## Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

ОБЪЯВЛЯЕТ ПРИЁМ в АСПИРАНТУРУ в 2018 году

В аспирантуру принимаются граждане Российской Федерации и лица без гражданства, имеющие законченное высшее образование (специалитет или магистратура), проявившие способности к научной работе, по следующим направлениям:

05.06.01 Науки о Земле

Профиль

Геоэкология

08.06.01 Техника и технологии строительства *Профили* 

Строительные конструкции,

здания и сооружения Основания и фундаменты, подземные

сооружения Водоснабжение, канализация, строительные

системы охраны водных ресурсов

Строительные материалы и изделия

Технология и организация строительства

Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Строительная механика

09.06.01 Информатика и вычислительная техника *Профили* 

Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автоматизация и управление

технологическими процессами и производствами

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

10.06.01 Информационная безопасность

. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи

Системы, сети и устройства телекоммуникации 13.06.01 Электро- и теплотехника

Профили

Электромеханика и электрические аппараты Электротехнические комплексы и системы

15.06.01 Машиностроение

Профили

Методы контроля и диагностика

в машиностроении

Дорожные, строительные и подъёмно-

транспортные машины

20.06.01 Техносферная безопасность

Профили

Охрана труда

Пожарная и промышленная безопасность

21.06.02 Геодезия

Профиль

Геодезия

23.06.01 Техника и технологии наземного транспорта *Профили* 

Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Железнодорожный путь, изыскание

и проектирование железных дорог

Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

27.06.01 Управление в технических системах *Профиль* 

Управление процессами перевозок

38.06.01 Экономика

Профили

Экономика и управление народным хозяйством Бухгалтерский учёт, статистика

А также по другим направлениям физико-математических, технических, исторических, философских, экономических отраслей наук и наук о Земле, перечисленных  $\beta$  лицензии 90Л01 № 0008032, per. № 1059 от 21.07.2014 г.

Документы в аспирантуру на бюджетные места принимаются с 12 июня по 20 июля 2018 года. Документы в аспирантуру на места с возмещением затрат принимаются с 01 июля по 14 декабря 2018 года.

ЗАЯВЛЕНИЯ ПОДАЮТСЯ НА ИМЯ РЕКТОРА УНИВЕРСИТЕТА ПО УСТАНОВЛЕННОЙ ФОРМЕ.

К заявлению прилагаются:

анкета; копии дипломов и приложений к ним о высшем профессиональном образовании – специалиста и (или) магистра; выписка из протокола заседания совета факультета о рекомендации в аспирантуру (только для выпускников ФГБОУ ВПО ПГУПС текущего года); список опубликованных научных работ, изобретений и отчётов по научноисследовательской работе или реферат; три фотографии размером 3×4. Паспорт и диплом предъявляются лично.

Правила приема размещены на сайте pgups.ru.

Поступающие проходят обязательное собеседование с предполагаемым научным руководителем и сдают вступительные испытания по специальности, философии и одному из иностранных языков в объеме программ для вузов.

Конкурсные вступительные испытания проводятся: на бюджетные места с 13 июля по 22 июля 2018  $_{\rm ГОДА}$ ; на места с возмещением затрат – с 07 июля по 15 декабря 2018  $_{\rm ГОДA}$ .

Заявления и документы представлять по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, ФГБОУ ВПО ПГУПС, отдел Докторантуры и аспирантуры, ауд. 7-402, тел. (812) 457-80-97, e-mail: asp@pgups.ru/www.pgups.ru

#### НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 14, выпуск 4, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

#### Учредитель и издатель

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

#### Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9, тел. (812) 314-92-32

#### Адрес редакции

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

# Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

#### Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

#### Журнал распространяется

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

#### РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

#### Главный редактор

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

#### Заместитель главного редактора

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

#### Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

#### Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

#### Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова

#### Верстка

А. А. Стуканова

#### Редактор сайта

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

**Бадер 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  $\Phi$ ГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 20.12.2017. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ. Усл. печ. л. 26,375. Установочный тираж 300 экз. Заказ 23. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017

#### **SCIENTIFIC PUBLICATION**

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 14, issue 4, 2017

ISSN (Print) 1815-588X

#### Founder and publisher

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

#### Founder and publisher address

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

#### **Editorial address**

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

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

#### Mass media registration certificate number

ΠΙΛ Ν ΦC2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

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

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

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

The Journal has the Peer-review division

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

#### **JOURNAL STAFF**

#### Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, Cand. of Economics, Associate Professor

#### **Deputy chief editor**

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

#### **Science editor**

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

#### **Executive editor**

E. Gorelik

#### **English translation**

Yu. Fattakhova

#### Lavout

A. Stukanova

#### Online content editor

I. 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, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ	
Колос А. Ф., Колос И. В., Конон А. А.	
Математическая модель прогнозирования несущей способности балластного слоя железнодорожного пути	578
Корниенко А. А., Ададуров С. Е., Глухов А. П., Диасамидзе С. В., Кустов В. Н.	
Модели управления рисками и ресурсами автоматизированных	588
систем критического применения железнодорожного транспорта	300
с учетом экономического фактора	
→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ	
Бороненко Ю.П., Житков Ю.Б.	
Особенности динамики вагона-цистерны с жидким грузом	597
o coocimiocini di manana i di cina di	337
Буторин С. М., Ефимов В. П.	
Фрикционные клинья грузовых тележек с повышенным межремонтным ресурсом	605
Веревкина О.И.	
О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте	615
на основании общего логико-вероятностного метода	
Poneti en A. A. Keneuwen II. E. Degenen IA. P.	
Воробьев А. А., Керенцев Д. Е., Федоров И. В.	620
Испытания колесных сталей на износ и контактную усталость	628
Григорьев П. С., Суворова К. Е.	
Оценка частот собственных колебаний и динамических напряжений в оболочке	637
котла цистерны	037
Киселев И. Г., Галов В. В., Комиссаров С. Б.	
Экспериметальное исследование электроразогрева расплавленной серы в железнодорожной цистерне	644
Костроминов А. М., Костроминов А-р А., Тюляндин О. Н.	
Оценка вероятности пропуска считывания информации с радиочастотных меток	650
аппаратурой СБПП	
Musuayayan P. A	
Мнацаканов В. А.	657
Законы электрической тяги	057
Орлова А. М., Фёдорова В. И.	
Теоретический расчет ресурса поверхности катания колес на основе	664
экспериментальных наблюдений за вагонами модели 12-9853 на тележках	
18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс	
Покровская О. Д., Маликов О. Б., Зачешигрива М. А.	
О научно-практической реализации теории терминалистики	673
	2.3
Цыганская Л.В., Коршунов В.С.	
Разработка трехосной тележки с радиальной установкой колесных пар	689
с осевой нагрузкой 25 тс	

Чернышева Ю.В.	
Особенности движения грузового поезда с двигателями ограниченной мощности при резонансных колебаниях вагонов	697
Якушев А.В., Расщепкина Д.В., Баранов А.Н.	
Определение предельной длины усталостной трещины в углу буксового проема боковой рамы тележки грузового вагона	710
→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ	
Болдырев А.П., Жиров П.Д., Ионов В.В.	
Оценка параметрической надежности поглощающих аппаратов с учетом эксплуатационных факторов	720
Герасименко В.П., Ходаковский В.А., Кударов Р.С., Бубнов В.П., Хватцев А.А.	
Тенденции и перспектива математического образования в технических вузах	727
Клименко С.В., Яковлев В.В., Ададуров С.Е.	
Метод контроля целостности данных с использованием CRC кода	738
Микони С. В., Дегтярев В. Г., Ходаковский В. А., Кударов Р. С.	
Сопоставление классификаций моделей, основанных на двух альтернативных подходах	747
Стоянович Г. М., Шипарев Р.Г.	
Закрепление грунтов с помощью криотропного гелеобразования в дорожном строительстве	759
Твардовская Н. В.	
Предотвращение последствий гидравлических ударов в напорных системах водоотведения с использованием гасителя дифференциального действия	768
→ ОБЗОРЫ И РЕЦЕНЗИИ	
Уздин А. М.	
Белаш Т. А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений	776
Содержание журнала «Известия ПГУПС» за 2017 год	777

## ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 625.141.1

#### А. Ф. Колос, И.В. Колос, А.А. Конон

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Дата поступления: 10.04.2017 Решение о публикации: 24.04.2017

#### Аннотация

**Цель:** Прогнозирование несущей способности балластного слоя железнодорожного пути, воспринимающего вибродинамическую нагрузку. **Методы:** Анализ существующих методик определения прочности балластного слоя. **Результаты:** Было установлено, что большинство методик имеют ряд недостатков, которые приводят к существенным погрешностям результатов расчета. При разработке математической модели, описывающей предельное напряженное состояние балластного слоя железнодорожного пути, авторы основывались на теории предельного равновесия, разработанную В. В. Соколовским. При построении математической модели учтено действие инерционных сил, возникающих в балласте и земляном полотне при движении подвижного состава. **Практическая значимость:** Результаты расчета несущей способности балластного слоя при различных условиях его работы позволяют разработать требования к конструкции балластного слоя и к балластному материалу.

**Ключевые слова:** Несущая способность балластного слоя, предельное напряженное состояние, удельное сцепление и угол внутреннего трения щебня, виброускорения в балластном слое.

Aleksey F. Kolos, Cand. Sci. Eng., associate professor, head of chair, kolos2004@inbox.ru; Irina V. Kolos, Cand. Sci. Eng., associate professor, irina\_kolos70@bk.ru; \*Anastasiya A. Konon, Cand. Sci. Eng., associate professor, a.a.konon@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) MATHEMATICAL MODEL OF PREDICTING RAILWAY BALLAST BEARYING CAPACITY

#### **Summary**

**Objective:** To predict carrying capacity of railway ballast, sustaining vibrodynamic load. **Methods:** The analysis of the current methods for determining bearing capacity of the ballast bed. **Results:** It was established that, generally, methods of determining bearing capacity of the ballast have a number of drawbacks, which lead to significant errors in calculation data. In the process of mathematical model elaboration, which describes limit stressed state of the railway ballast, the authors relied on the limit equilibrium theory which was developed by V. V. Sokolovskiy. Inertial effect, which occurs in ballast and roadbed during the motion of a rolling stock, was taken into account when building the mathematical model. **Practical importance:** Calculation data of ballast carrying capacity under different conditions of ballast operation make it possible to elaborate the requirements for ballast construction and ballast material.

**Keywords:** Ballast bearing capacity, limit stressed state, specific cohesion and angle of internal friction of crushed ballast, vibration accelerations in ballast.

#### Введение

Стабильность рельсовой колеи за весь срок службы конструкции верхнего строения пути определяется не только надежностью шпал, скреплений, рельсов, но и качеством всех элементов подшпального основания, в том числе щебеночного балласта. Несмотря на то, что исследовательские работы по повышению срока службы балласта в разных странах в различных условиях эксплуатации ведутся с 1960-х годов, именно балластный слой до настоящего времени остается проблемным элементом верхнего строения пути.

Основные характеристики, определяющие возможность применения щебня в конструкции верхнего строения пути в соответствии с действующими национальными стандартами России и зарубежных стран [1–6] не определяют такой важнейший количественный параметр как несущая способность балластной призмы, оценка которой остается до сих пор нерешенной проблемой.

# Математическая модель предельного напряженного состояния балластного слоя железнодорожного пути

Состояние железнодорожного подшпального основания в условиях движения поездов зависит от множества внешних и внутренних факторов. В частности, прочностные свойства балластного слоя и земляного полотна обусловливают сопротивление конструкции разрушению под действием внешних сил.

Предельное напряженное состояние балластного слоя – такое состояние, при котором минимальное приращение статической или динамической нагрузки приводит к появлению в балласте и земляном полотне сплошных поверхностей скольжения, на которых сдвигающие силы превышают удерживающие. Поверхности скольжения представляют собой совокупность отдельных площадок, возникающих при превышении удерживающих сил сдвигающими. Отдельные площадки скольжения могут образовываться в грунтовой среде и при нагрузках не более предельных, но они не вызывают деформаций массива. Лишь при нагрузках не ниже предельных формируются группы площадок — целые поверхности, по которым происходит сдвиговая деформация грунтового массива.

Следовательно, при предельном напряженном состоянии действующие нагрузки (с учетом собственного веса грунта) и предельные нагрузки, определяемые прочностными характеристиками грунтовой среды, равны и находятся в состоянии предельного равновесия. Такое состояние конструкции описывается соотношениями между компонентами тензора напряжений и прочностными характеристиками грунта.

Таким образом, несущая способность балластного слоя железнодорожного пути определяется предельным напряженным состоянием грунтов балластного слоя и земляного полотна, характеризуемым предельным давлением шпалы на балласт.

Уравнение движения элемента грунтовой массы, как известно, описывается следующим соотношением [7], записанным для элементарного объема грунтовой массы:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = \rho \frac{dv_i}{dt} + X_i. \tag{1}$$

В (1)  $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}$  — компоненты тензора напряжений;  $X_i$  — компоненты массовых сил;  $v_i$  — компоненты вектора скорости;  $\rho$  — плотность грунтовой среды;  $\rho \frac{dv_i}{dt}$  — компоненты инерционных сил;  $\frac{dv_i}{dt}$  — ускорение частиц грунтов балластного слоя и земляного полотна.

В развернутой форме для динамических процессов в двумерной системе координат выражение (1) принимает вид

$$\begin{cases}
\frac{\partial \sigma_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = Y + \rho \frac{dv_{y}}{dt}, \\
\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{z}}{\partial z} = Z + \rho \frac{dv_{z}}{dt},
\end{cases} (2)$$

где Y и Z — компоненты массовых сил в элементарном объеме, действующие в направлении горизонтальной оси y и вертикальной оси z.

Система уравнений (2) содержит два равенства с тремя неизвестными:  $\sigma_y$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ,  $\sigma_z$  и является статически неопределимой. Для ее решения требуется ввести третье уравнение. Так как в статье исследуется несущая способность балластного слоя, в качестве третьего уравнения следует использовать условие предельного равновесия грунтового массива. В этом случае решение системы из трех дифференциальных уравнений позволит определить предельное напряженное состояние среды и вычислить предельные напряжения в балластном слое под подошвой шпалы.

Условие предельного равновесия в общем виде описывается условием Мора

$$|\tau_n| = f(\sigma_n),$$

в котором  $\tau_n$  — касательные,  $\sigma_n$  — нормальные напряжения на произвольной площадке грунтовой среды с нормалью n.

