебания значений которого подчиняются нормальному закону распределения, не превысит величину «Математическое ожидание плюс 1,5 средних квадратичных отклонения» в 95 % случаев, а величину «Математическое ожидание плюс 2,0 средних квадратичных отклонения» – в 97,7 %.

Контейнерные блок-поезда должны двигаться между ТЛТ и МТП в транспортном узле по твердым ниткам графика.

Целесообразно увеличить технологические нормы продолжительности обработки составов на путях ТЛТ и станции примыкания на 1,5 величины среднеквадратичного от-

ТАБЛИЦА 2. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения продолжительности операций с составом блок-поезда на путях ТЛТ

Операция	Промежутки	Эмпирическая частота	Теоретическая вероятность	Теоретическая частота	«Хи-квадрат»	«Хи-квадрат» критическое
Следование на пути ТЛТ	0–7	7	0,022593439	2,801586441	12,52064216	12,59158724
	7–8	11	0,057714227	7,156564136		
	8–9	20	0,130650963	16,20071947		
	9–10	28	0,208533136	25,85810886		
	10–11	26	0,234718226	29,10506		
	11–12	17	0,186314876	23,1030446		
	12–13	15	0,159475133	19,77491651		
Результат проверки		$\chi^2 \prec \chi^2_{крит}$		Нормальное распределение		
Таможенное оформление	0–82	5	0,044562392	5,525736551	15,16959862	18,30703805
	82–84,3	12	0,076810507	9,524502834		
	84,3–86,6	19	0,140927438	17,47500232		
	86,6–88,9	18	0,196130319	24,3201595		
	88,9–91,2	30	0,207059322	25,67535592		
	91,2–93,5	20	0,165825045	20,56230563		
	93,5–95,8	16	0,100737871	12,491496		
	95,8–98,1	2	0,046417636	5,755786878		
	98,1–100,4	0	0,016220375	2,011326525		
	100,4–102,7	1	0,00429782	0,532929684		
	102,7–105	1	0,001011275	0,12539815		
Результат проверки		$\chi^2 \prec \chi^2_{крит}$		Нормальное распределение		
Следование на пути станции	0–7	3	0,009142436	1,133662081	7,700848611	11,07049769
	7–9	12	0,067304393	8,345744685		
	9–11	31	0,232452864	28,82415509		
	11–13	47	0,358026642	44,39530358		
	13–15	24	0,246451795	30,56002253		
	15–17	7	0,086621871	10,74111204		
Результат проверки		$\chi^2 \prec \chi^2_{крит}$		Нормальное распределение		

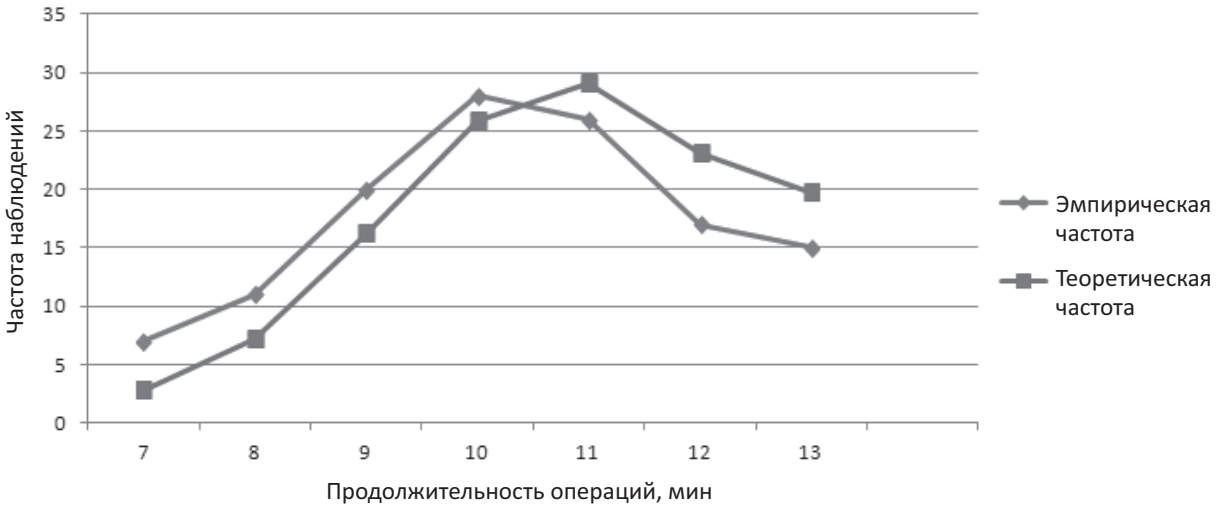


Рис. 4. Эмпирическая и теоретическая кривые вероятности распределения продолжительности операции «Следование состава блок-поезда на пути ТЛТ»

Наименование операции	Время, мин (60, 120)	Исполнитель
Закрепление состава	8	ДСПП, сигналист
Отцепка и уход маневрового локомотива	4	Лок. бригада, ДСП, ДСПП
Списывание состава с натуры, подбор документов, оформление натурного листа	42	Оператор СТЦ, ДСПП
Заход под состав и прицепка поездного локомотива	5	ДСП, ДСПП, лок. бригада
Зарядка тормозной магистрали, полное опробование тормозов, снятие закрепления	38	Лок. бригада, работники ПТО, ДСПП, сигналист
Вручение комплекта документов локомотивной бригаде и отправление поезда	7	ДСП, ДСПП
Общая продолжительность	92	

Рис. 5. Технологический график обработки состава блок-поезда на путях станции примыкания ТЛТ

клонения для учета неравномерности и межоперационных простоев (табл. 3).

В результате суммарное время обработки блок-поездов на ТЛТ и станции не превысит

ТАБЛИЦА 3. Сводные результаты статистических расчетов продолжительности технологических операций с составом блок-поезда на путях ТЛТ и станции примыкания с учетом неравномерности

Технологическая операция	Технологическая норма, мин	Наименование закона распределения	Среднее квадратичное отклонение, мин	1,5·σ, мин	Технологическая норма + 1,5·σ, мин
Обработка состава блок-поезда на путях ТЛТ	399	Нормальное	18	27	426
Обработка поезда на путях станции	92	Нормальное	8	12	100

увеличенную норму в 95 % случаев. Такая надежность приемлема для стабилизации отправления поездов по расписанию [12].

Заключение

Предложенный метод нормирования с учетом неравномерности продолжительности основных элементов обработки составов контейнерных блок-поездов на путях ТЛТ и станции его примыкания на основе результатов статистических исследований и математической обработки данных позволяет обосновать величину технологических норм, которая обеспечит надежность операций и стабилизирует отправление таких поездов в узле по расписанию для согласованного подвода контейнеров в МТП под погрузку на суда. В результате увеличится эффективность работы линий, повысится доходность и конкурентоспособность железнодорожных контейнерных перевозок в транспортных узлах.

Библиографический список

1. Белозеров В. Л. Использование прогрессивных форм транспортных услуг при организации работы припортовой станции / В. Л. Белозеров, Г. М. Грошев, В. И. Ковалев, Н. В. Климова // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2 (35). – С. 31–43.

2. Гапанович В. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Гапанович, А. А. Грачев и др. ; под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьминина, Г. М. Грошева. – М. : Маршрут, 2006. – 544 с.

3. Грошев Г. М. Об организации движения поездов по графику на станциях стыкования родов тока электрофицированных линий и припортовых станций / Г. М. Грошев, К. А. Ванелик, Н. В. Шукалович // Интеллектуальные системы на транспорте : материалы междунар. науч.-практич. конф. «ИнтеллектТранс-2011». – СПб. : ПГУПС, 2011. – С. 205–212.

4. Грошев Г. М. Уровень выполнения графика движения поездов на станциях смены видов тяги и родов тока транспортных коридоров / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, А. Р. Норбоев // Интеллектуальные системы на транспорте : тезисы III междунар. науч.-практич. конф. «ИнтеллектТранс-2013». – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 42–43.

5. Губин В. И. Статистические методы обработки экспериментальных данных : учеб. пособие / В. И. Губин, В. Н. Осташков. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2007. – 200 с.

6. Использование MS Excel для решения задач математической статистики. – URL : http://www.tag.ee/files/Excel-libre.pdf.

7. Климова Н. В. Информационные технологии при организации движения контейнерных блок-поездов / Н. В. Климова // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч.

трудов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Вып. 12. – С. 66–72.

8. Котенко А. Г. Систематизация, исследование причин невыполнения графика движения поездов и оценка их влияния на участковую скорость / А. Г. Котенко, Г. М. Грошев, В. И. Ковалев, А. В. Гоголева // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 2 (31). – С. 5–11.

9. Луценко М. М. Точечные и интервальные оценки параметров. Проверка гипотезы о виде распределения : методич. указания к лабораторной работе / М. М. Луценко. – СПб. : ПГУПС, 2002. – 18 с.

10. Моделирование случайных процессов. Экспериментальная проверка центральной предельной теоремы. – URL : http://www.studfiles.ru/preview/3556462.

11. Норбоев А. Р. Математическое моделирование закономерностей колебаний продолжительности технологических элементов пропуска поездов на технических станциях / А. Р. Норбоев // Вестн. транспорта Поволжья. – 2014. – Вып. 2 (44). – С. 34–42.

12. Норбоев А. Р. Методы стабилизации пропуска грузовых поездов по графику на станциях смены видов тяги и родов тока линий международных транспортных коридоров : дис. … канд. тех. наук: 05.22.08 / А. Р. Норбоев. – СПб., 2014. – 195 с.

13. Осетрова И. С. Microsoft Excel 2010 для аналитиков / И. С. Осетрова, Н. А. Осипов. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 65 с.

14. Панова Ю. Н. Факторы строительства тыловых контейнерных терминалов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский // Вестн. ТОГУ. – 2012. – Вып. 1 (24). – С. 103–112.

15. Ставка на точность // Гудок. – URL : http://www.gudok.ru/transport/zd/?pub_id=357460.

References

1. Belozerov V. L., Groshev G. M., Kovalev V. I. & Klimova N. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 2 (35), pp. 31-43.

2. Gapanovich V. A., Grachev A. A. et al. Sistemy avtomatizatsii i informatsionnyye tekhnologii upravleniya perevozkami na zheleznykh dorogakh: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [Automation Systems and Information Technologies for Managing Railway Transportation: Railway University Course Book]; ed. V. I. Kovaleva, A. T. Osminina & G. M. Grosheva. Moscow, Marshrut, 2006. 544 p.

3. Groshev G. M., Vanelik K. A. & Shukalovich N. V. Ob organizatsii dvizheniya poyezdov po grafiku na stantsiyakh stykovaniya rodov toka elektrifitsirovannykh liniy i priportovykh stantsiy [On Organisation of Scheduled Train Movement at Current Type Converter Stations of Electrified Lines and Port Stations]. *Intellektualnyye sistemy na transporte: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "IntellektTrans-2011" [Intellectual Systems in Transport: Coll. Papers of Int. Sci. and Practical Conf. IntellektTrans-2011]*. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2011. Pp. 205-212.

4. Groshev G. M., Kotenko A. G. & Norboyev A. R. Uroven vypolneniya grafika dvizheniya poyezdov na stantsiyakh smeny vidov tyagi i rodov toka transportnykh koridorov [Level of Train Movement Schedule Fulfillment at Converter Stations for Traction Type and Current Type in Transport Corridors]. *Intellektualnyye sistemy na transporte: tezisy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "IntellektTrans-2013" [Intellectual Systems in Transport: Abstracts of the 3rd Int. Sci. and Practical Conf. IntellektTrans-2013]*. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2013. Pp. 42-43.

5. Gubin V. I. & Ostashkov V. N. Statisticheskiye metody obrabotki eksperimentalnykh dannykh: uchebnoye posobiye [Statistical Methods for Processing Experimental Data: Course Guide]. Tyumen, Izdatelstvo TyumGNGU, 2007. 200 p.

6. Ispolzovaniye MS Excel dlya resheniya zadach matematicheskoy statistiki [Application of MS Excel to Solving Mathematical Statistics Problems], available at: http://www.tag.ee/files/Excel-libre.pdf.

7. Klimova N. V. Informatsionnyye tekhnologii pri organizatsii dvizheniya konteynernykh blok-poyezdov [Information Technologies in Organising Container Bloc-Train Movement]. *Aktualnyye problemy upravleniya perevozochnym protessom: sbornik nauchnykh trudov [Current Problems in Managing Transportation Processes: Coll. Sci. Papers]*. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2013. Is. 12. Pp. 66-72.

8. Kotenko A. G., Groshev G. M., Kovalev V. I. & Gogoleva A. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2012. Is. 2 (31), pp. 5-11.

9. Lutsenko M.M. Tochechnyye i intervalnyye otsenki parametrov. Proverka gipotezy o vide raspredeleniya: metodicheskiye ukazaniya k laboratornoy rabote [Point and Interval Estimation of Parameters. Distribution Type Hypothesis Testing: Laboratory Operations Manual]. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2002. 18 p.

10. Modelirovaniye sluchaynykh protsessov. Eksperimentalnaya proverka tsentralnoy predelnoy teoremy [Simulation of Random Processes. Experimental Verification of Central-Limit Theorem], available at: http://www.studfiles.ru/preview/3556462.

11. Norboyev A.R. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Trans. Bull.*, 2014, Is. 2 (44), pp. 34-42.

12. Norboyev A.R. Metody stabilizatsii propuska gruzovykh poyezdov po grafiku na stantsiyakh smeny vidov tyagi i rodov toka liniy mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Methods of Stabilisation of Freight Train Handling by Schedule at Converter Stations for Traction Type and Current Type in International Transport Corridors]. St Petersburg, 2014. 195 p.

13. Osetrova I.S. & Osipov N.A. Microsoft Excel 2010 dlya analitikov [Microsoft Excel 2010 for Analysts]. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013. 65 p.

14. Panova Yu.N. & Korovyakovskiy Ye.K. *Vestnik TOGU – Pacific National Univ. Bull.*, 2012. Is. 1 (24), pp. 103-112.

15. Stavka na tochnost [Bet on Accuracy]. *Gudok – Signal*, available at: http://www.gudok.ru/transport/zd/?pub_id=357460.

*КЛИМОВА Надежда Васильевна – аспирант, nadya.climowa2012@yandex.ru; ГРОШЕВ Геннадий Максимович – доктор техн. наук, профессор, spbgroshev@gmail.com; КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – доктор техн. наук, доцент; РОМАНОВА Ирина Юрьевна – канд. техн. наук, доцент (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056

А. А. Корниенко, **С. В. Диасамидзе**

ПОДХОД К СТРУКТУРИРОВАНИЮ МЕТРИК СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Дата поступления: 19.05.2016
Решение о публикации: 17.08.2016

Цель: Обосновать применение метрик сложности программ в качестве дополнительного инструмента для выявления дефектов безопасности при проведении статического анализа программ. **Методы:** Применены методы программометрии, на основе которых разработан метод выявления дефектов безопасности в программных средствах с использованием модели программы в виде схемы Янова, а также совокупности структурированных метрик сложности. **Результаты:** Рассмотрены два взаимодополняющих направления формирования информативного структурированного метрического базиса. Первый заключается в ранжировании метрик сложности на основе экспертного оценивания в задачах выявления дефектов безопасности программного обеспечения. Во втором предлагается опираться на результаты экспериментального исследования чувствительности компонент расширенного метрического базиса к потенциально опасным программным конструкциям. **Практическая значимость:** Результат структурирования метрик сложности позволяет сформировать достаточно информативный метрический базис, состоящий из небольшого количества используемых метрик. Аппарат метрического контроля можно использовать при испытаниях программных средств по требованиям безопасности информации.

Информационная безопасность, программное обеспечение, метрика сложности, дефект безопасности, недекларированные возможности, статический анализ.

Anatoliy A. Korniyenko, Dr. Sci. (Eng.), professor, department chair, kaa.pgups@ya.ru; ***Svetlana V. Diasamidze**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, sv.diass99@ya.ru (Petersburg State Transport University) APPROACH TO STRUCTURING COMPLEXITY METRICS FOR DETECTION OF SOFTWARE SECURITY FLAWS

Objective: To justify application of program complexity metrics as an additional instrument for detecting security flaws when conducting static code analysis. **Methods:** Program metrics methods were applied, and on their basis a method was developed for detecting security flaws in software with the use of program model presented as Yanov schemata, as well as of sum total of structured complexity metrics. **Results:** Two complementary directions for forming informative structured metric base were considered. The first one constitutes ranging complexity metrics on the basis of expert evaluation with the task of determining software security flaws. The second one proposes to rely on results of experimental study of sensitivity of components of expanded metric base for potentially dangerous programming constructs. **Practical importance:** Results of structuring of complexity metrics allows for forming sufficiently informative metrical base consisting of a small number of metrics applied. Metric control apparatus may be applied in testing software on information security requirements.

Information security, software, complexity metrics, security flaw, undocumented features, static analysis.

В современных условиях для поддержания высокого уровня безопасности движения, грузовых и пассажирских перевозок и других критичных технологических процессов и систем важное значение приобретают вопросы обеспечения функциональной и информационной безопасности информационно-управляющих и автоматизированных систем железнодорожного транспорта и программного обеспечения (ПО) как их неотъемлемой составляющей. Для оценки соответствия по требованиям функциональной безопасности ПО построена четырехуровневая система показателей качества безопасности, третий уровень которой представлен метриками качества и сложности программ [8].

В настоящее время в мировой практике используются несколько сотен показателей, в той или иной степени описывающих сложность программ. Однако при реальном использовании метрик исследователи часто пытались максимизировать их универсальность без учета области применения исследуемых программных средств (ПС), что существенно снизило значимость метрик сложности программ как эффективного инструмента оценивания свойств программы на разных этапах жизненного цикла.

Тем не менее, класс метрик для оценивания топологической и информационной сложности программ может с успехом применяться в качестве дополнительного инструмента для выявления дефектов безопасности (ДБ) при статическом анализе программ [3, 6].

Выявление дефектов безопасности ПО (потенциально опасных конструкций (ПОК) и уязвимостей программного кода, недекларированных возможностей, программных закладок и т. п.) на этапе статического анализа связывается с использованием структурированных метрик сложности, с формированием метрического базиса, чувствительного к преднамеренным и непреднамеренным программным искажениям и к выбору критериев обнаружения и распознавания ДБ [2, 4].

Отметим, что структурирование метрик сложности, формирование метрического базиса и решающих правил важно и для задачи динамического контроля целостности [11].

При структурировании метрик сложности и формировании расширенного метрического базиса для оценивания безопасности программ на первом этапе необходимо связать модель программы, выбранную на основе анализа и упорядочения семантик, и совокупность метрик, характеризующих вычислительную структуру контролируемых программ и свойства вычислимости. Такое сопоставление на данном этапе проведено из эвристических соображений, исходя из смыслового содержания метрик топологической и информационной сложности и предположений об их чувствительности к дефектам программного кода, в основе которых лежат топологические характеристики граф-модели программы, а также структуры и модели данных.