Применительно к щебеночному балласту разными учеными предлагаются различные частные случаи условия Мора. В работе [8] используется линейная зависимость между предельными касательными и нормальными напряжениями по площадке скольжения, описываемая известным условием предельного равновесия Кулона

$$\left|\tau_{n}\right| = \sigma_{n} \cdot \mathsf{tg}\varphi + C \,, \tag{3}$$

где C — удельное сцепление (зацепление) щебеночного балласта;  $\phi$  — угол его внутреннего трения.

В исследованиях [9–12 и др.], проводимых с помощью приборов трехосного нагружения, установлена нелинейная зависимость между предельными касательными и нормальными напряжениями, имеющая вид степенной функции

$$\left|\tau_{n}\right| = A \cdot (\sigma_{n})^{B}, \qquad (4)$$

здесь A и B — сдвиговые параметры (параметры упрочнения) щебеночного балласта.

Выражение (4) было получено при боковых давлениях, составляющих до 400 кПа. Такие значительные величины боковых напряжений в конструкции балластной призмы под действием динамической нагрузки от подвижного состава практически никогда не реализуются. В исследованиях, проведенных нами также при помощи стабилометров, было установлено, что при боковых давлениях от 20 до 100 кПа, которые наиболее объективно характеризуют напряженное состояние балластного слоя, предельное напряженное состояние с достаточной для инженерных расчетов точностью определяется линейной зависимостью предельного равновесия Кулона (3).

Учитывая это обстоятельство, опираясь на рекомендации В. В. Соколовского [7], можно доказать, что в условиях предельного напряженного состояния компоненты тензора напряжений в выражении (2) будут описываться следующими соотношениями:

$$\begin{cases} \sigma_z = \sigma \cdot (1 - \sin \phi \cdot \cos 2\delta) - C \cdot \operatorname{ctg}\phi, \\ \sigma_y = \sigma \cdot (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\delta) - C \cdot \operatorname{ctg}\phi, \\ \tau_{zy} = \sigma \cdot \sin \phi \cdot \sin 2\delta, \end{cases}$$
 (5)

где 
$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + C \cdot \text{ctg}\phi$$
;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — соответственно максимальное и минимальное главные напряжения;  $\delta$  — угол наклона первого главного напряжения  $\sigma_1$  к оси  $y$ .

Подставив (5) в систему уравнений (2) и принимая во внимание, что массовые силы Y=0 и  $Z=\rho$ , получим

$$\begin{cases}
\frac{\partial \sigma}{\partial z} (1 - \sin \phi \cdot \cos 2\delta) + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \sin \phi \cdot \sin 2\delta + \\
+ 2 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial z} \sigma \cdot \sin \phi \cdot \sin 2\delta + \\
+ 2 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial y} \sigma \cdot \sin \phi \cdot \cos 2\delta = \rho + \rho \frac{dv_z}{dt}, \\
\frac{\partial \sigma}{\partial z} \sin \phi \cdot \cos 2\delta + \frac{\partial \sigma}{\partial y} (1 + \sin \phi \cdot \sin 2\delta) + \\
+ 2 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial z} \sigma \cdot \sin \phi \cdot \sin 2\delta - \\
- 2 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial y} \sigma \cdot \sin \phi \cdot \cos 2\delta = \rho \frac{dv_y}{dt}.
\end{cases} (6)$$

Система дифференциальных уравнений (6) относится к гиперболическому типу и описывает предельное напряженное состояние грунтового массива. Для ее решения необходимо задать граничные условия и найти в правой части уравнений составляющие инерционных сил  $\rho \frac{dv_z}{dt}$  и  $\rho \frac{dv_y}{dt}$ . При этом  $a_z = \frac{dv_z}{dt}$  и  $a_y = \frac{dv_y}{dt}$  есть не что иное как величина ускорений частиц балласта, распространяющихся соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскости. Для их определения были проведены полевые исследования, целью которых являлось установление зависимостей, описывающих распределение амплитуд виброускорений в балластном слое как по его глубине, так и в поперечном оси пути направлении, т.е.

$$a_z = f(y,z)$$
 и  $a_y = f(y,z)$ ,

где y и z — координаты точки, в которой необходимо вычислить амплитуду виброускорения.

С результатами проведенных испытаний можно ознакомиться, например, в работе [13]. В конечном итоге по ним были получены функциональные зависимости, которые были подставлены в систему дифференциальных уравнений (6) для последующего ее решения.

Для исключения громоздкости последующих преобразований в системе уравнений (6) величины  $\frac{dv_z}{dt}$  и  $\frac{dv_y}{dt}$  заменены соответствующими функциональными зависимостями вида  $a_z(y,z)$  и  $a_y(y,z)$  (в м/с²).

# Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих предельное напряженное состояние балластного слоя железнодорожного пути

Как указывалось выше, система уравнений (6) – это система дифференциальных уравнений первого порядка гиперболического типа, потому ее решение возможно методом характеристик. Следуя соображениям В. В. Соколовского [7], можно доказать, что характеристические линии и линии скольжения, по которым происходит разрушение балластного слоя, совпадают. Таким образом, уравнения линий скольжения и уравнения характеристик также идентичны, что позволяет, решая систему уравнений (6), установить форму линий скольжения. Предлагаемый подход при оценке несущей способности балластного слоя исключает необоснованность в выборе формы кривой обрушения, что свойственно многим методам расчета устойчивости откосов земляных сооружений. В данном случае форма кривых скольжения находится при непосредственном численном решении системы дифференциальных уравнений (6), что, несомненно, является преимуществом.

Опуская трудоемкие математические преобразования и опираясь на исследования В.В. Соколовского [7], И.В. Прокудина [14], А.К. Черникова [15], можно показать, что уравнения характеристик и значения функций от и б вдоль них описываются следующими соотношениями:

$$dz = dy \cdot \operatorname{tg}\left(\delta \mp \frac{\pi}{4} \pm \frac{\varphi}{2}\right),\tag{7}$$

$$d\sigma \mp 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot d\delta = (\rho + B) \times \times (dz \mp dy \cdot \operatorname{tg} \varphi) + D \cdot (dy \pm dz \cdot \operatorname{tg} \varphi),$$
(8)

$$B = \frac{\rho}{g} \cdot a_z(y, z), \ D = \frac{\rho}{g} \cdot a_y(y, z), \quad (9)$$

где g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Анализ зависимости (7) показывает, что имеются два семейства характеристик, наклоненных к оси z под углами  $\delta \mp \varepsilon$  (рис. 1).

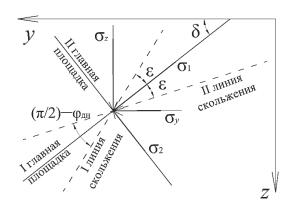


Рис. 1. Взаиморасположение главных площадок, линий скольжения и компонентов напряжения

Через каждую точку рассматриваемой области *zy* проходят две характеристики, пере-

секающиеся под углом  $2\varepsilon = \pi/2 - \phi$ , и вся область покрыта сеткой характеристик.

Таким образом, задача определения несущей способности балластного слоя железнодорожного пути заключается в построении сетки линий скольжения (характеристик) и вычислении значений напряжений  $\sigma$  и угла  $\delta$  в узлах строящейся сетки.

При превышении предельной нагрузки на балласт возможны следующие случаи потери прочности балластным слоем: потеря прочности в поперечном оси пути направлении, при котором происходит потеря устойчивости откоса балластной призмы; выдавливание балласта в междушпальное пространство. Выполненные в ходе данной работы расчеты по разработанным методикам и алгоритмам показали, что несущая способность балластного слоя при использовании схемы разрушения с выдавливанием щебня в шпальный ящик оказалась в 1,5–2 раза выше, чем по первой схеме.

В связи с этим определим граничные условия только для схемы потери несущей способности балластной призмы, характеризуемой потерей устойчивости откосных частей в поперечном оси пути направлении. Как следует из рис. 2, решение задачи о несущей способности балластного слоя сводится к по-

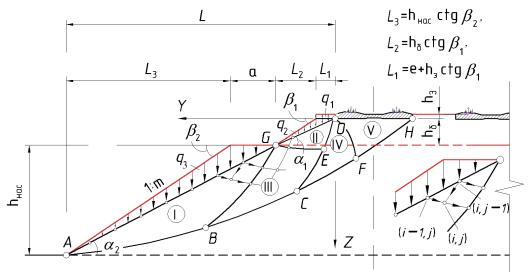


Рис. 2. Граничные условия и области предельного напряженного состояния (объяснение в тексте)

строению сетки линий скольжения в области ABCFHOG, т. е. к определению координат узлов (y, z) и вычислению в этих узлах значений  $\sigma$  и  $\delta$ , применяя соотношения (7)–(9). В данной области выделяются несколько характерных зон предельного напряженного состояния, в каждой из которых для решения системы дифференциальных уравнений могут быть использованы различные частные случаи задачи Коши.

Рассмотрим область І. В ней фактический откос с углом заложения  $\beta_2$  заменен на условный откос с углом заложения  $\alpha_2$ . Тогда на поверхности условного откоса AG будет действовать пригрузка интенсивностью  $q_3$ , величина которой может быть определена следующим образом:

$$q_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } y > L, \\ \rho_{_{\mathrm{H}}} \cdot \left(y - L_{_{\!1}} - L_{_{\!2}}\right) \cdot \left(\mathsf{tg}\alpha_{_{\!2}} - \mathsf{tg}\beta_{_{\!2}}\right) + \\ + \rho_{_{\!H}} \cdot a \cdot \mathsf{tg}\beta_{_{\!2}} \\ & \text{при } a + L_{_{\!1}} + L_{_{\!2}} < y \le L, \\ \rho_{_{\!H}} \cdot \left(y - L_{_{\!1}} - L_{_{\!2}}\right) \cdot \mathsf{tg}\alpha_{_{\!2}} \\ & \text{при } L_{\!1} + L_{\!2} \le y < L_{\!1} + L_{\!2} + a, \end{cases}$$

$$\begin{split} L &= L_1 + L_2 + a + L_3 \;,\;\; L_1 = e + h_3 \cdot \text{ctg}\beta_1 \;, \\ L_2 &= h_6 \cdot \text{ctg}\beta_1,\; L_3 = h_{\text{\tiny Hac}} \cdot \text{ctg}\beta_2, \\ \beta_1 &= \text{arctg}\bigg(\frac{1}{m_1}\bigg),\; \beta_2 = \text{arctg}\bigg(\frac{1}{m_2}\bigg), \end{split}$$

где  $\rho_{\rm H}$  — плотность грунта земляного полотна (т/м³); a — ширина обочины земляного полотна (м); e — ширина плеча балластной призмы (м);  $h_{\rm 3}$  — высота засыпки шпалы щебнем (м);  $h_{\rm hac}$  — высота насыпи (м);  $h_{\rm 6}$  — толщина щебеночного балласта под подошвой шпалы (м);  $m_{\rm 1}$  и  $m_{\rm 2}$  — крутизна заложения откоса балластной призмы и насыпи соответственно.

Зная величину пригрузки  $q_3$ , можно показать [14], что угол наклона первого главного напряжения  $\delta$  к оси Y и величина напряжений  $\sigma$  в точках, лежащих на поверхности условного откоса, составят

$$\delta = \alpha_{2} + \frac{1}{2} \arcsin \times$$

$$\times \left\{ \frac{q_{3} \cdot \sin \alpha_{2} \times}{\times (q_{3} \cdot \cos \alpha_{2} \cdot tg\phi_{3\Pi} + C_{3\Pi} - \sin \phi_{3\Pi} \sqrt{\theta})} \right\}, (10)$$

$$+ (q_{3} \cdot \sin \alpha_{2} \cdot tg\phi_{3\Pi})^{2} + \cos \phi_{3\Pi}$$

$$\theta = (C_{3\Pi} + q_3 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_{3\Pi})^2 - (q_3 \cdot \sin \alpha_2)^2,$$

здесь  $\phi_{3\Pi}$  и  $C_{3\Pi}$  – соответственно угол внутреннего трения (град.) и удельное сцепление грунтов земляного полотна (т/м²),

$$\sigma = \frac{q_3 \cdot \cos \alpha_2 + C_{3\Pi} \cdot \cos \varphi_{3\Pi} \cdot \cos(2(\delta - \alpha_2))}{1 - \sin \varphi_{3\Pi} \cdot \cos(2(\delta - \alpha_2))}. (11)$$

Определив граничные условия на поверхности условного откоса AG, можно решить уравнения (7), (8) во всей области I (ABG). Для этого последовательно вычисляются координаты узлов пересекающихся линий скольжения и значения функций о и б в этих узлах, определяющих предельное напряженное состояние. Двигаясь вдоль каждого семейства линий скольжения, в выражениях (7) и (8) дифференциалы заменяются разностями (рис. 2, справа):

$$z_{i-1,j} - z_{i,j} =$$

$$= (y_{i-1,j} - y_{i,j}) \cdot \text{tg}\left(\delta_{i-1,j} - \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{3\Pi}}{2}\right), (12)$$

$$z_{i,j-1} - z_{i,j} =$$

$$= (y_{i,j-1} - y_{i,j}) \cdot \operatorname{tg} \left( \delta_{i,j-1} + \frac{\pi}{4} - \frac{\phi_{3\Pi}}{2} \right).$$
 (13)

Решая совместно линейные уравнения (12) и (13), легко определяются координаты узла  $(y_{i,j}, z_{i,j})$ . Аналогичным образом в каждом узле можно рассчитать и значения функций  $\sigma_{i,j}$  и  $\delta_{i,j}$ , заменяя в уравнениях (8) полные дифференциалы их конечными разностями:

$$(\sigma_{i-1,j} - \sigma_{i,j}) - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{i-1,j} \cdot tg\phi_{3\Pi} \cdot (\delta_{i-1,j} - \delta_{i,j}) = \frac{1}{2} \left( \rho_{3\Pi} + \frac{\rho_{3\Pi}}{g} \cdot a_z(y,z) \right) \times (14)$$

$$\times ((z_{i-1,j} - z_{i,j}) - (y_{i-1,j} - y_{i,j}) \cdot tg\phi_{3\Pi}) + \frac{\rho_{3\Pi}}{g} \cdot a_y(y,z) \cdot ((y_{i-1,j} - y_{i,j}) + \frac{\rho_{3\Pi}}{g} \cdot a_y(y,z) \cdot tg\phi_{3\Pi}),$$

$$(\sigma_{i,j-1} - \sigma_{i,j}) + 2 \cdot \sigma_{i,j-1} \times tg\phi_{3\Pi} \cdot (\delta_{i,j-1} - \delta_{i,j}) = \frac{\rho_{3\Pi}}{g} \cdot a_z(y,z) \times ((z_{i,j-1} - z_{i,j}) + (y_{i,j-1} - y_{i,j}) \cdot tg\phi_{3\Pi}) + \frac{\rho_{3\Pi}}{g} \cdot a_y(y,z) \cdot ((y_{i,j-1} - y_{i,j}) - (z_{i,j-1} - z_{i,j}) \cdot tg\phi_{3\Pi}).$$

$$(15)$$

В области II предельного напряженного состояния фактический откос балластной призмы с углом заложения  $\beta_1$  заменен на условный откос с углом заложения  $\alpha_1$ . Тогда на поверхности условного откоса ОG будет действовать пригрузка интенсивностью  $q_2$ :

$$q_2 = \begin{cases} 0 \text{ при } y > L_{\mathrm{l}} + L_{\mathrm{2}}, \\ \rho_{\mathrm{III}} \cdot y \cdot \left( \mathrm{tg}\alpha_{\mathrm{l}} - \mathrm{tg}\beta_{\mathrm{l}} \right) + \rho_{\mathrm{III}} \cdot L_{\mathrm{l}} \cdot \mathrm{tg}\beta_{\mathrm{l}} \\ \mathrm{при } L_{\mathrm{l}} < y \leq L_{\mathrm{l}} + L_{\mathrm{2}}, \\ \rho_{\mathrm{III}} \cdot y \cdot \mathrm{tg}\alpha_{\mathrm{2}} + q_{\mathrm{l}} \text{ при } y \leq L_{\mathrm{p}} \end{cases}$$

$$q_1 = h_3 \cdot \rho_{III}$$
,

где  $\rho_{\rm m}$  — плотность сложения щебеночного балласта (т/м³).