Сформированный таким образом расширенный метрический базис может включать до двух десятков достаточно информативных (с точки зрения обнаружения ДБ) метрик топологической и информационной сложности. Дальнейшее структурирование метрик сложности для формирования информативного, но с небольшим количеством наиболее чувствительных к искажениям программ компонент метрического базиса может идти по двум направлениям, дополняющим друг друга:

1) ранжирование метрик сложности на основе экспертного оценивания их чувствительности к ДБ;

2) экспериментальное исследование чувствительности совокупности структурированных метрик сложности к ПОК, имеющимся или внедряемым в программу.

Эти направления формирования информативного структурированного метрического базиса рассмотрены в данной работе.

Формирование расширенного метрического базиса для выявления дефектов безопасности программ

На основе исследований [2, 3, 7, 11] для анализа качества и безопасности программ

предложен метрический базис $M = \{M_1, M_2\}$, где M_1, M_2 – множества показателей, описывающих, соответственно, метрические базисы топологической и информационной сложности. Анализ всех топологических метрик выявил набор метрик, которые могут быть спроецированы на структурированный базис конструкций языка ассемблер и позволяют создать метрический базис структуры программы $M_1 = \{m_{11}, m_{12}, ..., m_{19}\}$ [10, 17]. Совокупность метрик $M_2 = \{m_{21}, m_{22}, ..., m_{25}\}$ отражает информационные свойства программ и составляет метрический базис информационной сложности программ [14] (табл. 1).

Структурирование предложенного метрического базиса на основе экспертного оценивания

В зависимости от целей и углубленности проводимого исследования программы мож-

ТАБЛИЦА 1. Расширенный метрический базис

Показатель	Метрика
Метрический базис топологической сложности программ	
m_{11}	Метрика Джилба $f^* = N^*_{SV} / (L_{loop} + L_{if} + L_{sub})$
m_{12}	Метрика Чена $M(G) = (n(G), N, Q_0)$
m_{13}	Метрика Вудворда (узловая мера) $Y(X)$
m_{14}	Метрика Пивоварского $N(G) = V^*(G) + \sum_i P_i$
m_{15}	Метрика точек пересечения $\min(a, b) < \min(p, q) < \max(a, b)$ & $\max(p, q) > \max(a, b)$ | $\min(a, b) < \max(p, q) < \max(a, b)$ & $\min(p, q) < \min(a, b)$
m_{16}	Функциональная метрика Харрисона – Мейджела $f^* = Nc_1 / f_1$, где $f_1 = \sum c_1$
m_{17}	Метрика регулярных выражений $P(G) = N + L + \sum k$
m_{18}	Метрика Пратта $M(\{F_1, F_2, ..., F_n\}) = \sum_{i=1}^{n} M(F_i)$ $M(IF_P_THEN_F_1_ELSE_F_2) = 2_MAX(M(F_1), M(F_2))$; $M(WHILE_P_DO_F) = 2M(F)$
m_{19}	Метрика Мак – Клура $M(P) = fp^* X(P) + gp^* Y(P)$
Метрический базис информационной сложности программ	
m_{21}	Метрики размера программы $n = n_1 + n_2$; $N = N_1 + N_2$; $N^* = n_1 \log_2 n_1 + n_2 \log_2 n_2$
m_{22}	Информационная энтропия $H(x) = -\sum_{i=1}^{n} p(i) \log_2 p(i)$
m_{23}	Интеллектуальное содержание $I = V \times L$
m_{24}	Метрика Чепина $Q = P + 2M + 3C + 0{,}5T$
m_{25}	Метрика Спена $SP_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} SP_i$

но применять определенную совокупность метрик сложности, составленную из элементов предложенного базиса с последующим ранжированием. При этом наряду с традиционными методами оценивания метрических показателей качества ПС используются методы экспертного оценивания. Наиболее распространены методы анализа иерархий Т. Саати [12] и принятия решений и обработки нечисловой информации по Н. В. Хованову [13]. Тем не менее, с учетом сложности в представлении неопределенности в суждениях экспертов и большого числа матриц попарных сравнений, для низкоуровневой оценки и ранжирования наиболее оправдан подход на основе математической теории свидетельств (теории Демпстера – Шейфера) [15, 18].

Критериями экспертного оценивания при ранжировании метрик сложности, составляющих метрический базис, выступали правила комбинирования теории свидетельств. Основными элементами служат начальные количественные весовые показатели метрик сложности – основные массы вероятности, определяющие субъективную степень уверенности; функция уверенности как общая степень уверенности и ее фокальные элементы с их базовыми вероятностями, полученными в данном случае на основе свидетельств по правилу Демпстера [1, 5].

Это правило позволяет для каждой совокупности фокальных элементов на всем множестве исходных данных сформировать результирующие подмножества и вычислить для них степени уверенности (результирующие комбинированные массы вероятностей), т. е. получить обобщенные весовые показатели метрик сложности, составляющих метрический базис для оценивания безопасности программы.

Для оценивания и ранжирования метрик сложности были привлечены три эксперта ($Э_1$, $Э_2$, $Э_3$), которые определяли весовые показатели для метрик, составляющие метрический базис (табл. 1). Таким образом, рассматривалось множество из 14 альтернатив $A = \{a_1, a_2, ..., a_9, a_{10}, ..., a_{14}\}$, соответствующее метрическому базису $M = \{m_{11}, m_{12}, ..., m_{19}, m_{21}, ..., m_{25}\}$, которым эксперты присвоили следующие количественные весовые показатели (основные массы вероятности):

$Э_1$: $p_1\{a_1\} = 0{,}15$; $p_1\{a_2, a_3, a_4, a_6\} = 0{,}1$; $p_1\{a_5\} = 0{,}15$; $p_1\{a_7, a_8\} = 0{,}08$; $p_1\{a_9\} = 0{,}06$; $p_1\{a_{10}\} = 0{,}18$; $p_1\{a_{12}\} = 0{,}2$; $p_1\{a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}08$.

$Э_2$: $p_2\{a_1\} = 0{,}18$; $p_2\{a_2, a_3, a_4, a_6\} = 0{,}06$; $p_2\{a_5\} = 0{,}19$; $p_2\{a_7, a_8\} = 0{,}02$; $p_2\{a_9\} = 0{,}03$; $p_2\{a_{10}\} = 0{,}3$; $p_2\{a_{12}\} = 0{,}2$; $p_2\{a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}02$.

$Э_3$: $p_3\{a_1\} = 0{,}2$; $p_3\{a_2, a_3, a_4, a_6\} = 0{,}08$; $p_3\{a_5\} = 0{,}2$; $p_3\{a_7, a_8\} = 0{,}06$; $p_3\{a_9\} = 0{,}08$; $p_3\{a_{10}\} = 0{,}15$; $p_3\{a_{12}\} = 0{,}15$; $p_3\{a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}08$.

Уже на этом этапе, исходя из веса присвоенных экспертами начальных масс вероятностей, можно предварительно объединить элементы в группы со следующими весовыми показателями:

$Э_1$: $p_1\{a_1, a_5, a_{10}, a_{12}\} = 0{,}68$; $p_1\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9\} = 0{,}16$; $p_1\{a_7, a_8, a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}16$;

$Э_2$: $p_2\{a_1, a_5, a_{10}, a_{12}\} = 0{,}87$; $p_2\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9\} = 0{,}09$; $p_2\{a_7, a_8, a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}04$;

$Э_3$: $p_3\{a_1, a_5, a_{10}, a_{12}\} = 0{,}7$; $p_3\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9\} = 0{,}16$; $p_3\{a_7, a_8, a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}14$.

Далее для получения обобщенной оценки были скомбинированы начальные значения вероятностей для всех пар экспертов, определены непустые пересечения маргинальных фокальных элементов, рассчитаны степень конфликтности и константа нормализации, нормализированы комбинированные массы вероятностей.

Полученные результирующие комбинированные основные назначения вероятностей экспертов $Э_1$, $Э_2$, $Э_3$ имеют следующие значения:

$\{m_{11}, m_{15}, m_{21}, m_{23}\} - p_{123}\{a_1, a_5, a_{10}, a_{12}\} = 0{,}7441$;

$\{m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{16}, m_{19}\} - p_{123}\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_9\} = 0{,}1636$;

$\{m_{17}, m_{18}, m_{22}, m_{24}, m_{25}\} - p_{123}\{a_7, a_8, a_{11}, a_{13}, a_{14}\} = 0{,}0923$.

На основе анализа указанных результатов получена следующая ранжировка метрик сложности из состава метрического базиса:

$$\{m_{11}, m_{15}, m_{21}, m_{23}\} \succ$$
$$\{m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{16}, m_{19}\} \succ$$
$$\{m_{17}, m_{18}, m_{22}, m_{24}, m_{25}\}.$$

Таким образом, по результатам экспертного оценивания как наиболее предпочтительные для статического анализа выделены метрические характеристики длины текста, метрики Джилба и точек пересечения, а также метрика интеллектуального содержания, что вполне согласуется с представленными ниже результатами экспериментальных исследований.