Угол наклона первого главного напряжения  $\delta$  к оси Y и величина напряжений  $\sigma$  в точках, лежащих на поверхности условного откоса OG, определяются аналогично по фор-

мулам (10), (11), заменяя  $q_3$  на  $q_2$ ,  $\alpha_2$  на  $\alpha_1$ ,  $\phi_{_{3\Pi}}$  на  $\phi_{_{\mathbb{H}}}$  и  $C_{_{3\Pi}}$  на  $C_{_{\mathbb{H}}}$  (здесь  $\phi_{_{\mathbb{H}}}$  и  $C_{_{\mathbb{H}}}$  – соответственно угол внутреннего трения и удельное сцепление (зацепление) щебня).

Дифференциальные уравнения (7), (8) в области II (GOE) решаются также методом конечных разностей с использованием формул (12)-(15) при условии, что узлы сетки линий скольжения располагаются на глубине, не превышающей толщину балласта под подошвой шпалы. В противном случае при переходе через границу раздела щебеночный балласт - грунт земляного полотна происходит скачкообразное изменение прочностных характеристик грунта, а функции σ и δ претерпевают конечные скачки и их производные по координатам у и z обращаются в бесконечность. Следуя рекомендациям В. В. Соколовского [7], в данном случае образуются линии разрыва, вследствие чего исходные уравнения могут описать предельное равновесие только до этих линий. Таким образом, требуется установить дифференциальные уравнения линий разрыва, вычислить вдоль них значения функций о и б и далее обычным порядком завершить решение дифференциальных уравнений в области предельного напряженного состояния GOE. Методика построения разрывных решений изложена в ряде источников, например в [7].

В области предельного напряженного состояния III (GBCE) вдоль границ GB и GE известны как координаты узлов линий скольжения, так и значения функций σ и δ в них. Это позволяет, используя уравнения (12)–(15), определить предельное напряженное состояние в области III.

В области IV (ОЕСF) расчет начинается с вычисления функций  $\sigma$  и  $\delta$  в особой точке O, где угол  $\delta$  скачкообразно изменяется от  $\alpha_1$  до  $\pi/2$ . Для устранения скачкообразности равномерно распределим изменение угла  $\alpha_1$  по характеристикам первого семейства по формуле

$$\delta_{i,0} = \frac{\pi - 2 \cdot \alpha_1}{2 \cdot n} i + \alpha_1,$$

где i и n — соответственно порядковый номер и количество характеристик первого семейства, исходящих из точки O.

Можно доказать [7, 14], что напряжения в этих точках определяются следующим образом:

$$\sigma_{i,0} = \frac{C_{\mathbf{u}\mathbf{u}} \cdot \cos \varphi_{\mathbf{u}\mathbf{u}}}{1 - \sin \varphi_{\mathbf{u}\mathbf{u}}} e^{2(\delta_{i,0} - \alpha_{1}) \cdot \mathsf{tg}\varphi_{\mathbf{u}\mathbf{u}}}.$$

Дальнейшие расчеты в области IV ведутся аналогично.

В области предельного равновесия V (ОFH) расчет начинают с точек, лежащих на линии ОН, на которой  $z_{i,j}=0$ , а  $\delta=\pi/2$ . С учетом данного обстоятельства, пользуясь формулами (12)–(15), удается построить решение в области V, определив тем самым величины напряжений  $\sigma$  под подошвой шпалы. Тогда предельные напряжения в вертикальной  $\left[\sigma_z\right]$  и горизонтальной  $\left[\sigma_y\right]$  плоскостях (несущая способность балластного слоя) можно найти по первым двум формулам системы (5), подставив в них полученное значение предельного давления  $\sigma$ , вычисленного вдоль линии ОН:

$$\left[\sigma_{z}\right] = \sigma_{i,j-OH} \cdot (1 + \sin \varphi_{III}) - C_{III} \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{III}, \quad (17)$$

$$\left[\sigma_{y}\right] = \sigma_{i,j-OH} \cdot (1-\sin\varphi_{ii}) - C_{ii} \cdot \operatorname{ctg}\varphi_{ii}. \quad (18)$$

Найденные по выражениям (17), (18) предельные напряжения позволяют сопоставить их с фактически действующими, возникающими в балластном слое железнодорожного пути, оценив тем самым резерв или дефицит несущей способности.

#### Заключение

Существенным преимуществом рассмотренного подхода, несмотря на его математическую сложность, является установление формы поверхностей скольжения, базируясь на решении дифференциальных уравнений предельного напряженного состояния, исклю-

чая произвольный выбор кривой обрушения, как это принято в большинстве методов расчета устойчивости откосов (например, в методе круглоцилиндрических поверхностей скольжения). Второе преимущество состоит в возможности непосредственного вычисления несущей способности балластного слоя как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости, определяемой величиной предельных давлений. В частности, несущая способность в вертикальной плоскости характеризует возможность потери устойчивости откосов, а в горизонтальной – обеспечение устойчивости рельсошпальной решетки против сдвига или выброса пути. Несомненно, что данные результаты обусловливают возможность формулирования как требований к материалу щебеночного балласта, в том числе очищенного машинами глубокой очистки, так и к конструкции балластного слоя на участках с разными условиями эксплуатации.

#### Библиографический список

- 1. DIN EN 13450–2013. Aggregates for railway ballast; German version EN 13450:2013. Berlin; DBAG, 2013. 34 p.
- 2. DBS 918061. Technische Lieferbedingungen Gleisschotter. Berlin: DBAG, 2003. 31 p.
- 3. NF EN 13450–2003. Aggregates for railway ballast. London: BSI, 2003. 40 p.
- 4. UIC 719R. Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires. Paris: Union Internationale des Chemins de fer (UIC), 2008. 101 p.
- 5. Ril 820.2010 Grundlagen des Oberbaues Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen. Berlin: DBAG, 1995. 50 p.
- 6. ГОСТ 7392–2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
- 7. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. М. : Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1960.-241 с.
- 8. Araya A.A. Investigation of the resilient behavior of granular base / A.A. Araya, M. Huurman,

- A. A. A. Molenaar, L. J. M. Houb // Materials and Structures. -2012. N45. P.695-705.
- 9. Indraratna B. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling / B. Indraratna, S. Nimbalkar // 13th Intern. Conference of the Intern. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Sydney, Australia, 2011. P. 1085–1092.
- 10. Indraratna B. State-of-the-art design aspects of ballasted rail tracks incorporating particle breakage, role of confining pressure and geosynthetic reinforcement / B. Indraratna, S. Nimbalkar, C. Rujikiatkamjorn, D. Christie // 9th World Congress Railway Reseach. 2011. P. 1–13.
- 11. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast: A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree Doctor of Philosophy / D. Ionescu. Wollongong, Australia: University of Wollongong, 2004. 440 p.
- 12. Kaya M. A study on the stress-strain behavior of railroad ballast materials by use of parallel gradation technique: A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of the Middle East Technical University / M. Kaya. Ankara, Turkey: Middle East Technical University, 2004. 328 p.
- 13. Колос А. Ф. Исследование распространения виброускорений частиц балластного слоя в условиях движения поездов с повышенными осевыми нагрузками / А.Ф. Колос, А.А. Морозова // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2014. Вып. 2 (39). С. 29—35.
- 14. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.06 / И.В. Прокудин. Л.: ЛИИЖТ, 1982. 455 с.
- 15. Черников А. К. Решение жесткопластических задач геомеханики методом характеристик: учеб. пособие / А. К. Черников. СПб.: ПГУПС, 1997. 191 с.

#### References

1. *DIN EN 13450–2013. Aggregates for railway ballast; German version EN 13450:2013.* Berlin, DBAG Publ., 2013, 34 p.

- 2. DBS 918061. Technische Lieferbedingungen Gleisschotter. Berlin, DBAG Publ., 2003, 31 p.
- 3. NF EN 13450–2003. Aggregates for railway ballast. London, BSI Publ., 2003, 40 p.
- 4. *UIC 719R. Ouvrages en terre et couches d'assise ferroviaires*. Paris, Union Internationale des Chemins de fer (UIC), 2008, 101 p.
- 5. Ril 820.2010. Grundlagen des Oberbaues Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen. Berlin, DBAG Publ., 1995, 50 p.
- 6. GOST 7392–2014. Sheben iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puty. Terkhnicheskiye usloviya [State Standard 7392–2014. Consolidated crushed rock for railway ballast. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 32 p. (In Russian)
- 7. Sokolovskiy V. V. *Statyka sypuchey sredy* [*Loose medium statics*]. Moscow, Physmatlit Publ., 1960, 241 p. (In Russian)
- 8. Araya A.A., Huurman M., Molenaar A.A.A. & Houb L.J.M. Investigation of the resilient behavior of granular base. *Materials and Structures*, 2012, no. 45, pp. 695–705.
- 9. Indraratna B. & Nimbalkar S. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling. *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*. Sydney, Australia, 2011, pp. 1085–1092.
- 10. Indraratna B., Nimbalkar S., Rujikiatkamjorn C. & Christie D. State-of-the-art design aspects of ballasted rail tracks incorporating particle breakage, role of confining pressure and geosynthetic reinforcement. *9th World Congress Railway Reseach*, 2011, pp. 1–13.
- 11. Ionescu D. *Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast:* A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the award of the degree Doctor of Philosophy. Wollongong, Australia, University of Wollongong Publ., 2004, 440 p.
- 12. Kaya M. *A study on the stress-strain behavior of railroad ballast materials by use of parallel gradation technique*: A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of the Middle East Technical University. Ankara, Turkey, Middle East Technical University Publ., 2004, 328 p.
- 13. Kolos A. F. & Morozova A. A. Issledovaniye rasprostraneniya vybrouskoreniy chastyts ballastnogo

sloya v usloviyakh dvyzheniya poyezdov s povyshennymy osevymy nagruzok [The study of propagation of vibration accelarations of ballast granules in conditions of railway operation with high axle loading]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2014, issue 2 (39), pp. 29–35. (In Russian)

14. Prokudyn I. V. Prochnost i deformatyvnost zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glynystykh gruntov, vosprynymayushykh vybrodynamycheskuyu

nagruzku [Lasting and stress-strain properties of claypan soil railway roadbed, sustaining vybrodynamic load]: Diss... D. Sci. Eng.: 05.22.06. Leningrad, LIIZhT Publ., 1982, 455 p. (In Russian)

15. Chernikov A. K. Resheniye zhestkoplasty-cheskykh zadach geomekhanyky metodom kharakteristik [The method of characteristics in geomechanics for the solution of plastic-rigid tasks]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1997, 191 p. (In Russian)

КОЛОС Алексей Федорович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kolos2004@inbox. ru; КОЛОС Ирина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, irina\_kolos70@bk.ru; \*КОНОН Анастасия Андреевна – канд. техн. наук, доцент, а. a.konon@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056

А. А. Корниенко, С. Е. Ададуров, А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе, В. Н. Кустов

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ И РЕСУРСАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА С УЧЕТОМ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ФАКТОРА\*

Дата поступления: 09.10.2017 Решение о публикации: 08.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Выбор наиболее рациональных решений по управлению рисками и ресурсами автоматизированных систем критического применения (АС КП) железнодорожного транспорта. **Методы:** В качестве методов исследования применяются метод использования функций чувствительности для моделирования процессов управления рисками и метод использования функций затрат для моделирования процессов управления ресурсами конечномерных непрерывных многопараметрических систем критического применения. **Результаты:** Получены аналитические выражения, которые позволяют уменьшить исходную неопределенность в задании факторов риска для моделей управления рисками и ресурсами АС КП с заранее поставленными целями управления в условиях деструктивных воздействий. **Практическая значимость:** На основе полученных аналитических выражений для целевых функционалов сформулированы рациональные решения по управлению рисками и ресурсами АС КП с учетом экономического фактора.

**Ключевые слова:** Автоматизированные системы критического применения, информационная безопасность, управление рисками, управление ресурсами, функция чувствительности.

Anatoliy A. Korniyenko, D. Sci. Eng., professor, head of a chair, kaa.pgups@ya.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); Sergey Y. Adadurov, D. Sci. Eng., associate director, sv.diass99@ya.ru (JSC "VNIIZht"); Alexander P. Glukhov, Cand. Sci. Eng., associate professor, gluhov@uez.css-rzd.ru; \*Svetlana V. Diasamydze, Cand. Sci. Eng., associate professor, sv.diass99@ya.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); Vladimir N. Kustov, D. Sci. Eng., kustov-v@gisca.ru (OOO "CA "GASINFORMSERVICE") MODELS OF RISK AND RESOURCE MANAGEMENT OF RAILWAY TRANSPORT CRITICAL APPLICATION AUTOMATION SYSTEMS WITH REGARD TO ECONOMIC ASPECT

#### Summary

**Objective:** To select the most efficient solutions on risk and resource management of critical application automation systems (CAAS) of the railway transport. **Methods:** The following methods were applied in the given study: the method of using sensitivity functions for process control simulation of risks and the method of using cost functions for process control simulation of resources of finite-dimensional continuous multiparameter systems of critical application. **Results:** Analytical forms were obtained, which make it possible to reduce the initial ambiguity in setting hazards for the models of CAAS risk and resource management with preset control goals in the conditions of destructive effect. **Practical importance:** 

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-20-03048.

Rational solutions on CA AS risk and resource management with regard to economic aspect were formulated for objective functionals on the basis of analytical forms in question.

**Keywords:** Automated systems of critical application, information security, risk management, resource management, sensitivity function.

#### Введение

В настоящее время задачи обеспечения комплексной безопасности железнодорожного транспорта, в том числе информационной, решаются в рамках методологии УРРАН и принципа «базирования на рисках» [1–4]. В составе критической информационной инфраструктуры ОАО «РЖД» по результатам классификации можно выделить автоматизированные системы критического применения (АС КП), включающие автоматизированные системы управления технологическими процессами системы организации движения поездов (АСУ ТП СОДП), связи и электрификации, а также корпоративные информационные системы критического применения (КИС КП). Классификация проведена на основе определения степени возможного ущерба от нарушения целостности, доступности или конфиденциальности информации и уровня значимости информации, обрабатываемой в автоматизированных, информационных и телекоммуникационных системах.

Вопросы управления рисками и ресурсами будем рассматривать применительно к двум типам АС КП железнодорожного транспорта – постоянно функционирующих (непрерывных) систем и систем с заранее поставленными для них целями, реализуемыми в рамках одного цикла управления, состояние которых изменится во времени ввиду различного вида деструктивных действий на них. К непрерывным системам в основном относятся КИС КП железнодорожного транспорта, а к системам с заданным циклом управления – например, системы из состава АСУ ТП СОДП (прежде всего системы железнодорожной автоматики и телемеханики, блокировки, управления безопасностью и др.). В принципе одна и та же система может обладать свойствами систем как первого, так и второго типа.

Для постоянно функционирующих систем АС КП в интересах минимизации рисков на основе использования функций чувствительности и функций затрат разработаны различные модели и стратегии управления ресурсами и рисками применения АС КП в условиях деструктивных информационно-технических воздействий (ИТВ) с целью снижения исходной неопределенности в задании компонентов риска и выбора их подходящих значений [5-11]. К таким моделям относятся модель однопараметрического управления, формируемая исходя из нейтрализации совокупной функции влияния от параметров модели за счет изменения одного из этих параметров, и модель управления, основанная на стратегии равенства вкладов каждой компоненты (параметра) модели [6, 7], главным недостатком которых является отсутствие учета экономической составляющей.

Ниже рассмотрены модели и стратегии (сценарии) управления рисками и ресурсами с учетом экономического фактора.

# Модель управления рисками непрерывных АС КП с учетом неопределенности в заданиях компонентов риска

Рассмотрим одно из наиболее распространенных выражений для риска безопасного функционирования постоянно действующей системы  $R = Y \cdot P$ , где P и Y – средние значения для вероятности реализации угрозы и ущерба [6].

Будем считать, что заданы исходные значения  $R_{\scriptscriptstyle 0}$  и  $Y_{\scriptscriptstyle 0}$  и исходный уровень риска  $R_{\scriptscriptstyle 0}$  =

 $= P_{_{0}} \cdot Y_{_{0}}$ . Соответствующими функциями чувствительности по параметрам риска будут [8]

$$FZp = \frac{\partial R}{P}\bigg|_{R_0} = \frac{\partial (P \cdot Y)}{P}\bigg|_{R_0} = Y_0,$$

$$FZy = \frac{\partial R}{Y}\bigg|_{R_0} = \frac{\partial (P \cdot Y)}{Y}\bigg|_{R_0} = P_0.$$

Уровень вероятностной неопределенности отдельных компонент риска в условиях справедливости нормального закона распределения погрешностей задания компонент составит соответственно  $\delta P = \chi_q \cdot \sigma_p$ ,  $\delta Y = \chi_\gamma \cdot \sigma_y$ , где  $\chi_q$  и  $\chi_y$ , а также  $\sigma_q$  и  $\sigma_y$  — соответствующие квантили и среднеквадратические отклонения распределения погрешностей задания компонент.

Тогда функциями влияния на функцию риска указанных неопределенностей будут

$$FWp = FZp \cdot \delta P$$
,  $FWv = FZv \cdot \delta Y$ .

В зависимости от функциональных особенностей систем (комплексов) они могут складываться либо арифметически (наиболее худший случай)

$$FW_1 = FZp \cdot dP + FZy \cdot dY,$$

либо геометрически

$$FW_2 = \sqrt{(FZp \cdot dP)^2 + (FZy \cdot dY)^2}.$$

В общем случае гарантированный риск (что и характеризует прежде всего системы критического применения) составит  $R_{_{\Gamma}}=R_{_{0}}+FW.$ 

Для поиска рациональных значений рисков с использованием функций чувствительности и подходящих функций затрат предлагается применить алгоритм, в котором при обеспечении гарантированного уровня риска  $R_{_{\Gamma}} = P_0 \cdot Y_0 + FZ_p \cdot dP + FZ_y \cdot dY$  для снижения имеющегося уровня неопределенности наиболее экономичным образом до некоторого

заданного уровня *Rtr* минимизируется функционал стоимости

$$CS = Cp \cdot (P_0 / dP)^v + Cy \cdot (Y_0 / dY)^v$$
. (1)

В (1)  $C_p$  и  $C_y$  – коэффициенты затрат, v – коэффициент, обеспечивающий выбор наилучших аппроксимаций.

При заданном уровне неопределенности

$$FZp \cdot dP + FZy \cdot dY = eps$$

задача сводится к задаче на безусловный экстремум с использованием принципа Лагранжа.

Для формул Лагранжа типа

$$FL(dP, dY, \lambda) =$$

$$= C_p \cdot (P_0 / dP)^v + C_y \cdot (Y_0 / dY)^v +$$

$$+ \lambda \cdot [(FZp \cdot dP + FZy \cdot dY) - eps]$$

аналитическое решение запишем следующим образом:

$$dP = \frac{eps \cdot \left[ C_p \cdot (P_0^{\nu} / dP) \right]^{\frac{1}{1+\nu}}}{FZp \cdot \left[ C_p \cdot (P_0^{\nu} / dP) \right]^{\frac{1}{1+\nu}} + FZy \cdot \left[ C_y \cdot (Y_0^{\nu} / dY) \right]^{\frac{1}{1+\nu}}}$$

$$dY = \frac{eps \cdot \left[ C_y \cdot (Y_0^{\nu} / dY) \right]^{\frac{1}{1+\nu}}}{FZp \cdot \left[ C_p \cdot (P_0^{\nu} / dP) \right]^{\frac{1}{1+\nu}} + FZy \cdot \left[ C_y \cdot (Y_0^{\nu} / dY) \right]^{\frac{1}{1+\nu}}}$$

На рис. 1 представлена характерная зависимость возрастания затрат от снижения уровней неопределенности в оценках риска.

График, приведенный на рис. 1, связывает затраты на обеспечение защиты АС КП (ось Z) с неопределенностью вероятности угрозы (ось dP) и неопределенностью ущерба (ось dY).

# Модель управления критическими ресурсами непрерывных АС КП с учетом неопределенности факторов риска

Одной из компонент уровня риска невыполнения АС КП своих функциональных задач может служить математическое ожидание ущерба, который может определяться через математическое ожидание уровня информационного ресурса (актива) на время решения системой своих функциональных задач.

К основным показателям, влияющим на реализуемость АС КП своих функциональных задач (особенно в период информационного противоборства), относятся устойчивость к ИТВ (информационная безопасность), живучесть, надежность ресурсов, а также оперативность их применения, формируемая в соответствующих обеспечивающих подсистемах [12].

Для постоянно функционирующих (непрерывных) АС КП наиболее существенным является получение функции рисков несохранения критических ресурсов за некоторый момент времени для заданного сценария применения системы.

Выражение для объема ресурсов АС КП для произвольного закона распределения ИТВ на произвольный момент времени F(t), включая момент деградации ресурса до критического состояния, можно записать в виде [1]

$$N(t) = N_0 \cdot P_{\text{H}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{x}}) \cdot (F(t)),$$
 (2)

где  $N_{_0}$  – начальный уровень ресурсов АС КП;  $P_{_{\rm H}}, P_{_{\rm ж}}$  – вероятностные показатели надежности и живучести ресурсов.

С использованием подхода, изложенного выше, когда произведение функции чувствительности на предельную погрешность отдельного параметра модели ресурсов системы является при статистическом анализе частной функцией влияния  $FW_i(t) = FZ_i(t) \cdot \chi_{\alpha \sigma_i}$ , где  $\chi_{\alpha}$  – квантиль, соответствующая заданной доверительной вероятности  $\alpha$ , а  $\sigma_i$  – среднее

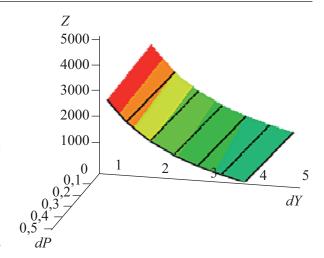


Рис. 1. Зависимость возрастания затрат от снижения уровней неопределенности

квадратическое отклонение погрешности задания (наблюдения) i-го параметра, были получены частные функции влияния параметров на ресурс системы для различных законов распределения ИТВ, предельные вариации ресурса по всем параметрам, которые в зависимости от функциональных особенностей АС КП могут складываться либо арифметически (наиболее худший случай), либо геометрически —  $FW_{sum}(t)$  [8].

Для определения характера поведения риска невыполнения АС КП функциональных задач и ресурса АС КП при учете неопределенности в задании параметров модели и разных законах распределения воздействий получены аналитические решения, позволяющие представить поведение риска и ресурсов в виде соответствующих трубок траекторий [7].

На рис. 2 в качестве примера показаны трубки траекторий риска R(t) и ресурса  $N_{\ell}(t)$  АС КП, построенные для нормального закона распределения ИТВ с учетом функций влияния параметров на ресурс системы ( $R_{_{\rm H}}(t)$ ) — верхняя и нижняя границы,  $N_{_{\rm TP}}$  — требуемый уровень ресурсов для выполнения системой своих функциональных задач).

Для заданных факторов неопределенности, присущих самой системе и имеющих вероятностную природу, заданного априорного закона воздействий на ресурс системы (воз-

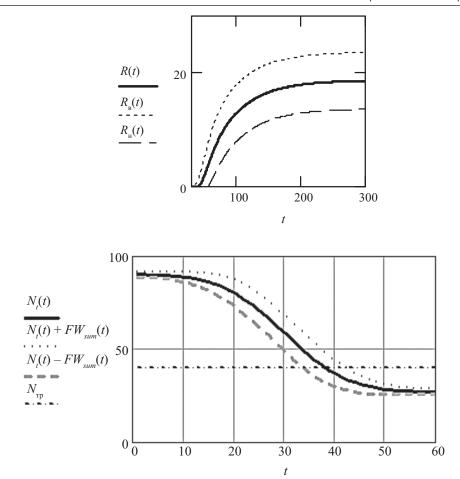


Рис. 2. Характер трубки траекторий риска и ресурса АС КП при нормальном законе распределения ИТВ

действия внешней среды), требуемого уровня ресурсов для выполнения системой своих функциональных задач ( $N_{\rm тp}$ ) (или его нижней границы для гарантированного риска) определены алгоритмы параметрического управления ресурсом при различных подходах к управлению с целью повышения устойчивости АС КП к выполнению своих функциональных задач [7].

При этом управление ресурсами с учетом экономического фактора приводит к существенному удешевлению управления. С помощью принципа Лагранжа рассматриваемая задача сводится к поиску оптимальных значений компонент (уровней начального ресурса, надежности, живучести, времени, параметрам воздействий), входящих в выражение (2) [7]. Запишем функцию Лагранжа таким образом:

$$FL(D_{1}, D_{2}, D_{3}, D_{4}, D_{5}, \lambda) =$$

$$= \sum_{i=1}^{M} C_{i} \cdot \left(\frac{P_{i}}{D_{i}}\right)^{v} + \lambda \left(\sum_{i=1}^{M} |FZ_{i} \cdot D_{i} - eps\right),$$

где функция цены имеет вид [9]  $\sum\limits_{i=1}^{M} C_i \cdot \left( \frac{P_i}{D_i} \right)^v$ 

при ограничениях  $\sum_{i=1}^{M} |FZ_i \cdot D_i| = eps$ ;  $C_i$  – коэффициенты затрат на управление;  $P_i$  – исходные значения компонент;  $D_i$  – управления по компонентам;  $FZ_i$  – функции чувствительности; M – количество управляемых компонент, в данном случае равно 5.

Задача допускает аналитическое решение путем получения и приравнивания нулю част-

ных производных по  $D_i$  и  $\lambda$  и дальнейших преобразований [7]

$$D_{i} = eps \cdot \left(\frac{C_{i} \cdot P_{i}^{v}}{|FZ_{i}|}\right)^{\frac{1}{1+v}} \times \left(\sum_{i=1}^{M} |FZ_{i}| \cdot \left(\frac{C_{i} \cdot P_{i}^{v}}{|FZ_{i}|}\right)^{\frac{1}{1+v}}\right)^{-1}.$$

В случае нахождения управлений компонентами рисков при ограничениях на суммарные затраты задача управления ресурсами системы, обладающей совокупностью  $x_k$  свойств (k=1,2,...,K), формулируется следующим образом: найти и обеспечить управление  $\delta_{X_k}$ , доставляющих минимум функционалу, представляемому арифметической или геометрической суммой (определяется функциональными свойствами системы)  $\sum\limits_{k=i}^K \delta x_k \times (\sqrt{\sum\limits_{k=i}^K (\delta x_k)^2})$  при ограничении  $\sum\limits_k \int_{X_k} C(x_k) \times \ln\frac{\delta x_k}{\delta(x_k)} dx = C_{\text{зад}}$ . В этом случае целевая

функция представляется как функция Лагранжа и записывается так [10, 11]:

$$\Phi(x_{k},\lambda) = \sum_{k} \delta x_{k} + \frac{1}{2} \left( \sum_{k} \int_{X_{k}} c(x_{k}) \cdot \frac{d\delta x_{k}}{\delta(x_{k})} dx_{k} - C_{\text{3ad}} \right).$$

# Подход к управлению рисками в АС КП с заданным циклом управления

Для систем с заданным циклом управления управление рисками связано с жесткими требованиями по оперативности применения. Наиболее полной характеристикой устойчивости таких АС КП служит функция распределения времени завершения цикла управления, в том числе и с учетом возможных воздействий на АС КП, применяя которую можно решать задачи управления процессом для улучшения его оперативных характеристик и снижения рисков невыполнения АС КП своей функциональной задачи. Данный подход может быть положен в основу анализа процессов, протекающих в организационно-технических системах реального времени, и исследования их с использованием методов теории марковских процессов [12–15].