Структурирование предложенного метрического базиса на основе экспериментального исследования чувствительности метрик сложности к дефектам безопасности

В зависимости от характеристик и особенностей метрик сложности им можно ставить в соответствие порядковую либо относительную измерительные шкалы. Порядковой шкале соответствуют метрики, позволяющие ранжировать некоторые характеристики путем сравнения с опорными (эталонными) значениями, т. е. измерение по этой шкале фактически определяет взаимное положение метрик для конкретных программ. Относительной шкале соответствуют метрики, позволяющие не только оценить рассчитанные значения относительно друг друга, но и определить, как далеко оценки отстоят от границы, начиная с которой характеристика может быть измерена [2, 11].

Оправдан подход к расчету значений метрики сложности как для каждого отдельного функционального объекта (ФО) или модуля в составе исследуемого программного проекта, так и значения метрики для программного проекта в целом [3, 9]. В данном случае наибольшее внимание необходимо уделить не столько отдельным конкретным значениям вычисляемых метрик, сколько соотношению их значений друг с другом. Для оценивания характера относительных изменений метрик информационной сложности были рассчитаны метрические показатели для трех модификаций программы, различающихся способом внедрения в исходный код тестовых потенциально опасных конструкций.

ПОК можно вносить в ручном или в автоматизированном режиме. Автоматический режим создания ПОК подразумевает использование ранее объявленных в программе операторов и операндов. После внедрения ПОК в автоматизированном режиме при неизменном словаре программы значительно увеличивается средний размер кода программы. Вследствие появления такой большой избыточности значение метрики интеллектуального содержания ощутимо увеличивается, а значение уровня реализации программы многократно уменьшается (более чем в 10 раз), что также свойственно вирусной технологии.

В ручном режиме можно максимально замаскировать ПОК путем имитации методов построения программы, примененных разработчиком, и внесения минимально возможных изменений в набор маршрутов выполнения программы. После внедрения такой ПОК метрика уровня реализации практически соответствует исходной программе. Словарь программы при этом незначительно расширяется, что объясняется применением небольшого количества дополнительных операторов, а среднее значение метрики интеллектуального содержания значительно увеличивается.

Таким образом, ясно прослеживается зависимость интеллектуального содержания программы от наличия в ней ПОК. Это объясняется двумя причинами: наличием у внедряемого фрагмента кода собственного интеллектуального содержания и прямой зависимостью между объемом программы и ее интеллектуальным содержанием. Следовательно, наиболее чувствительным показателем наличия в программе внедренного кода является метрика, характеризующая интеллектуальное (информационное) содержание программы.

То есть наблюдаемые относительные изменения значений метрик инвариантны к размеру исследуемой программы или отдельного участка кода. Следовательно, сравнение и анализ рассчитанных для отдельных участков кода и/или функциональных объектов значений выбранной взаимоувязанной тройки метрик, особенно метрики интеллектуального содержания, позволяют более точно локализовывать и в итоге – выявлять потенциально опасные программные конструкции.

Для формирования критерия распознавания признаков ДБ, основанного на сложности управляющего графа программы, помимо абсолютных значений метрик оценивались относительные отклонения по участкам кода, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение в рамках исследуемой программы. В примере в табл. 2 наибольшие отклонения показаны у ФО под номерами 5, 6, 7. Следовательно, потребуется более углубленное изучение данных функциональных объектов как предположительно содержащих в себе ПОК.

В целом экспериментальные исследования выбранных метрик сложности показали высокий уровень их корреляции (0,93–0,98) с общим количеством дефектов.

Метрики сложности из сформированного метрического базиса можно рассчитывать уже на первом этапе статического анализа. Но необходимо учитывать, что первоначальное состояние программного средства и составляющих его ФО, как правило, достаточно обфускированно. В связи с этим рассчитанные значения метрик сложности не всегда достоверно отражают удовлетворение критериям. Тем не менее, получение значений метрик на данном этапе и их сравнительный анализ в качестве экспресс-исследования

ТАБЛИЦА 2. Исследование программного проекта с разделением по функциональным объектам

Объект	Словарь n	Уровень реализации L	Интеллектуальное содержание I	Метрика Джилба f^*	Метрика точек пересечения
ФО 1	21	0,070	44,982	2,843	5586
ФО 2	22	0,021	54,784	2,825	5585
ФО 3	17	0,118	61,962	2,869	5580
ФО 4	21	0,104	62,780	2,849	5589
ФО 5	21	0,017	48,538	2,772	5578
ФО 6	17	0,222	94,235	2,894	5593
ФО 7	18	0,222	87,538	2,872	5575
ФО 8	23	0,025	69,651	2,828	5583
ФО 9	19	0,154	67,556	2,779	5586
ФО 10	16	0,182	71,636	2,793	5589
ФО 11	15	0,118	67,556	2,791	5589
Математическое ожидание	19,091	0,114	66,474	2,831	5585,435
Среднеквадратичное отклонение	2,663	0,076	14,859	0,041	5,017

позволяет выявлять потенциально наиболее опасные ФО.

Для получения более полной и достоверной информации необходимо рассчитать значения метрики Джилба и метрики точек пересечения после очистки программы, т. е. после устранения дефектов, выражающихся, в первую очередь, зацикливанием и избыточностью. Вычисление значений метрик сложности по каждому ФО после таких преобразований дает возможность наиболее достоверно оценить информационные и топологические характеристики программы и как следствие – более точно локализовать потенциально опасные конструкции.

На основе полученных данных сформулированы критерии для классификации выявленных ДБ как потенциально опасных программных конструкций:

• характер относительных изменений между отдельными ФО и ПС в целом метрик информационной сложности: теоретической и реальной длины программы, метрики интеллектуального содержания и ее составляющих;

• превышение для метрик Джилба и точек пересечения, усредненного по ФО значения отношений среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию, некоторых граничных значений, устанавливаемых экспериментально.

Заключение

Рассмотрены два взаимодополняющих направления формирования информативного структурированного метрического базиса. Приведен вариант ранжирования метрик сложности на основе экспертного оценивания для выявления дефектов безопасности программного обеспечения. Описаны результаты экспериментального исследования чувствительности компонент расширенного метрического базиса к потенциально опасным программным конструкциям. Предлагаемые варианты комбинаций метрик сложности могут использоваться как дополнительные инструменты при сертификационных испытаниях программных средств по требованиям безопасности информации.

Библиографический список

1. Ганцева Е. А. Статистический подход разрешения неопределённости экспертных суждений на основе теории случайных множеств / Е. А. Ганцева, В. А. Каладзе // Вестн. ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 82–88.

2. Диасамидзе С. В. Использование метрик сложности для оценивания качества программ / С. В. Диасамидзе, В. А. Новиков, А. А. Платонов // Информационные технологии на железнодорожном транспорте : докл. XII междунар. науч.-практич. конф. «Инфотранс-2007». – СПб. : ПГУПС, 2008. – С. 70–72.

3. Диасамидзе С. В. Метод выявления недекларированных возможностей программ с использованием структурированных метрик сложности : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.13.19 / С. В. Диасамидзе : Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2012. – 16 с.

4. Диасамидзе С. В. Метод и методика выявления недекларированных возможностей программ с использованием структурированных метрик сложности / С. В. Диасамидзе // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 3 (32). – С. 29–36.

5. Коваленко И. И. Оценка качества программных продуктов с использованием теории Демпстера – Шейфера / И. И. Коваленко, А. В. Швед // Наукові праці. Серія : Комп'ютерні технології. – Т. 160, вип. 148. – Миколаїв : Редакційно-видавничий центр ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – С. 22–26.

6. Корниенко А. А. Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте: в 2 ч. Ч. 2. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности на железнодорожном транспорте / А. А. Корниенко и др. ; под ред. А. А. Корниенко. – М. : УМЦ ЖДТ, 2014. – 448 с.

7. Корниенко А. А. Методическое и инструментальное обеспечение оценки соответствия программных средств железнодорожного транс-

порта в системе требований «качество – безопасность» / А. А. Корниенко, М. Л. Глухарев, С. В. Диасамидзе и др. // Интеллектуальные системы на транспорте : сб. материалов III междунар. науч.-практич. конф. «ИнтеллектТранс-2013». – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 80–89.

8. Корниенко А. А. Обязательное подтверждение соответствия программных средств железнодорожного транспорта / А. А. Корниенко, В. И. Сафонов // Транспорт РФ. Спецвыпуск «Наука и транспорт». – 2009. – № 3 (22). – С. 36–39.

9. Маевский Д. А. Оценка количества дефектов программного обеспечения на основе метрик сложности / Д. А. Маевский, С. А. Яремчук // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 07 (83). – С. 113–120.

10. Майерс Г. Надежность программного обеспечения / Г. Майерс ; пер. с англ. ; под ред. В. Ш. Кауфмана. – М. : Мир, 1980. – 360 с.

11. Платонов А. А. Контроль целостности динамических объектов вычислительных систем с использованием метрических эталонов / А. А. Платонов, В. И. Тимофеев // Тр. СПИИРАН. – 2015. – Вып. 1 (38). – С. 136–160.

12. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1989. – 316 с.

13. Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците / Н. В. Хованов. – СПб. : СПбГУ, 1996.

14. Холстед М. Х. Начала науки о программах / М. Х. Холстед ; пер. с англ. В. М. Юфы. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 128 с.

15. Dempster A. P. A generalization of Bayesian inference / A. P. Dempster // J. R. Stat. Soc. – 1968. – Vol. 30. – P. 205–247.

16. McCabe T. J. A complexity measure // IEEE Trans. Software Eng. – 1976. – Vol. SE-2, N 4, Dec. – P. 308–320.

17. Neelamegam C. Enhanced ensemble prediction algorithms for detecting faulty modules in object oriented systems using quality metrics / C. Neelamegam, M. Punithavalli // J. Comp. Sci. – 2012. – Vol. 8, Is. 12. – P. 2075–2082.

18. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence / G. Shafer. – Princeton : Princeton Univ. Press, 1976. – 297 p.

References

1. Gantseva Ye. A. & Kaladze V. A. *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii – Annals of the Voronezh State University. Systemic Analysis and Information Technologies Series*, 2015, no. 2, pp. 82-88.

2. Diasamidze S. V., Novikov V. A. & Platonov A. A. Ispolzovaniye metrik slozhnosti dlya otsenivaniya kachestva programm [Using Complexity Metrics for Assessment of Quality of Programs]. *Informatsionnyye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: doklady XII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii „Infotrans-2007“ [Information Technologies In Rail Transport: Proc. of the 12th Int. Sci. and Pract. Conf. „Infotrans-2007“]*. St. Petersburg, PGUPS, 2008. Pp. 70-72.

3. Diasamidze S. V. Metod vyyavleniya nedeklarirovannykh vozmozhnostey program s ispolzovaniyem strukturirovannykh metrik slozhnosti: avtoreferat dissertatatsii … kand. tekhn. nauk [A Method for Identification of Undocumented Features of Programs with the Use of Structured Complexity Metrics: Extended Abstract of a Thesis for the Degree of Cand. Sci. (Eng.)]. Petersburg State Transp. Univ. St. Petersburg, 2012. 16 p.

4. Diasamidze S. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2012, Is. 3 (32), pp. 29-36.

5. Kovalenko I. I. & Shved A. V. Otsenka kachestva programnykh produktov s ispolzovaniyem teorii Dempstera – Sheyfera [Assessment of Quality of Programming Products with the Use of the Dempster – Shafer Theory]. Naukovi pratsi. Seriya: Kompyuterni tekhnolohiyi [Proc. Computer Technologies Series]. T. 160, Is. 148. Mykolaiv: Redaktsiyno-vydavnychyy tsentr ChDU im. Petra Mohyly, 2011. Pp. 22-26.

6. Korniyenko A. A. et al. Informatsionnaya bezopasnost i zashchita informatsii na zheleznodorozhnom transporte [Information Security and Data Protection in Rail Transport], 2 Vols. Vol. 2. Programmno-apparatnyye sredstva obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Software and Hardware Tools for Ensuring Information Security in Rail Transport]; ed. A. A. Korniyenko. Moscow, UMTs ZhDT, 2014. 448 p.

7. Korniyenko A. A., Glukharev M. L., Diasamidze S. V., Zakharchenko S. S. & Polyanichko M. A.

Metodicheskoye i instrumentalnoye obespecheniye otsenki sootvetstviya programmnykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta v sisteme trebovaniy «kachestvo – bezopasnost» [Methodological and Tool Support for Assessment of Correspondence of Rail Transport Software in the Quality – Safety Requirements System]. *Intellektualnyye sistemy na transporte: sbornik materialov III nauchno-prakticheskoy konferentsii "IntellektTrans-2013" [Intellectual Systems on Transport: Coll. Papers of the 3rd Sci. and Practical Conf. IntellektTrans-2013]*. St. Petersburg, PGUPS, 2013. Pp. 80-89.

8. Korniyenko A.A. & Safonov V.I. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Spetsvypusk "Nauka i Transport" – Transport of the Russian Federation. Sci. and Transport Spec. Is.*, 2009, no. 3 (22), pp. 36-39.

9. Mayevskiy D.A. & Yaremchuk S.A. *Elektrotekhnicheskiye i kompyuternyye sistemy – Electrotechnical and Computer Systems*, 2012, no. 07 (83), pp. 113-120.

10. Mayers G. Nadezhnost programmnogo obespecheniya [Software Reliability]. ed. V.Sh. Kaufman. Moscow, Mir, 1980. 360 p.

11. Platonov A.A. & Timofeyev V.I. Kontrol tselostnosti dinamicheskikh obyektov vychislitelnykh sistem s ispolzovaniyem metricheskikh etalonov [Continuity Test of Dynamic Objects of Computing Systems Using Metrical Templates]. *Trudy SPIIRAN – Proc. of St. Petersburg Inst. for Informatics and Automation of the Russian Acad. of Sci.*, 2015, Is. 1 (38), pp. 136-160.

12. Saati T.L. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy [Decision Making. Analytic Hierarchy Process]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 316 p.

13. Khovanov N.V. Analiz i sintez pokazateley pri informatsionnom defitsite [Analysis and Synthesis of Indices under Information Scarcity]. St. Petersburg, SPbGU, 1996.

14. Kholsted M.Kh. Nachala nauki o programmakh [Programming Science Basics]. Moscow, Finansy i statistika, 1981. 128 p.

15. Dempster A.P. A generalization of Bayesian inference. *J.R. Stat. Soc.*, 1968, Vol. 30, pp. 205-247.

16. McCabe T.J. A complexity measure. *IEEE Trans. Software Eng.*, 1976, Vol. SE-2, no. 4, Dec., pp. 308-320.

17. Neelamegam C. & Punithavalli M. Enhanced ensemble prediction algorithms for detecting faulty modules in object oriented systems using quality metrics.*J. Comp. Sci.*, 2012, Vol. 8, Is. 12, pp. 2075-2082.

18. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton, Princeton Univ. Press, 1976. 297 p.

КОРНИЕНКО Анатолий Адамович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kaa.pgups@ya.ru; *ДИАСАМИДЗЕ Светлана Владимировна – канд. техн. наук, sv.diass99@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.042.7

Н. В. Никонова

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ И РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

Дата поступления: 09.06.2016
Решение о публикации: 06.09.2016

Цель: Разработать алгоритм нахождения опасной частоты сейсмического воздействия для сейсмоизолированного сооружения. **Методы:** В работе применены метод динамического расчета сооружений, численное моделирование колебаний на ЭВМ; для достижения поставленной цели использованы записи акселерограмм прошлых землетрясений. **Результаты:** Предложена новая методика поиска опасной частоты сейсмического воздействия для сейсмоизолированной системы. Для задания опасной частоты сейсмического воздействия разработан итерационный алгоритм, основанный на использовании зависимости пиковых ускорений воздействия от его преобладающей частоты и зависимости опасной частоты воздействия от относительного коэффициента трения, который равен отношению фактического коэффициента трения в системе к амплитуде воздействия в долях от ускорения свободного падения. По результатам расчетов одной из таких систем можно сделать вывод, что сгенерированная акселерограмма расчетного воздействия с преобладающей частотой, найденной по предлагаемой методике, опасна для сооружения, и расчет по ней дает результаты в запас прочности сооружения. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют генерировать сейсмические воздействия, по которым подбирают параметры сейсмоизоляции и оценивают ее эффективность на ранних стадиях проектирования, а также проектировать типовые конструкции фундаментов.

Нелинейные системы сейсмоизоляции, расчетная акселерограмма, опасная частота воздействия.

Nataliya V. Nikonova, teaching fellow, lovelynataxa@inbox.ru (Petersburg State Transport University)

SPECIFIC FEATURES OF SETTING IMPACT AND CALCULATION OF NON-LINEAR SEISMIC ISOLATION SYSTEMS

Objective: To develop an algorithm for finding dangerous frequency of seismic impact for seismic-isolated structures. **Methods:** In the work, methods of dynamic structure design and computer-based numerical simulation of vibrations were applied. Accelerograms recording past earthquakes were used to pursue the objective. **Results:** A new method for finding dangerous frequency of seismic impact for seismic-isolated structures was proposed. To set a dangerous frequency of seismic impact, an iteration algorithm was developed, based on the application of dependency of peak accelerations of impact from its dominant frequency and the dependency between dangerous frequency of impact and relative friction coefficient, which equals relation of actual friction coefficient in the system to impact range in fractions of free-falling acceleration. From calculation results of one such system it can be concluded that a generated accelerogram of calculated impact with dominant frequency measured by the suggested method is dangerous for a structure, and calculations based on it provides results for structure's strength reserve. **Practical importance:** Study results allow for generating seismic impact through which seismic isolation parameters can be set, and its efficiency can be evaluated at early design stages, as well as help develop standard foundation designs.

Non-linear seismic isolation systems, calculation accelerogram, dangerous impact frequency.

Действующий нормативный подход к расчету сооружений на сейсмические нагрузки основан на применении линейно-спектральной методики, использование которой невозможно для нелинейных систем сейсмоизоляции, имеющих нелинейную диаграмму деформирования. В таких случаях рекомендуется вести расчет на акселерограммы землетрясений. Здесь сложности возникают с заданием воздействия, так как спектральный состав и амплитуда расчетной акселерограммы заранее неизвестны. СП «Строительство в сейсмических районах» рекомендует вести расчет на акселерограмму, полученную при изысканиях сейсмологами. Однако такая акселерограмма, как правило, появляется только в конце проектирования, в то время как для заказа параметров систем сейсмозащиты требуется оценить их параметры на первых этапах проектирования. Таким образом, возникает потребность в воздействии, расчет на которое являлся бы заведомо консервативным.