С помощью функции распределения времени завершения цикла управления FR(t) можно найти вероятность реализации процесса на любой момент времени, в частности на заданное время применения системы, среднюю продолжительность процесса, продолжительность процесса с заданным уровнем гарантии, а также функцию риска незавершения цикла управления системой 1 - FR(t) (рис. 3).

Управление процессами в таких АС КП также можно представить как минимизацию некоторого функционала затрат, зависящего как от коэффициентов затрат, так и от ин-

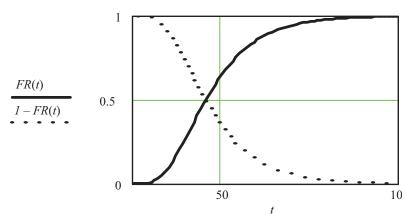


Рис. 3. Примерные зависимости для функции распределения и функции риска для времени завершения процессов управления в системе

тенсивностей подпроцессов и их граничных (верхнего и нижнего) значений с ограничениями на вероятность своевременного завершения процесса [12].

#### Заключение

Рассмотрены модели и алгоритмы управления рисками и ресурсами проектируемых АС КП в условиях воздействий с целью снижения исходной неопределенности в задании факторов риска и выбора подходящих значений рисков. Найдены аналитические выражения для целевых функционалов и на их основе рациональные решения по управлению рисками, а также по управлению параметрами модели в условиях неопределенности с учетом экономического фактора. Рассмотренные модели могут быть положены в основу управления рисками и ресурсами АС КП при их синтезе при различных стратегиях управления.

#### Библиографический список

- 1. СТО РЖД 1.18.002—2009. Управление информационной безопасностью. Общие положения. М.: ОАО «РЖД», 2009. 30 с.
- 2. Положение по оценке рисков информационной безопасности ОАО «РЖД». М. : ОАО «РЖД», 2015.-47 с.
- 3. СТО РЖД 1.02.033–2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации опасностей и рисков (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 13.12.2010 № 2570 р). М.: ОАО «РЖД», 2010.
- 4. СТО РЖД 1.02.034—2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации опасностей и рисков. Общие правила оценки и управления рисками (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 13.12.2010 № 2570 р). М.: ОАО «РЖД», 2010.
- 5. Глухов А. П. Оценка чувствительности ресурсов и рисков применения систем критических

- приложений к влияющим факторам / А. П. Глухов, Н. Н. Котяшев, А. В. Купцов // Стратегическая стабильность. -2007.- № 1.- C. 39-44.
- 6. Василенко В. В. Аналитические представления процессов риска в комплексах и системах критических приложений / В. В. Василенко, Н. Н. Котяшев, В. В. Корнеев // Двойные технологии. 2002. № 1. С. 54—57.
- 7. Симонов А. Л. Проблемы учета факторов риска при подготовке управленческих решений / А. Л. Симонов, О. М. Тляшев // Космос и обеспечение безопасности России. 2004. Т. 1.— С. 189—193.
- 8. Теплова Т. Н. Управление инвестиционным процессом компании в условиях неопределенности / Т. Н. Теплова // Проблемы теории и практики управления. 2006. № 7. С. 93–104.
- 9. Дедков В. К. Вопросы синтеза безопасности объектов защиты / В. К. Дедков // Стратегическая стабильность. 2006. № 2. С. 45—50.
- 10. Василенко В.В. Управление рисками проектируемых систем в условиях воздействий / В.В. Василенко, А.П. Глухов, Н.Н. Котяшев // Стратегическая стабильность. 2008. № 1. С. 39–46.
- 11. Глухов А. П. Управление ресурсами проектируемых систем и комплексов критических приложений с заранее поставленными для них целями управления в условиях воздействий / А. П. Глухов, Н. Н. Котяшев, В. Л. Лукин // Двойные технологии. 2008. № 1. С. 46—55.
- 12. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. М. : Наука, 1981.-464 с.
- 13. Котяшев Н. Н. Процессный подход к исследованию организационно-технических систем реального времени с конечным состоянием / Н. Н. Котяшев, А. А. Кузнецов, А. В. Купцов // Двойные технологии. -2010. № 4. С. 29–37.
- 14. Глухов А. П. Полумарковские модели оценивания вероятностно-временных характеристик выполнения функциональных задач автоматизированными системами управления критического применения / А. П. Глухов // Естественные и технические науки. 2015.  $Notemath{\mathbb{N}}$  7 (85). С. 101–110.
- 15. Волков Л. И. Безопасность и надежность систем / Л. И. Волков. М. : СИП РИА,  $2003.-268\,\mathrm{c}.$

#### References

- 1. STO RZhD 1.18.002–2009. Upravleniye informatsionnoy bezopasnostyu. Obshiye polozheniya [Russian Railways Standard 1.18.002–2009. Information safety control. General requirements]. Moscow, OAO "RZhD" Publ., 2009, 30 p. (In Russian)
- 2. Polozheniye po otsenke riskov informatsionnoy bezopasnosty OAO "RZhD" [Provision on OAO "RZhD" information security risk assessment]. Moscow, OAO "RZhD" Publ., 2015, 47 p. (In Russian)
- 3. STO RZhD 1.02.033–2010. Upravleniye resursamy na etapakh zhyznennogo tsykla, riskamy i analyzom nadezhnosty (URRAN). Poryadok identifikatsii opasnostey i riskov (utverzhden i vveden v deystviye rasporyazheniyem OAO "RZhD" ot 13.12.2010 no. 2570p) [Russian Railways Standard 1.02.033–2010. Management of resources at life cycle stages, risks and reliability analysis (URRAN). Hazard and risk identification procedure (approved and brought into force by OAO "RZhD" order dated 13.12.2010 no. 2570 p)]. Moscow, OAO "RZhD" Publ., 2010. (In Russian)
- 4. STO RZhD 1.02.034–2010. Upravleniye resursamy na etapakh zhyznennogo tsykla, riskamy i analyzom nadezhnosty (URRAN). Poryadok identifikatsii opasnostey i riskov (utverzhden i vveden v deystviye rasporyazheniyem OAO "RZhD" ot 13.12.2010 no. 2570p) [Russian Railways Standard 1.02.034–2010. Management of resources at life cycle stages, risks and reliability analysis (URRAN). Hazard and risk identification procedure. General regulations of risk assessment and management (approved and brought into force by OAO "RZhD" order dated 13.12.2010 no. 2570 p)]. Moscow, OAO "RZhD" Publ., 2010. (In Russian)
- 5. Glukhov A. P., Kotyashev N. N. & Kuptsov A. V. Otsenka chuvstvytelnosty resursov i riskov prymeneniya system krytycheskykh prylozheniy k vliyayushym faktoram [The assessment of risk and resource sensitivity of systems of critical applications with regard to the influencing factors]. *Strategic stability*, 2007, no. 1, pp. 39–44. (In Russian)
- 6. Vasylenko V. V., Kotyashev N. N. & Korneyev V. V. Analytycheskiye predstavleniya protsessov ryska v kompleksakh i systemakh krytycheskykh prylozheniy [Analytical views of risk processes in complexes and systems of critical applications]. *Dual technologies*, 2002, no. 1, pp. 54–57. (In Russian)

- 7. Symonov A. L. & Tlyashev O. M. Problemy ucheta faktorov ryska pry podgotovke upravlencheskykh resheniy [Issues of risk management when preparing management decisions]. *Space and safety assurance of Russia*, 2004, vol. 1, pp.189–193. (In Russian)
- 8. Teplova T. N. Upravleniye investytsionnym protsessom kompanii v usloviakh neopredelennosty [Company's investment process management under certainty]. *Issues of control theory and practice*, 2006, no. 7, pp. 93–104. (In Russian)
- 9. Dedkov V. K. Voprosy synteza bezopasnosty obyektov zashyty [The issues of security synthesis of protected assets]. *Strategic stability*, 2006, no. 2, pp. 45–50. (In Russian)
- 10. Vasylenko V. V., Glukhov A. P. & Kotyashev N. N. Upravleniye ryskamy proyektyruyemykh system v usloviyakh vozdeystviy [Risk management of systems under design within the conditions of impact]. *Strategic stability*, 2008, no. 1, pp. 39–46. (In Russian)
- 11. Glukhov A. P., Kotyashev N. N. & Lukyn V. L. Upravleniye resursamy proyektyruyemykh system i kompleksov krytycheskykh prylozheniy s zaraneye postavlennymy dlya nykh tselyamy upravleniya v usloviyakh vozdeystviy [Resource management of systems and complexes of critical applications under design with preset management goals within the conditions of impact]. *Dual technologies*, 2008, no. 1, pp. 46–55. (In Russian)
- 12. Rozenwasser Y. N. & Yusupov R. M. *Chuvst-vytelnost system upravleniya* [Sensitivity of management systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 464 p. (In Russian)
- 13. Kotyashev N. N., Kuznetsov A. A. & Kuptsov A. V. Protsessniy podkhod k issledovaniyu organizatsionno-tekhnicheskykh system realnogo vremeny s konechnym sostoyaniyem [Process approach to the study of real-time engineering administrative systems with final state]. *Dual technologies*, 2010, no. 4, pp. 29–37. (In Russian)
- 14. Glukhov A. P. Polumarkovskiye modely otsenivaniya veroyatnostno-vremennykh kharakterystyk vypolneniya funktsionalnykh zadach avtomatyzyrovannymy systemamy upravleniya krytycheskogo prymeneniya [Semi-Markov models of assessing probabilistic

time characteristics of functional tasks accomplishment by automated systems of critical application management]. *Natural and engineering sciences*, 2015, no. 7 (85), pp. 101–110. (In Russian) 15. Volkov L. I. *Bezopasnost i nadezhnost system* [*Safety and reliability of systems*]. Moscow, SIP RIA (Engineering Issues Section Russian Academy of Engineering) Publ., 2003, 268 p. (In Russian)

КОРНИЕНКО Анатолий Адамович — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kaa. pgups@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); АДАДУРОВ Сергей Евгеньевич — доктор техн. наук, заместитель директора, sv.diass99@ya.ru (АО «ВНИИЖТ»); ГЛУХОВ Александр Петрович — канд. техн. наук, доцент, gluhov@uez. css-rzd.ru; \*ДИАСАМИДЗЕ Светлана Владимировна — канд. техн. наук, доцент, sv.diass99@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КУ-СТОВ Владимир Николаевич — доктор техн. наук, генеральный директор, kustov-v@gisca.ru (ООО «УЦ "ГАЗИНФОРМСЕРВИС"»).

### $\rightarrow$

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

УДК 629.463.32

#### Ю.П. Бороненко, Ю.Б. Житков

#### ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ С ЖИДКИМ ГРУЗОМ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Изучить особенности динамики вагона-цистерны с учетом частичного заполнения котла жидким грузом. **Методы:** Исследование проводилось методом математического моделирования с использованием программного комплекса «Универсальный механизм». Подвижный груз представлялся набором маятников, совершающих колебания в различных плоскостях кузова. **Результаты:** Подробно описан способ построения математической модели для применения в автоматизированном программном комплексе, ориентированном на расчет ходовых качеств железнодорожных экипажей. Проведен сравнительный анализ движения вагона-цистерны с различным уровнем заполнения котла с представлением жидкости в виде маятников и полностью «застывшего» груза. Показаны отличия в показателях ходовых качеств. **Практическая значимость:** Предложенная математическая модель вагона-цистерны с жидким грузом рекомендуется к применению при расчете ходовых качеств грузовых вагонов.

Ключевые слова: Вагон-цистерна, динамика вагона, универсальный механизм, маятники.

**Juriy P. Boronenko**, D. Sci. Eng., professor, head of chair, boron49@yandex.ru; \***Juriy B. Zhytkov**, postgraduate student, zhitkov-nvc@ya.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE SPECIFICITIES OF DYNAMICS OF A TANK CAR WITH LIQUID CONSIGNMENT

#### **Summary**

**Objective:** To study the specificities of dynamics of a tank car with allowance for partial filling of a barrel with liquid consignment. **Methods:** The study was carried out by means of a mathematical model method using the "Universal mechanism" software package. Movable load was represented as a set of pendulums, performing oscillations in different planes of a car body. **Results:** The method of building a mathematical model for automated software package, aimed at calculation of running qualities of railroad vehicles, was described in detail. The comparative analysis of a tank car movement with a different filling level of a tank, as well as with liquid, represented as a set of pendulums and a fully "frozen" cargo was carried out. The differences in indices of the running qualities were presented. **Practical importance:** The given mathematical model of a tank car with liquid consignment may be used when calculating running qualities of freights.

**Keywords:** A tank car, dynamics of a car, universal mechanism, pendulums.

#### Введение

Задачи, связанные с динамикой тел, которые имеют частично заполненные жидкостью полости, встречаются в различных

областях техники. Большое внимание ученых и конструкторов привлекает решение таких задач в аэрокосмической области [1, 2]. Это связано с существенным изменением количества жидкого топлива во время

полета летательного аппарата. Задачам динамики других транспортных средств [3], перевозящих жидкие грузы с постоянным уровнем заполнения, уделяется меньшее внимание, так как считается, что влияние жидкого груза на динамику транспортного средства можно уменьшить, ограничив свободную поверхность жидкости или применив разделение общего объема груза по отдельным полостям [4].

Перевозка жидких грузов в железнодорожных вагонах-цистернах разрешается с заполнением объема котла менее 20% или более 80% (если вязкость жидкости менее 2680 сСт при 20 °С) [5]. Максимальное заполнение ограничено запасом объема для теплового расширения груза и составляет 94-98%. Таким образом, транспортировка жидких грузов в вагонах-цистернах осуществляется с частичным заполнением котла на 80–98%. В этом случае считается, что влияние колебаний жидкости на ходовые качества вагона будет незначительно. В то же время известны инциденты с вагонамицистернами, которые связывают с подвижностью жидкого груза [6].

Целью работы является оценка влияния пространственных колебаний жидкости на показатели ходовых качеств вагона при различных эксплуатационных режимах.

# Математическая модель и расчетная схема

При разработке математической модели пространственных колебаний вагонацистерны с учетом частичного заполнения жидкостью основное внимание уделено

возможности использования проверенных железнодорожной практикой программных комплексов для расчета динамических моделей, например, таких как «МЕДУNА» [7] или «Универсальный механизм» [8]. Далее описывается математическая модель, реализованная в программном комплексе «Универсальный механизм».

Ходовые части вагона представлялись традиционным образом [7, 9, 10]. Основное отличие моделирования ходовых частей с учетом возможностей «Универсального механизма» заключалось в описании места контакта «пятник-подпятник». Для учета нелинейной силовой характеристики [11] при перевалке кузова вагона на пятнике использовался набор элементов, представленный на рис. 1:

- шарнир, расположенный в центре пятника, разрешающий угловые перемещения вокруг трех осей и вертикальное перемещение;
- контактные силы «точка-плоскость», расположенные в двух местах на кромке пятника по оси Ox;
- специальная сила «сайлент-блок», установленная в месте расположения шарнира и позволяющая задавать нелинейную характеристику восстанавливающего момента в зависимости от угла наклона кузова.

При описании контактной силы «точкаплоскость» задавался коэффициент трения, который рассчитывался по формуле

$$\eta = M_{FR} / (Q \cdot R),$$

где  $M_{{\scriptscriptstyle FR}}$  — значение момента трения, полученное при расчете с использованием моде-

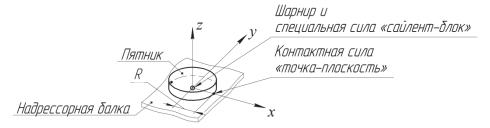


Рис. 1. Набор элементов для описания места контакта «пятник-подпятник»

ли [11]; Q – сила от массы кузова, приходящая на пятник; R – радиус пятника.

Так как в программном комплексе «Универсальный механизм» нет специального инструмента, позволяющего описать жидкость, для моделирования жидкого груза было предложено использовать механическую модельаналог (рис. 2) системы «котел—жидкость», которая подробно описана в работе [12].

Котел вагона-цистерны с жидким грузом, который совершает пространственные колебания, представляется в расчетной схеме, изображенной на рис. 2,  $\varepsilon$ , как твердое тело с системой математических маятников. Система включает в себя математические маятники, один из которых совершает колебания в продольной плоскости (рис. 2, a), а другой – в поперечной (рис. 2,  $\delta$ ). Колебания жидкого груза, возникающие вокруг линии пересечения плоскостей симметрии, описываются с помощью математических маятников на бифилярном подвесе (рис. 2,  $\epsilon$ ), которые свободно вращаются вокруг вертикальной оси.

Однако в работе [12] не был учтен нулевой тон колебания жидкости, который возникает в поперечной плоскости цилиндрического сосуда, когда свободная поверхность жидкости остается плоской. Для нулевого тона колеба-

ний масса маятника будет равна массе всего жидкого груза, точка подвеса будет расположена на продольной оси котла, а длина маятника равна расстоянию от точки подвеса до центра масс жидкого груза.

Расчетную схему, показанную на рис. 2, *г*, невозможно реализовать в автоматизированных программных комплексах в том виде, в котором она приведена, так как суммарная масса маятников, полученная из условия равенства гидродинамических сил и гидродинамических моментов, оказывается больше суммарной массы жидкого груза, вмещаемого в котел, что противоречит физическому смыслу.

Известно, что силовое воздействие груза на кузов, состоит из вертикальной силы, которая образуется под действием собственного веса, и моментов, которые возникают вследствие перемещения подвижной части жидкости. Учитывая это, предлагается перейти от расчетной схемы, представленной на рис. 2, г, к эквивалентной расчетной схеме, приведенной на рис. 3. Основное их отличие заключается в способе закрепления маятников на кузове и размещении дополнительных вертикальных сил и момента.

В реализованной модели закрепление математических маятников происходило таким

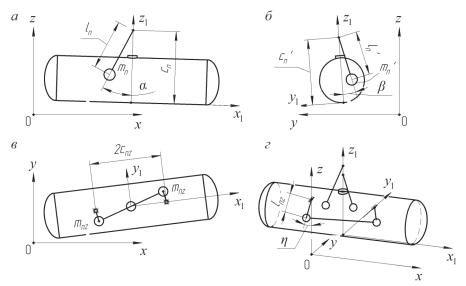


Рис. 2. Механические модели-аналоги системы «котел-жидкость»:

 образом, чтобы каждый из них оказывал воздействие только в той плоскости, в которой он совершает колебания относительно кузова. Для этого в модель были включены дополнительные «тела-подвески», к которым прикреплялись маятники. Степени свободы тел, закрепленных на кузове (рис. 3), представлены в табл. 1.

Дополнительные вертикальные силы размещались в месте шарнира «пятник-подпятник» и были нужны для компенсации вертикального воздействия от присоединенных к кузову масс. Дополнительный момент прикладывался в центре масс кузова и был необходим для компенсации опрокидывающего момента, который образуется из-за смещения точки подвеса маятника  $m_1$  и тела  $m_0$  при боковой качке. При описании сил и момента была учтена возможность автоматической коррекции их величины в зависимости от вертикальных ускорений кузова:

$$F_z = (m_0 + m_1 + m_1' + m_{1z})(g + \ddot{z}) / 2,$$
  
$$M_{0x} = (m_0 c_0 \sin(\theta) + m_1 c_1 \sin(\theta))(g + \ddot{z}),$$

где g — ускорение свободного падения;  $\ddot{z}$  — вторая производная от перемещения кузова, определяемая на текущем шаге интегрирова-

ния;  $c_0$  — высота расположения «застывшего груза»  $m_0$ ;  $c_1$  — высота расположения подвеса маятника  $m_1$ ;  $\theta$  — угол наклона кузова.

При моделировании движения вагонацистерны с частичным заполнением котла использовались гидродинамические параметры механических аналогов жидкости (табл. 2).

#### Результаты расчета математической модели

Рассматривалось движение вагона-цистерны по прямому и кривому участкам пути со скоростями 120, 100, 80, 60 и 40 км/ч. Радиус кривой составлял 650 м с возвышением наружного рельса 0,15 м. Каждой скорости соответствовало движение вагона с различным уровнем заполнения котла: 0,98 V, 0,93 V, 0,81 V, 0,66 V. Для оценки ходовых качеств были определены коэффициенты вертикальной динамики и минимальные коэффициенты запаса устойчивости от схода с рельсов согласно ГОСТ 33211. В табл. 3, 4 приведены значения динамических качеств вагона при условиях представления жидкости в виде подвижного груза и полностью «застывшего» груза.

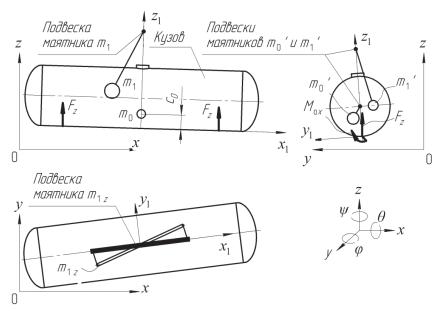


Рис. 3. Расчетная схема кузова вагона-цистерны с жидким грузом, реализуемая в программном комплексе «Универсальный механизм»

ТАБЛИЦА 1. Степени свободы тел, закрепленных на кузове

Тело 1	Тело 2	Степень свободы						
Tello 1	16,10 2	х	у	Z	θ	φ	Ψ	
ГСК*	Подвеска маятника $m_1'$	1	1	1	1	1	1	
Подвеска маятника $m_1'$	Кузов	0	0	0	1**	1**	1**	
Подвеска маятника $m_1'$	Маятник $m_1'$	1**	0	0	1	0	0	
ГСК*	Подвеска маятника $m_0'$	1	1	1	1	1	1	
Подвеска маятника $m_0'$	Кузов	0	0	0	1**	1**	1**	
Подвеска маятника $m_0'$	Маятник $m_0^{\ \prime}$	1**	0	0	1	0	0	
ГСК	Подвеска маятника $m_1$	1	1	1	1	1	1	
Подвеска маятника $m_1$	Кузов	0	0	0	1**	1**	1**	
Подвеска маятника $m_1$	Маятник $m_{_1}$	0	1**	0	0	1	0	
ГСК	«Застывшая» жидкость $m_0$	1	1	1	1	1	1	
Застывшая жидкость $m_0$	Кузов	0	1**	1**	0	0	0	
ГСК	Подвеска маятника $m_{1z}$	1	1	1	1	1	1	
Подвеска маятника $m_{1z}$	Кузов	1**	1**	0	1**	1**	0	
Подвеска маятника $m_{1z}$	Маятник $m_{1z}$	0	0	1	0	0	1	

<sup>\*</sup> Главная система координат.

ТАБЛИЦА 2. Значения гидродинамических параметров механических аналогов для различных плоскостей колебания котла с жидким грузом

Гидродинамические параметры			Значение параметров при заполнении				
1 идр	одинамич	сские параметры	0,98 V	0,93 V	0,81 V	0,66 V	
		$m_1$	40 632	41 534	38961	33 993	
		$m_0$	21 118	17068	11 939	7568	
Плоскост	гь <i>Оzx</i> ,	$l_1$	2,71	3,71	5,33	6,81	
первый	й тон	$c_1$	3,11	4,10	5,67	7,13	
		$c_0$	1,46	1,37	1,24	1,11	
		Циклическая частота	1,90	1,63	1,36	1,20	
	Нулевой тон	$m_0^{'}$	61 750	58 602	50 900	41 561	
		l <sub>o</sub> '	0,03	0,10	0,27	0,46	
Плоскость		Циклическая частота	18,08	9,86	6,07	4,62	
Ozy	Первый тон	$m_1'$	4659	9588	16204	20360	
		$l_1'$	0,39	0,54	0,83	1,02	
		$c_1^{\prime}$	1,19	1,06	0,82	0,56	
		Циклическая частота	5,00	4,25	3,43	3,10	
		$I_{1z}$	33 632	65 938	116041	148 030	
Вокруг о		$l_{1z}$	0,36	0,50	0,74	0,99	
первый	і́ тон	$c_{_1}$	1	1	1	1	
		Циклическая частота	5,05	4,35	3,54	3,13	

 $\Pi$  р и м е ч а н и е. V – полный объем кузова.

<sup>\*\*</sup> Перемещение тел в отмеченных направлениях автоматически регулируется относительно кузова через задание силового воздействия. Инструменты, позволяющие реализовать такой способ регулировки, описаны в [13].

Участок пути	Ско- рость, км/ч	Заполнение кузова							
		0,98 V		0,93 V		0,81 V		0,66 V	
		$K_{fl}^*$	$K_{frz}$ **	$K_{_{fl}}$	$K_{frz}$	$K_{_{fl}}$	$K_{frz}$	$K_{_{fl}}$	$K_{frz}$
Прямая	40	0,10	0,11	0,11	0,11	0,14	0,11	0,17	0,13
	60	0,13	0,15	0,13	0,16	0,13	0,18	0,19	0,20
	80	0,20	0,26	0,20	0,26	0,30	0,26	0,28	0,29
	100	0,20	0,36	0,21	0,36	0,25	0,36	0,34	0,40
	120	0,22	0,68	0,22	0,68	0,26	0,64	0,32	0,58
Кривая, радиус 650 м	40	0,41	0,42	0,41	0,41	0,38	0,40	0,38	0,36
	60	0,35	0,38	0,35	0,34	0,31	0,24	0,28	0,23
	80	0,18	0,27	0,16	0,26	0,18	0,27	0,16	0,30
	100	0,23	0,31	0,24	0,32	0,25	0,35	0,28	0,38
	120	0,49	0,61	0,52	0,61	0,54	0,56	0,60	0,51

ТАБЛИЦА 3. Коэффициент вертикальной динамики

ТАБЛИЦА 4. Минимальный коэффициент запаса устойчивости от схода с рельсов

Участок пути	Ско- рость, км/ч	Заполнение кузова							
		0,98V		0,93V		0,81 <i>V</i>		0,66V	
		$N_{\!\scriptscriptstyle fl}$ *	$N_{frz}$ **	$N_{_{fl}}$	$N_{frz}$	$N_{_{fl}}$	$N_{frz}$	$N_{_{fl}}$	$N_{frz}$
Прямая	40	2,49	2,39	2,35	2,43	2,28	2,45	1,88	2,34
	60	2,06	1,91	2,12	1,79	1,90	1,78	1,92	1,73
	80	1,99	1,83	2,05	1,84	1,74	1,69	1,64	1,59
	100	1,91	1,64	1,89	1,61	1,78	1,60	1,54	1,48
	120	1,79	1,30	1,67	1,44	1,54	1,30	1,49	1,36
Кривая, радиус 650 м	40	1,36	1,51	1,21	1,61	1,21	1,74	1,04	2,33
	60	1,42	1,67	1,16	1,67	0,98	2,02	0,96	2,02
	80	1,93	1,90	1,71	1,94	1,42	1,90	1,32	1,86
	100	2,10	1,89	1,90	1,68	1,64	1,68	1,52	1,62
	120	2,23	1,32	2,02	1,86	1,35	1,70	0,40	1,71

<sup>\*</sup> При условии представления жидкости как подвижного груза.

#### Заключение

Разработана уточненная модель пространственных колебаний вагона-цистерны с учетом частичного заполнения котла жидким грузом. Модель ориентирована на использо-

вание в автоматизированном программном комплексе «Универсальный механизм» при расчетах ходовых качеств вагонов.

Предложен способ моделирования гидродинамических сил и гидродинамических моментов с помощью математических маятников

<sup>\*</sup> При условии представления жидкости как подвижного груза.

<sup>\*\*</sup> При условии представления жидкости как полностью «застывшего» груза.

<sup>\*\*</sup> При условии представления жидкости как полностью «застывшего» груза.