Поиск опасной частоты сейсмического воздействия для нелинейных систем сейсмоизоляции – трудная задача, поскольку у таких систем отсутствует резонансная частота, так как их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) многозначны и могут иметь причудливую форму (рис. 1) [1, 2, 10, 12, 13]. При этом рекомендуется строить АЧХ системы и выбирать на ней наиболее опасную точку. Однако в упомянутых работах не сказано, что вид самой АЧХ зависит от амплитуды задаваемого воздействия, что детально описано в [5]. Этот факт еще более усложняет задачу поиска опасной частоты для нелинейных систем сейсмоизоляции, поскольку требуется построение набора АЧХ при различных амплитудах воздействия, причем фактическая амплитуда воздействия заранее неизвестна.

Методика решения задачи

Для корректного решения поставленной задачи предлагается обезразмерить исходное уравнение колебаний для одномассной системы:

$$m\ddot{q} + Q + cq = -m\ddot{y}_0, \qquad (1)$$

где m – масса системы; q – смещение; Q – сила нелинейного сопротивления демпфера; c – жесткость; $\ddot{y}_0$ – акселерограмма задаваемого воздействия.

Предварительно силу нелинейного сопротивления демпфера Q представим в виде суммы сил вязкого и сухого трения [6]:

$$Q = b\left|\dot{q}\right|^{\alpha} sign(\dot{q}) \cong (\beta\left|\dot{q}\right| + F)sign(\dot{q}),$$

где b и α – характеристики демпфера; β – коэффициент вязкого трения; F – сила сухого трения. Величины указанных параметров связаны между собой выражениями [6]:

$$\beta = \alpha b;$$
$$F = b(1-\alpha).$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$m\ddot{q} + (\beta\left|\dot{q}\right| + F)sign(\dot{q}) + cq = -m\ddot{y}_0$$

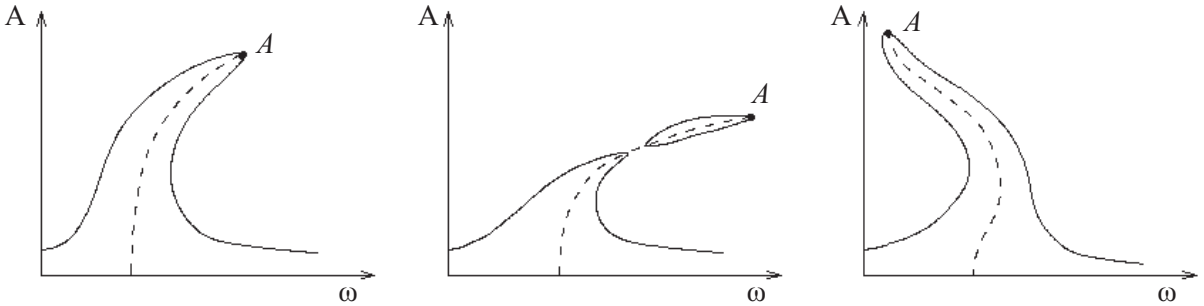


Рис. 1. Возможные виды амплитудно-частотных характеристик нелинейных систем

или – после раскрытия скобок и деления на массу m –

$$\ddot{q}+\frac{\beta}{m}\dot{q}+\frac{F}{m}sign(\dot{q})+\frac{c}{m}q=-\ddot{y}_0. \qquad (2)$$

С учетом того, что $\frac{\beta}{m}=\gamma k$; $\frac{F}{m}=fg$ и $\frac{c}{m}=k^2$, уравнение (2) можно привести к виду

$$\ddot{q}+\gamma k\dot{q}+fgsign(\dot{q})+k^2q=-\ddot{y}_0, \qquad (3)$$

где γ – коэффициент упругого сопротивления; k – частота колебаний системы; f – коэффициент сухого трения.

Далее уравнение (3) записывается в безразмерных ускорениях по методике, приведенной в [8, 9]. Для этого переходят к безразмерным смещениям $\xi=\frac{q}{AgT^2}$ и безразмерному времени $\frac{d}{dt}=\frac{d}{d\tau}\cdot\frac{1}{T}$ (в приведенных зависимостях T – период колебаний; A – ускорение расчетного воздействия в долях ускорения свободного падения g). При этом уравнение колебаний одномассной системы приобретает вид

$$\ddot{\xi}+2\pi\gamma\dot{\xi}+4\pi^2\xi-f_{\text{отн}}\cdot sign(\dot{\xi})=-T^2\ddot{\bar{y}}_0,$$

где $f_{\text{отн}}=\frac{f}{A}$ – относительный коэффициент сухого трения; $\ddot{\bar{y}}_0=\frac{\ddot{y}_0}{Ag}$ – безразмерное ускорение задаваемого воздействия.

Преимуществом предлагаемой формы записи уравнений колебаний является то, что она уже не зависит от амплитуды. В соответствии с безразмерным уравнением можно построить АЧХ землетрясений в виде зависимости безразмерных ускорений или смещений от безразмерной частоты при различных значениях относительного коэффициента трения. По построенным АЧХ можно получить зависимость опасной частоты от относительного коэффициента трения.

Далее принимается в расчет тот факт, что амплитуда воздействия зависит от преобладающей частоты воздействия [4, 11, 14, 15] (рис. 2).

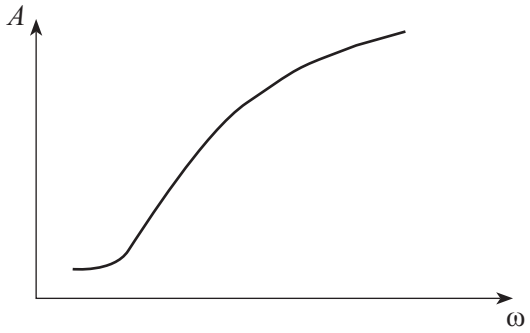


Рис. 2. Амплитуда воздействия зависит от преобладающей частоты воздействия

Задача состоит в том, чтобы подобрать такое воздействие, преобладающая частота которого является резонансной для сооружения.

Далее предлагаемый расчет носит итерационный характер. Порядок расчета:

1) для начального приближения принимается в качестве опасной частоты частота линейной системы;

2) по графику $\omega(f_{\text{отн}})$ определяется относительный коэффициент трения;

3) по найденному в п. 2 относительному коэффициенту трения вычисляется амплитуда воздействия;

4) по вычисленной в п. 3 амплитуде воздействия по графику $A(\omega)$ снова определяется частота воздействия.

Пункты 2–4 необходимо повторять до тех пор, пока найденная в п. 4 опасная частота воздействия не совпадет с опасной частотой воздействия, вычисленной на предыдущем шаге;

5) по найденной опасной частоте генерируется воздействие;

6) система рассчитывается на сгенерированное воздействие.

Расчетная схема

В качестве примера был рассмотрен проект моста для олимпийских объектов в г. Сочи [7].

Расчетная схема для построения АЧХ принятой системы сейсмоизоляции приведена на рис. 3. Схема включает 10 элементов. Массы опор приведены к их верху исходя из сохранения их жесткости и периода колебаний.

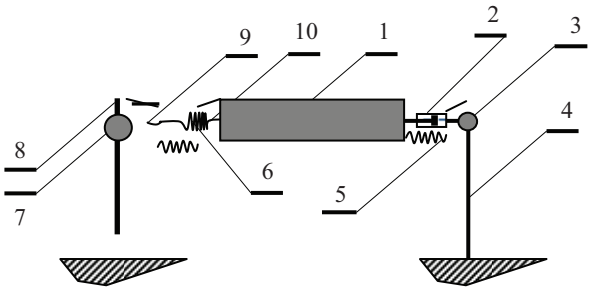


Рис. 3. Расчетная схема для качественного анализа эффективности принятой системы защиты: 1 – пролетное строение; 2 – вязкий демпфер; 3 – точка, в которой сосредоточена масса правой опоры; 4 – стержень, жесткость которого моделирует жесткость правой опоры; 5, 6 – элементы, имеющие вспомогательные жесткости; 7 – стержень, жесткость которого моделирует жесткость левой опоры; 8 – точка, в которой сосредоточена масса левой опоры; 9 – ФПС; 10 – упругий элемент

В расчетную схему дополнительно введены два упругих элемента, объединяющие систему в момент проскальзывания фрикционно-подвижного соединения (ФПС). Жесткость элементов принята малой, они введены для того, чтобы в процессе вычислений матрица жесткости не становилась особенной.

Рассматриваемая система имеет три степени свободы. Ее уравнение движения имеет вид

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B_v}\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B_h}\tilde{\mathbf{Y}} + \mathbf{CY} = \\ = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}_0 + \mathbf{Q_1} + \mathbf{Q_2}, \quad (4)$$

где $\mathbf{M}$ – матрица инерции; $\mathbf{B_v}$ – матрица вязкого демпфирования; $\mathbf{B_h}$ – матрица гистерезисного демпфирования; $\mathbf{C}$ – матрица жесткости; $\mathbf{Q_1}$– вектор сил трения в открытых демпферах сухого трения (ДСТ); $\mathbf{Q_2}$ – вектор сил, вызванных остаточными смещениями в закрытых ДСТ.

Для записи уравнения (4) в безразмерных ускорениях обе его части были разделены на пиковое ускорение Ag. Тогда в качестве смещения выступает размерная величина, измеряемая в c^2. Однако, как и в уравнениях с одной степенью свободы, в рассматриваемой системе уравнений фигурирует нормированная акселерограмма и относительный коэффициент трения.