через специальные «тела-подвески» с приложением к кузову вагона дополнительных вертикальных сил и момента. Такой способ дает возможность компенсации неравенства общей массы маятников, совершающих колебания в разных плоскостях, по отношению к массе жидкого груза, вмещаемого в котел вагона.

Адаптирована математическая модель краевого опирания пятника кузова вагона на надрессорную балку для использования в программном комплексе «Универсальный механизм».

Изучено влияние уровня заполнения котла на ходовые качества вагонов-цистерн. Показано, что разница в коэффициентах вертикальной динамики между моделями подвижного и «застывшего» грузов на прямых участках достигала 67%, на кривых участках — 46%, разница в показателях коэффициента устойчивости от схода с рельс на прямых участках составила 28%, на кривых участках — 77%.

Устойчивость от схода с рельс вагона с подвижным грузом в прямых участках пути выше в сравнении с вагоном с полностью «застывшим» грузом. В кривых участках пути наблюдался обратный эффект. При движении в кривой на скоростях 40, 60 и 120 км/ч наблюдалось взаимодействие между колебаниями кузова и колебаниями маятников, что приводило к значительному снижению коэффициента запаса устойчивости от схода.

Предложенная маятниковая модель пространственных колебаний жидкого груза рекомендуется для использования при расчетах ходовых качеств вагонов-цистерн.

#### Библиографический список

- 1. Моисеев Н. Н. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость / Н. Н. Моисеев, В. В. Румянцев. М. : Наука, 1965. 339 с.
- 2. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракетносителей космических аппаратов / Б. И. Рабинович. М.: Машиностроение, 1975. 416 с.

- 3. Черкашин Ю. М. Динамика наливного поезда / Ю. М. Черкашин. М. : Транспорт, 1975. 136 с.
- 4. Шимановский А.О. Моделирование колебаний жидкости в транспортном резервуаре с перегородками / А.О. Шимановский, А.В. Путято // Автомобильный транспорт. 2006. № 19. С. 35—37.
- 5. Правила перевозок жидких грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума. Утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества, протокол от 21–22 мая 2009 г. № 50. Минск, 2009.
- 6. Черкашин Ю. М. Безопасность движения железнодорожного подвижного состава / Ю. М. Черкашин. М.: Интекст, 2010. 175 с.
- 7. Орлова А.М. Требования к динамическим качествам грузовых вагонов и методы их подтверждения: учеб. пособие / А.М. Орлова, В.С. Лесничий, Е.А. Рудакова, А.Н. Комарова, А.В. Саидова. СПб.: ПГУПС, 2014. 51 с.
- 8. Погорелов Д. Ю. Моделирование динамики систем тел с использованием ПК «Универсальный механизм»: текущее состояние и перспективы развития / Д. Ю. Погорелов // ХІ Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докл. Казань, 20–24 августа 2015 г. Казань: Казанск. (Приволжск.) федерал. ун-т, 2015. С. 3027–3029.
- 9. Hazrati A. I. Hunting Analysis of a Partially-Filled Railway Tank Car / A. I. Hazrati, S. Rakheja, A. W. Ahmed, J. Zhang // ASME/IEEE Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, March 23–26, 2015. San Jose: ASME, 2015. Paper N JRC2015-5631. P. V001T10A003; 7 pages. doi: 10.1115/JRC2015-5631.
- 10. Kovalev R. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis / R. Kovalev, N. Lysikov, G. Mikheev et al. // Multibody Syst. Dyn. November 2009. Vol. 22. P. 399. doi: 10.1007/s11044-009-9170-6.
- 11. Бороненко Ю. П. Уточнение силовой характеристики связи кузова вагона с тележками при перевалке на плоских пятниках / Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2016. Т. 13, вып. 2 (47). С. 113—145.

- 12. Богомаз Г. И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / Г. И. Богомаз. Киев : Наукова Думка, 2004. 224 с.
- 13. Универсальный механизм. Руководство пользователя. Программа ввода данных. Брянск: OOO «Вычислительная механика», 2016. 296 с.

#### References

- 1. Moiseyev N. N. & Rumyantsev V. V. *Dynamyka* tela s polostyamy, soderzhashymy zhydkost [Dynamics of a body with a cavity, containing liquid]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 339 p. (In Russian)
- 2. Rabynovich B. I. Vvedeniye v dynamyku raketnosyteley kosmycheskykh apparatov [Introduction to the dynamics of space launch vehicles]. Moscow, Mashynostroyeniye Publ., 1975, 416 p. (In Russian)
- 3. Cherkashyn Y. M. *Dynamyka nalyvnogo poyezda* [*Dynamics of tank cars*]. Moscow, Transport Publ., 1975, 136 p. (In Russian)
- 4. Shymanovskiy A. O. & Putyato A. V. Modelyrovaniye kolebaniy zhydkosty v transportnom rezervuare s peregorodkamy [Liquid sloshing simulation in a transport reservoir with dividing walls]. *Automobile transport*, 2006, no. 19, pp. 35–37. (In Russian)
- 5. Pravyla perevozok zhydkykh gruzov nalyvom v vagonakh-tsysternakh I vagonakh bunkernogo typa dlya perevozky neftebytuma [Shipping rules for liquid consignment in tank cars and hopper-shaped cars designed to ship petroleum bitumen]. Utverzhdeno Sovetom po zheleznodorozhnomu transport gosudarstv-uchastnykov Sodruzhestva. Protokol ot 21–22 maya 2009, no. 50 [Approved by the Railway Transport Council of participating member-states of the Commonwealth]. Protocol dated May 21st—22nd 2009, no. 50. (In Russian)
- 6. Cherkashyn Y. M. *Bezopasnost dvyzheniya zheleznodorozhnogo podvyzhnogo sostava* [*Safety of rolling stock operation*]. Moscow, Intekst Publ., 2010, 175 p. (In Russian)

- 7. Orlova A.M., Lesnychiy V.S., Rudakova Y.A., Komarova A.N. & Saidova A.V. *Trebovaniya k dynamycheskym kachestvam gruzovykh vagonov i metody ikh podtverzhdeniya* [Requirements for dynamic qualities of freight cars and methods of acknowledgement]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 51 p. (In Russian)
- 8. Pogorelov D. Y. Modelyrovaniye dynamyky system tel s ispolzovaniyem PK "Universalniy mekhanism": tekusheye sostoyaniye i perspektyvy razvytiya [Dynamic simulation of systems of bodies based on the "Universal mechanism" software package: current state and development prospects]. XI Vserossiyskiy syezd po fundamentalnym problemam teoretycheskoy i prykladnoy mekhanyky [The 11th all-Russian conference on fundamental problems of engineering mechanics and applied mechanics]. Book of reports. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2015, pp. 3027–3029. (In Russian)
- 9. Hazrati A. I., Rakheja S., Ahmed A. W. & Zhang J. Hunting Analysis of a Partially-Filled Railway Tank Car. *ASME/IEEE Joint Rail Conference*. San Jose, ASME Publ., 2015, paper no. JRC2015–5631, pp. V001T10A003; 7 pages, doi: 10.1115/JRC2015-5631.
- 10. Kovalev R., Lysikov N., Mikheev G. et al. Freight car models and their computer-aided dynamic analysis. *Multibody Syst. Dyn.*, 2009, vol. 22, p. 399, doi: 10.1007/s11044-009-9170-6.
- 11. Boronenko Y.P. & Zhytkov Y.B. Utochneniye sylovoy kharakterystyky svyazy kuzova vagona s telezhkamy pry perevalke na ploskykh pyatnykakh [The correction of power characteristic of a car body and trucks tie in the process of transshipment on flat center plates]. *Proceedings of Petersburg State University*, 2016, vol. 13, issue 2 (47), pp. 113–145. (In Russian)
- 12. Bogomaz G. I. *Dynamyka zheleznodorozh-nykh vagonov-tsystern* [*Dynamics of railroad tank cars*]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2004, 224 p. (In Russian)
- 13. Universalniy mechanism. Rukovodstvo polzovatelya. Programma vvoda dannykh [Universal mechanism. User guide. Data input program]. Bryansk, OOO "Vychyslytelnaya mekhanyka" [LLC "Computational mechanics"] Publ., 2016, 296 p. (In Russian)

БОРОНЕНКО Юрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, boron49@ yandex.ru; \*ЖИТКОВ Юрий Борисович – аспирант, zhitkov-nvc@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.46.027.35

#### С. М. Буторин, В. П. Ефимов

#### ФРИКЦИОННЫЕ КЛИНЬЯ ГРУЗОВЫХ ТЕЛЕЖЕК С ПОВЫШЕННЫМ МЕЖРЕМОНТНЫМ РЕСУРСОМ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

Цель: Разработка для серийного производства инновационной системы фрикционных гасителей колебаний грузовых тележек для вагонов нового поколения колеи 1520 мм. Повышение межремонтного пробега грузовых тележек с 500 до 800 тыс. км обеспечит собственнику подвижного состава значительное сокращение затрат на содержание тележки и вагона в целом за жизненный цикл. Для достижения данной цели необходимо снизить в 3-4 раза износы в узлах трения тележки и выбрать оптимальное сочетание материалов фрикционных гасителей колебаний, которые обеспечивают необходимый коэффициент относительного трения в условиях длительной эксплуатации. Методы: Применены методы экспериментальных исследований пар трения для фрикционных гасителей колебаний грузовых тележек и методы оценки их износов в подконтрольной эксплуатации. Результаты: Проведенные исследования и подконтрольная эксплуатация серийных и опытных изделий обеспечили разработку перспективных фрикционных клиньев грузовых тележек с межремонтным ресурсом до 800 тыс. км пробега. Тирибологические испытания и исследования релаксационной стойкости позволили разработать новые полиуретановые композиции для эластомерных накладок на фрикционные клинья, которые в сочетании с конструктивным усовершенствованием узла обеспечивают повышение межремонтных пробегов при сохранении технических параметров тележки. Практическая значимость: На основе проведенных работ разработана для серийного производства конструкторская документация на фрикционные клинья с повышенным межремонтным ресурсом для тележек грузовых вагонов с нагрузкой на ось 23,5 тс (230 кН) и 25 тс (245 кН). Результаты исследований и испытаний используются для разработки фрикционных гасителей колебаний перспективной грузовой тележки с нагрузкой на ось 27 тс (265 кН).

**Ключевые слова:** Грузовая тележка, фрикционный гаситель колебаний, полиуретан, коэффициент трения, повышение эксплуатационного ресурса.

**Sergey M. Butoryn**, chief operating officer, sbutorin@unikom-service.ru (OOO the Research and Production Enterprise "Unikom-Service"); \*Victor P. Yefimov, Cand. Sci. Eng., leading researcher, uiz123456@mail.ru (Ural branch of AO "VNIIZhT") FRICTION WEDGES OF FREIGHT-CAR TRUCKS WITH AN IMPROVED OVERHAUL PERIOD

#### Summary

**Objective:** To develop an innovative system of friction shock absorbers of freight trucks for 1520 mm gage cars of the new generation for full-scale production. The increase in the distance run between overhauls from 500 000 to 800 000 km will allow the owner of a rolling stock to considerably reduce the costs on track and car life cycle maintenance. In order to achieve the objective, it is necessary to reduce the wear in friction units of a truck in 3–4 times and select an optimal combination of materials for friction shock absorbers, which provide the required relative friction coefficient in the conditions of continuous service. **Methods:** Methods of field research of friction couples for friction shock absorbers of freight trucks, as well as the methods of wear evaluation in under-control operation were applied in the study. **Results:** The conducted research and under-control operation of stock-produced and pilot items allowed for the development of long-range truck friction wedges with distance run between overhauls

up to 80 000 km. Tribological studies and relaxation resistance research made it possible to develop the new polyurethane compositions for elastomeric covering plates on friction wedges, which along with the design improvement of a friction unit provide an increase in the distance run between overhauls without changing technical parameters of a truck. **Practical importance:** On the basis of the conducted research, the design documentation on friction wedges with an improved distance run between overhauls for freight car trucks with 23,5 tnf (230 kN) and 25 tnf (245 kN) axle loading was developed for full-scale production. The results of the research and tests are used for the development of friction shock absorbers of a long-range truck with 27 tnf (265 kN) axle loading.

**Keywords:** A truck, friction shock absorber, polyurethane, friction coefficient, operating life operational life improvement.

Повышение эксплуатационного ресурса фрикционных клиньев остается важной проблемой, требующей постоянных поисков новых материалов и инновационных конструктивных и технологических решений. Грузовые тележки нового поколения должны обеспечивать межремонтный пробег 800 тыс. км [1, 2]. Тележка модели 18-194-1 с нагрузкой на ось 25 тс (245 кН) эксплуатируется на сети железных дорог колеи 1520 мм с 2008 г. [3, 4]. В настоящее время имеется статистическая информация по надежности и ресурсу клиновых гасителей колебаний тележек, наработка которых в эксплуатационных условиях составляет 450-620 тыс. км. Данная информация свидетельствует об эффективности применения фрикционных клиньев из термоупрочненного высокопрочного чугуна ВЧ-120 по ТУ 4111-101-07518941-2002 [5] с износостойкими накладками из полиуретановых композиций (рис. 1–3). Кроме того, накоплен значительный опыт эксплуатации тележек модели 18-578 и модернизированных тележек модели 18-100М с нагрузкой на ось 23,5 тс (230 кН) с аналогичными клиновыми системами [6-8].

Обеспечивается заложенный в конструкторской документации (КД) межремонтный пробег фрикционных клиньев грузовых тележек 500 тыс. км.

Эффективность применения инновационных гасителей колебаний по значительному снижению износов сопрягаемых деталей показана на рис. 4, *а*–*в*. Сравнительные графики износов приведены для тележки модели

18-100 с типовой клиновой системой (клин из стали 20Л) и тележки модели 18-578 с инновационной клиновой системой (клин из высокопрочного термоупрочненного чугуна ВЧ-120 с уретановой накладкой, фрикционная планка из стали 30ХГСА) [9]. При этом сохраняются технические характеристики рессорного подвешивания и фрикционного гасителя колебаний. Тележки с инновационной фрикционной системой гашения колебаний имеют повышенные жесткость в плане и критическую скорость, при которой появляются колебания виляния [10–12].

На начальном этапе применения фрикционных клиньев с эластомерными накладками для их изготовления использовался уретановый форполимер марки ТТ-194 системы ТДИ (ООО НПП «Уником-Сервис») по ТУ 2292-006-55180710–2007 [13]. В дальнейшем выполнен переход для изготовления в серийном производстве накладок на фрикционные клинья из полиуретана марки «Уникспур 1A700LF» со свойствами антистатичности, с улучшенными физико-механическими характеристиками (табл. 1) по ТУ 2292-13-55180710–2009 [14].