Пример расчета

По результатам расчета построены АЧХ пролетного строения и левой опоры моста (см. рис. 3) при разных амплитудах ускорений воздействия. Разные амплитуды воздействия получены изменением величины A – ускорения в долях от ускорения свободного падения. АЧХ построены для следующих значений: $A = 1$; $A = 2$; $A = 4$. Для построения АЧХ приняты значения относительного коэффициента трения:

$$f_{\text{отн},1} = \frac{f}{A_1} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_1} = \frac{1800}{1136 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}1} = 1{,}615;$$

$$f_{\text{отн},2} = \frac{f}{A_2} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_2} = \frac{1800}{1136 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}2} = 0{,}807;$$

$$f_{\text{отн},3} = \frac{f}{A_3} = \frac{F_{\text{тр}}}{m \cdot g \cdot A_3} = \frac{1800}{1136 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}4} = 0{,}404.$$

Расчеты выполнены в программе Drakon для расчета систем с ДСТ. Программу разработали А. А. Долгая и И. О. Кузнецова под руководством А. М. Уздина [3, 16].

Полученные графики приведены на рис. 4.

В соответствии с полученными АЧХ построен график зависимости опасной частоты воздействия ω от относительного коэффициента трения $f_{\text{отн}}$ (рис. 5).

Далее был реализован описанный алгоритм итерационного расчета. В первом приближении опасная частота воздействия принята по рис. 4а (по АЧХ, построенной при $A = 1$), по ней рассчитан период опасного воздействия. Затем найдена предполагаемая амплитуда воздействия для площадки с заданной сейсмичностью, по этой амплитуде вычислен относительный коэффициент трения. По вы-

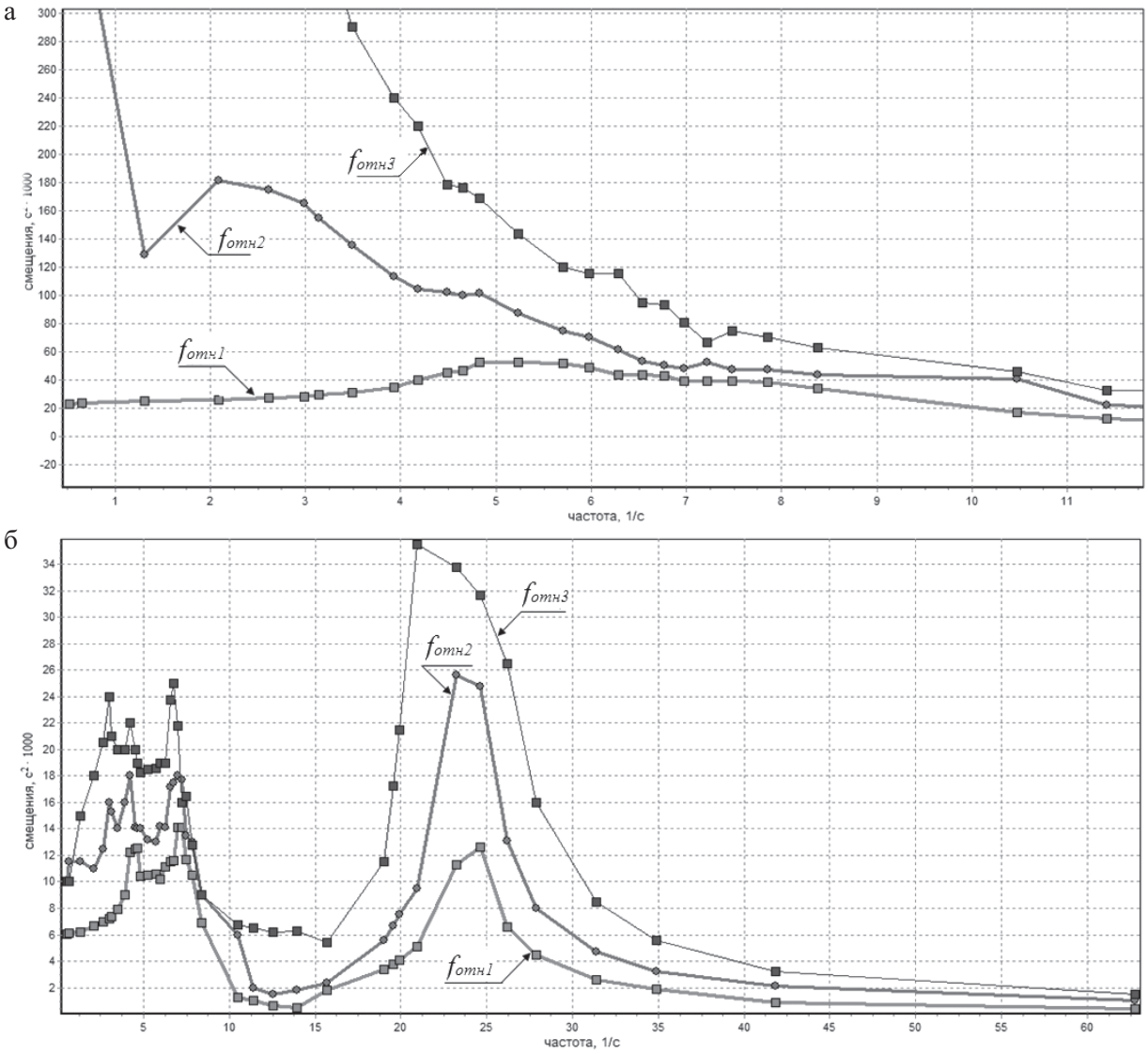


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики колебаний пролетного строения (а) и левой опоры (б)

численному относительному коэффициенту трения при помощи графика (рис. 5) определена опасная частота воздействия. Она не совпала с той частотой, которая была принята за опасную в начале расчета. Чтобы частота, принятая в начале расчета за опасную, совпала с найденной опасной частотой, выполнены еще две итерации.

Далее сгенерировано воздействие с преобладающей найденной опасной частотой.

После этого рассчитаны смещения пролетного строения относительно опор под разными воздействиями: от синтетического воздействия, сгенерированного по указанной методике (span5acc), от записанных акселерограмм разрушительных землетрясений прошлых лет (HOLLISTER2-9, HOLLISTER1-9, Tabas74, Tabas2). Полученные смещения приведены в табл. 1.

Аналогичный расчет выполнен для левой опоры моста. Подбор опасных частот сведен в табл. 2, 3.

Выводы

На рис. 4 показано, что максимальные значения смещений пролетного строения, а также

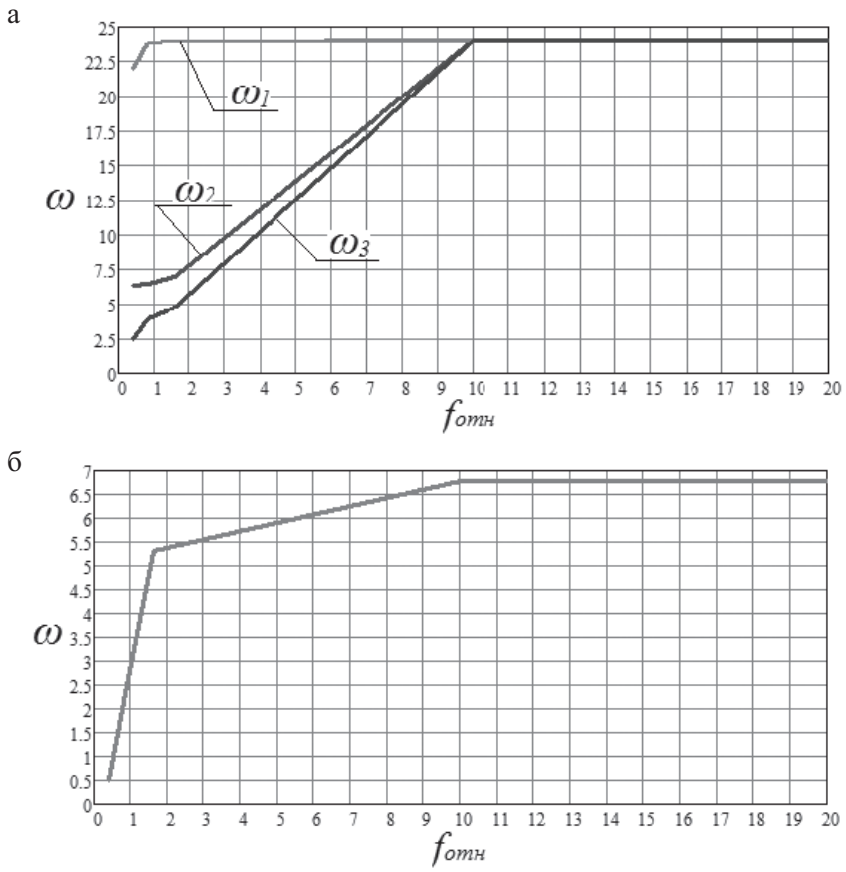


Рис. 5. График зависимости опасной частоты воздействия от относительного коэффициента трения: а) для определения опасной частоты пролетного строения; б) для определения опасных частот левой опоры; ω_1 – опасная частота «правого пика» АЧХ; ω_2 – опасная частота правой вершины «левого пика» АЧХ; ω_3 – опасная частота левой вершины «левого пика» АЧХ

ТАБЛИЦА 1. Смещения пролетного строения относительно опор при различных сейсмических воздействиях

Воздействие	Смещение пролетного строения относительно опор, м
span5acc	0,391
Tabas2	0,315
Tabas74	0,254
HOLLISTER1–9	0,18
HOLLISTER2–9	0,065

смещения и ускорения левой опоры не соответствуют частоте их колебаний в закрытом состоянии. С уменьшением значения $f_{отн}$ опасная (резонансная) для рассматриваемого сооружения частота уменьшается. Воздействие, сгенерированное для сооружения по частоте, найденной по приведенному алгоритму, является более опасным для рассматриваемого сооружения, чем ряд сильнейших землетрясений прошлых лет.

ТАБЛИЦА 2. Итерационный подбор опасной частоты воздействия для левой опоры моста

№ итерации	Опасная частота воздействия (п. 1)	Опасный период воздействия	Предполагаемая амплитуда воздействия для площадки с сейсмичностью 8, 9, 10	Относительный коэффициент трения	Опасная частота воздействия (п. 3)
«Правый пик»					
1	24	0,262	1,131	0,143	21
2	21	0,3	1,06	0,152	21
Правая вершина «левого пика»					
1	7	0,897	0,538	0,3	6,5
2	6,5	0,966	0,511	0,31	6,5
Левая вершина «левого пика»					
1	4,8	1,308	0,419	0,385	2,5
2	2,5	2,512	0,328	0,492	3
3	3	2,093	0,341	0,474	2,9
4	2,9	2,165	0,338	0,478	2,9

ТАБЛИЦА 3. Смещения пролетного строения относительно опор при различных сейсмических воздействиях

Воздействие	Смещение, м	Ускорение, м/с^2
Tabas2	0,028	15,1
Tabas74	0,03	16,3
HOLLISTER2–9	0,012	4,65
HOLLISTER1–9	0,016	9
Акселерограмма 1, сгенерированная по опасной частоте «правого пика»	0,04	21,8
Акселерограмма 2, сгенерированная по опасной частоте «правого пика»	0,095	45,8
Акселерограмма, сгенерированная по опасной частоте для правой вершины «левого пика»	0,04	15,5
Акселерограмма, сгенерированная по опасной частоте для левой вершины «левого пика»	0,033	12,4

Библиографический список

1. Авидон Г. Э. Анализ работы сейсмоизолирующих фундаментов на опорных элементах с отрицательной жесткостью / Г. Э. Авидон, Г. В. Давыдова, Ф. А. Доронин и др. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2009. – № 3. – С. 15–21.

2. Вибрации в технике ; под ред. И. И. Блехмана. Т. 2. – М. : Машиностроение, 1979. – 351 с.

3. Гордеев Ю. В. Моделирование устройств специальной сейсмозащиты кусочно-линейными системами / Ю. В. Гордеев, И. О. Кузнецова // Сейсмостойкое строительство. – 1996. – Вып. 4. – С. 37–41.

4. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А. А. Долгая // Сейсмостойкое строительство. – 1994. – Вып. 5–6. – С. 56–63.

5. Долгая А. А. Теория диссипативных систем / А. А. Долгая, А. В. Индейкин, А. М. Уздин. – СПб. : ПГУПС, 1999. – 99 с.

6. Дурсенева Н. В. Оценка сейсмостойкости специальных демпфированных систем / Н. В. Дурсенева, А. М. Уздин, М. Ю. Федорова // VI Поляховские чтения : междунар. конф. по механике, посвященная 95-летию со дня рождения С. В. Валландера : избр. труды, СПб., 31.01.2012–03.02.2012. – СПб., 2012. – 2 с.

7. Жгутова Т. В. Сейсмоизоляция железнодорожных мостов в Сочи / Т. В. Жгутова, И. О. Кузнецова, А. М. Уздин, С. А. Шульман // Труды заседания рабочей группы междунар. об-ва по системам сейсмозащиты (ASSISi), 2011. – Сочи, 2011. – С. 119–132.

8. Квасников Б. Н. Аппроксимация уравнений движения некоторых типов кинематических опор / Б. Н. Квасников, С. Н. Коузах // Сейсмостойкое строительство. – 1994. – Вып. 1. – С. 20–25.

9. Квасников Б. Н. Использование асимптотического метода построения «укороченных» уравнений сейсмических колебаний сооружений на кинематических фундаментах / Б. Н. Квасников, С. Н. Коузах // Сейсмостойкое строительство. – 1996. – Вып. 4. – С. 50–55.

10. Коловский М. З. Нелинейная теория виброзащитных систем / М. З. Коловский. – М. : Наука, 1966. – 317 с.

11. Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. – СПб. : Петропавловск-Камчатский : КамЦентр, 1996. – 12 с.

12. Уздин А. М. Расчет элементов и оптимизация параметров сейсмоизолирующих фундаментов / А. М. Уздин, А. А. Долгая. – М. : ВНИИНТПИ, 1997. – 76 с.

13. Уздин А. М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений : учеб. пособие / А. М. Уздин, С. В. Елизаров, Т. А. Белаш. – М. : УМЦ ЖДТ, 2012. – 500 с.

14. Dmitrovskaya L. N. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales / L. N. Dmitrovskaya, A. M. Uzdin // First European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 Sept. 2006. Geneva, 2006, Paper no. 32.

15. Dolgaya A. A. Earthquake accelerations for construction calculating with different responsibility degrees / A. A. Dolgaya, A. V. Indeykin, A. M. Uzdin // Structural Dynamics – EURODYN'96; 1996 Balkema, Rotterdam. – Rotterdam, 1996. – P. 143–147.

16. Kuznetsova I. O. Seismic protection of railway bridges in Sochi / I. O. Kuznetsova, A. M. Uzdin, T. V. Zhgutova, S. A. Shulman // Proc. of Workshop "Bridges seismic isolation and large-scale modeling" St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. – P. 28–38.

References

1. Avidon G. E., Davydova G. V., Doronin F. A., Karlina Ye. A. & Uzdin A. M. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2009, no. 3, pp. 15-21.

2. Vibratsii v tekhnike [Vibrations in Engineering]; ed. I. I. Blekhman. Vol. 2. Moscow, Mashinostroyeniye, 1979. 351 p.

3. Gordeyev Yu. V. & Kuznetsova I. O. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1996, Is. 4, pp. 37-41.

4. Dolgaya A. A. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1994, Is. 5–6, pp. 56-63.

5. Dolgaya A. A., Indeykin A. V. & Uzdin A. M. Teoriya dissipativnykh sistem [Dissipative Systems Theory]. St. Petersburg, PGUPS, 1999. 99 p.

6. Durseneva N. V., Uzdin A. M. & Fedorova M. Yu. Otsenka seysmostokosti spetsialnykh dempfirovannykh sistem [Evaluation of Seismic Resistance of Special Damping Systems]. *VI Polyakhovskiye chteniya: mezhdunarodnaya konferentsiya po mekhanike, posvyashchennaya 95-letiyu so dnya rozhdeniya S. V. Vallandera [6th Polyakhov Readings: Int. Conf. in Mechanics Dedicated to the 95th Anniversary of Birth of S. V. Vallander]*, Selected Proceedings, St. Petersburg, Jan. 31 – Feb. 3, 2012. St. Petersburg, 2012. 2 p.

7. Zhgutova T.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M. & Shulman S.A. Seysmoizolyatsiya zheleznodorozhnykh mostov v Sochi [Seismic Isolation of Railway Bridges in Sochi]. *Trudy zasedaniya rabochey gruppy mezhdunarodnogo obshchestva po sistemam seysmozashchity (ASSISi) [Proc. of a Session of a Working Group of the Seismic Resistance Systems (ASSISi)]*, 2011. Pp. 119-132.

8. Kvasnikov B.N. & Kouzakh S.N. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1994, Is. 1, pp. 20-25.

9. Kvasnikov B.N. & Kouzakh S.N. *Seysmostoykoye stroitelstvo – Antiseimsic Construction*, 1996, Is. 4, pp. 50-55.

10. Kolovskiy M.Z. Nelineynaya teoriya vibrozashchitnykh sistem [Non-Linear Theory of Vibration-Resistant Systems]. Moscow, Nauka, 1966. 317 p.

11. Rekomendatsii po zadaniyu seysmicheskikh vozdeystviy dlya rascheta zdaniy raznoy stepeni otvetstvennosti [Recommendations for Setting Seismic Impacts for Calculation of Buildings of Various Degree of Liability]. St. Petersburg, Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamTsentr, 1996. 12 p.

12. Uzdin A.M. & Dolgaya A.A. Raschet elementov i optimizatsiya parametrov seismoizoliruyushchikh fundamentov [Calculation of Elements and Optimisation of Parameters of Seismic-Isolated Foundations]. Moscow, VNIINTPI, 1997. 76 p.

13. Uzdin A.M., Yelizarov S.V. & Belash T.A. Seysmostoykiye konstruktsii transportnykh zdaniy i sooruzheniy: uchebnoye posobiye [Seismic-Resistant Constructions of Transport Buildings and Structures: Course Guide]. Moscow, UMTs ZhDT, 2012. 500 p.

14. Dmitrovskaya L.N. & Uzdin A.M. Earthquake displacements setting for calculating structures and building earthquake scales. *First European Conf. on Earthquake Eng. and Seismology*, Geneva, Switzerland, 3–8 Sept. 2006. Geneva, 2006, Paper no. 32.

15. Dolgaya A.A., Indeykin A.V. & Uzdin A.M. Earthquake accelerations for construction calculating with different responsibility degrees. *Structural Dynamics – EURODYN'96*, 1996 Balkema, Rotterdam. Rotterdam, 1996. Pp. 143-147.

16. Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Zhgutova T.V. & Shulman S.A. Seismic protection of railway bridges in Sochi. *Proc. of Workshop "Bridges seismic isolation and large-scale modeling"*, St. Petersburg, 29.06–03.07.2010. – St. Petersburg, 2010. Pp. 28-38.

НИКОНОВА Наталия Вячеславовна – ассистент кафедры, lovelynataxa@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).