Экспериментальная оценка коэффициента относительного трения в клиновой системе гасителей колебаний рессорных комплектов грузовой тележки проводилась на специальном стенде для статических нагружений тележек грузовых вагонов. Испытания осуществлялись путем нагружения и разгрузки тележки вертикальной силой. На рис. 5 представлена силовая характеристика рессорного комплек-

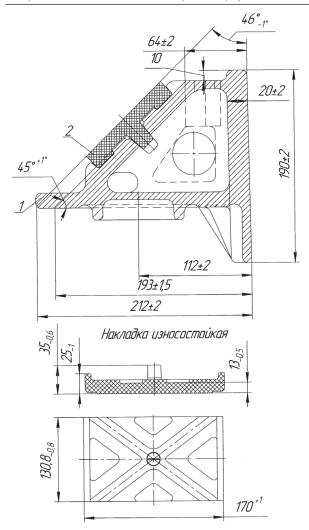


Рис. 1. Фрикционный клин тележки модели 18-194-1 с износостойкой полиуретановой накладкой

та тележки модели 18-578 (клин из высокопрочного чугуна ВЧ-120 с полиуретановой накладкой).

Коэффициент относительного трения в клиновой системе гасителей колебаний тележки составил 0,076–0,079. Экспериментально определенные коэффициенты относительного трения в рессорном подвешивании тележки с различным пробегом (от 120 до 495 тыс. км) уменьшились не более чем на 4–6%.

Для дальнейшего повышения ресурса и надежности фрикционных клиньев грузовых тележек с эластомерными накладками были разработаны новые полиуретаны марок «Уникспур 7A750T» и «Уникспур 7A700TA» с



Рис. 2. Общий вид составного фрикционного клина



Рис. 3. Общий вид накладки на фрикционный клин (материал – полиуретан марки «Уникспур 1A700LF» со свойствами антистатичности)

армирующим составом и свойством антистатичности. Физико-механические свойства полиуретана данной марки приведены в табл. 1.

Для применения новых полиуретановых композиций при изготовлении эластомерных

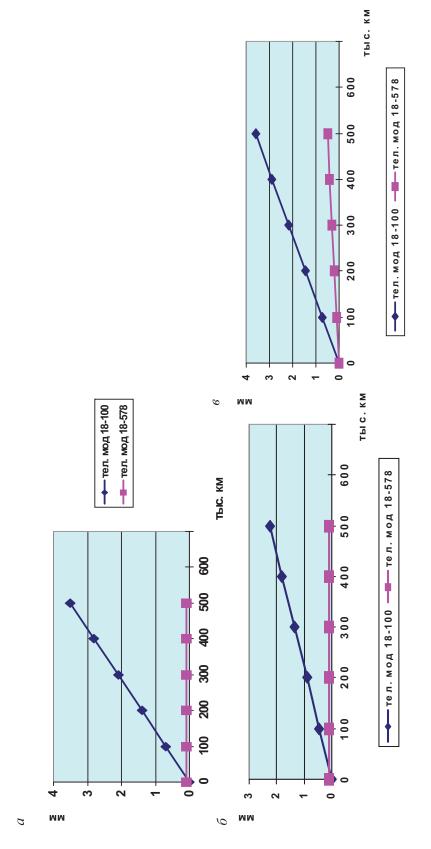


Рис. 4. График износов (мм) наклонных поверхностей надрессорных балок (a), наклонных поверхностей фрикционных клиньев (b), вертикальных поверхностей фрикционных клиньев (в) в зависимости от пробега (тыс. км)

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики материалов накладок
на фрикционный клин

Наименование показателей	Накладка фрик- ционного клина (материал – урета- новый форполимер марки ТТ-194)	Накладка фрикционного клина (материал – полиуретан марки «Уникспур 1A700LF» со свойствами антистатичности)	Накладка фрикционного клина (материал – полиуретан марки «Уникспур 7A700TA» с армирующим составом и свойствами антистатичности)
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	52	52,9	52,8
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	205	274	30
Сопротивление раздиру, кН/м	190	184	227
Твердость по Шору, Д, усл. ед.	72 <u>+</u> 5	69	69–71
Условное напряжение при 100% -ном удлинении, МПа	41	28,3	-
Допустимая температура эксплуатации, °С	от -60 до +100	от -60 до +100 (до 120 не более 4 ч)	от -60 до +100 (до 120 не более 4 ч)
Внешний вид	Монолитный резиноподобный материал		



Рис. 5. Силовая характеристика рессорного комплекта тележки модели 18-578

накладок фрикционных клиньев потребовались дополнительные исследования коэффициента трения с целью выбора оптимального варианта. Для проведения трибологических испытаний и определения коэффициентов

трения в условиях сухого трения скольжения из полиуретана различных марок (табл. 2) были подготовлены 15 образцов размером  $10\times10\times20$  мм — по три образца для каждой марки полиуретана. В качестве контртела ис-

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты трения скольжения испытанных образцов f и полиуретана различных марок  $f_{\rm cp}$  при испытаниях в условиях сухого трения скольжения по пластине из стали X12M при нагрузке  $P=19,6~{\rm H}~(2~{\rm krc})$ 

Марка полиуретана	№ образца	Коэффициент трения, $f$	Коэффициент трения, $f_{\rm cp}$
	1	0,21	
Уникспур 7А750Т	2	0,20	0,21
	3	0,22	
	1	0,20	
Уникспур 7А700ТА	2	0,21	0,22
	3	0,26	
	1	0,26	
Уникспур 1A750LF	2	0,25	0,26
	3	0,28	
	1	0,23	
Уникспур 1A700LF	2	0,22	0,22
	3	0,21	
	1	0,26	
TT-194	2	0,25	0,25
	3	0,24	



Рис. 6. Общий вид трибологической установки

пользовали пластину из стали X12M с твердостью 62HRC. Для получения ровной рабочей поверхности пластина была подвергнута механической шлифовке. Испытания в условиях сухого трения скольжения проводили на лабораторной трибологической установке (рис. 6) по схеме «палец—пластина» при возвратно-поступательном движении образца (пальца) по неподвижно закрепленной пластине при комнатной температуре на воздухе (рис. 7).

Испытания проводили для пар трения: «образец из полиуретана определенной марки (табл. 2) — пластина из стали X12М» при скольжении торцевых поверхностей образцов со средней скоростью 0,035 м/с при нагрузке 19,6 Н (2 кгс) и длине рабочего хода 40 мм. Общий путь трения в каждом испытании составлял 16 м (200 двойных ходов). При площади контактирующей поверхности 10×10 мм = 100 мм² удельная нагрузка составила 0,196 МПа.

В процессе испытаний непрерывно регистрировалась сила трения F, которую измеряли с помощью упругого элемента — рессоры (кольца) с наклеенными на него тензометрическими датчиками сопротивления.

Тарировку рессоры производили с использованием поверенных грузов.

Регистрацию сигнала с тензодатчиков и обработку результатов оценивали на компьютере благодаря модулю АЦП ZET-210 с предварительным усилителем ZET-412 и специальному программному обеспечению ZETView. Коэффициент трения f для каждого образца рассчитывали по формуле f = F/P, где F — сила трения; P — нормальная нагрузка. Коэффициент трения  $f_{\rm cp}$  для каждой марки полиуретана определяли как среднее значение коэффициента трения трех испытанных образцов данной марки. Результаты испытаний в условиях сухого трения скольжения полиуретана различных марок по пластине из стали X12M представлены в табл. 2.

На основании анализа полученных результатов можно отметить следующее.

Коэффициент трения скольжения полиуретана исследованных марок при испытаниях в условиях сухого трения скольжения по пластине из стали X12M твердостью 62HRC при нормальной нагрузке  $P=19,6~\mathrm{H}$  (2 кгс) и общем пути трения 16 м находится в диапазоне  $f_{\rm cp}=0,21-0,26$ .

Наименьшим коэффициентом трения обладает полиуретан марки Уникспур 7A750T, коэффициент трения которого  $f_{\rm cp}=0.21.$ 

Наибольшим коэффициентом трения обладает полиуретан марки Уникспур 1A750LF с  $f_{\rm cp} = 0.26$ .

У полиуретана марки Уникспур 7А700ТА наблюдается разброс значений коэффициента трения, что связано с неоднородным составом данного материала из-за армирования.

Параллельно с разработкой новой полиуретановой композиции было выполнено конструктивное усовершенствование накладки на клин: изменена конструкция центрального крепежного элемента-штыря, в части его уси-

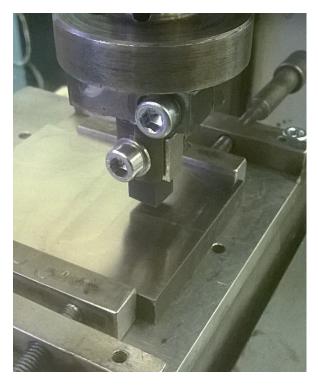


Рис. 7. Пара трения, подготовленная для трибологических испытаний

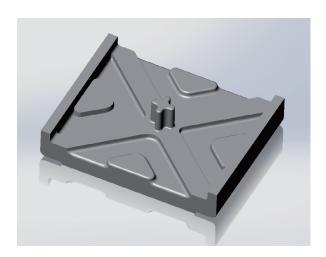


Рис. 8. Общий вид усиленной конструкции крепежного элемента полиуретановой накладки на клин тележки модели 18-194-1

ления (рис. 8). Серийная конструкция накладки [15] показана на рис. 3.

Данное конструктивное изменение обеспечило более надежное крепление накладки на металлическую часть фрикционного клина, конструкция которого также была изменена,

что привело, в свою очередь, к более плотному прилеганию упругой накладки к литому клину, обеспечивая снижение местных динамических напряжений, вызывающих разрывы, трещины, расслоения и другие повреждения материалов накладок. Кроме того, наклонные поверхности карманов надрессорных балок иногда имеют острые продольные кромки и работают как штамп, образуя трещины в полиуретане. Полиуретан марки «Уникспур 7А700ТА» менее чувствителен к таким острым кромкам, благодаря армирующему составу и улучшенным физико-механическим характеристикам.

Накладки клина находятся в состоянии интенсивного сжатия, и в них возникают остаточные деформации, что в сочетании с их износом и износом в сопряжении «клинфрикционная планка» при наработке более 400 тыс. км пробега приводит к завышению клина. Для оценки относительной остаточной деформации при сжатии опытных эластомерных накладок, а также оценки их циклической долговечности проведены испытания образцов толщиной 20 мм из полиуретана марки «Уникспур 7A700TA» при циклическом нагружении. Режим испытаний:  $P_{m} = 25 \text{ тс} - \text{средняя нагруз-}$ ка цикла;  $P_{a} = 20 \text{ тс} - \text{амплитудное значение}$ нагрузки; число циклов нагружения образцов  $N = 2.5 \times 10^6$  циклов. Испытано четыре образца, которые выдержали установленное число циклов без разрушения. После циклических испытаний образцов и замеров их толщины до и после испытаний установлено, что средняя относительная остаточная деформация равна 4,2%. Уровень форсированной испытательной нагрузки на образцы значительно выше динамических нагрузок на накладку фрикционного клина, т.е. можно ожидать в эксплуатационных условиях при пробеге до 800 тыс. км относительную остаточную деформацию эластомерной накладки из полиуретана марки «Уникспур 7A700TA» не более 2,0-2,5%.

Полиуретан марок «Уникспур 1A750LF» и «Уникспур 7A750Т» при испытании на релаксационную стойкость показали аналогичные результаты и также рассматриваются как пер-

спективные при изготовлении эластомерных накладок на фрикционные клинья грузовых тележек.

### Заключение

В результате проведенных работ разработана новая конструкция и созданы новые материалы для эластомерных накладок на фрикционные клинья грузовых тележек, обеспечивающие повышение межремонтного ресурса до 800 тыс. км.

Применение инновационных фрикционных клиньев в рессорном подвешивании грузовых тележек полностью исключает износ карманов надрессорной балки, интенсивность износа наклонных поверхностей фрикционных клиньев снижается в 2,5–3 раза, а вертикальных поверхностей клиньев — в 3,5–4 раза.

### Библиографический список

- 1. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 5 (48). С. 3–6.
- 2. Бороненко Ю.П. Дорожная карта создания инновационных вагонов нового поколения / Ю.П. Бороненко // Подвижной состав XXI века: Инновации в грузовом вагоностроении: материалы Междунар. науч.-технич. конф. СПб., 2014. С. 17–19.
- 3. Ефимов В. П. Новые грузовые тележки для железных дорог России и стран СНГ / В. П. Ефимов // Тяжелое машиностроение. -2008. -№ 8. С. 11-15.
- 4. Ефимов В.П. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В.П. Ефимов, А.А. Пранов, А.Н. Баранов, К.А. Белоусов // Железнодорожный транспорт. 2009. № 6. С. 58–61.
- 5. ТУ 411-101-07518941—2002. Отливки из высокопрочного чугуна марки ВЧ-120. Технические условия. Нижний Тагил : ГУП ПО «Уралвагонзавод», 2002.-8 с.

- 6. Великанов А. В. Фрикционные клинья из высокопрочного чугуна / А. В. Великанов, Б. В. Борщ // Вестник ВНИИЖТ. -2007. -№ 2. -C. 19–22.
- 7. Жевнов П. М. Совершенствование тележек грузовых вагонов по результатами их испытаний и эксплуатации / П. М. Жевнов, В. Н. Белоусов // Проблемы и перспективы развития грузового вагоностроения: материалы науч.-практич. конф. Екатеринбург; Нижний Тагил, 2005. С. 128–131.
- 8. Великанов А.В. Технология производства, качество и работоспособность закаленных фрикционных клиньев из высокопрочного чугуна / А.В. Великанов, Б.В. Борщ, В.М. Федин, А.И. Борц, Е.И. Юрьева // Вестн. ВНИИЖТ. 2007. № 5. С. 19–24.
- 9. Ефимов В. П. Технический уровень тележки 18-578 в сравнении с тележкой 18-100 / В. П. Ефимов // Железнодорожный транспорт. 2006. N 2006 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 100
- 10. Бороненко Ю. П. Тележки с повышенной осевой нагрузкой / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // Железнодорожный транспорт. -2008. -№ 10. С. 50–53.
- 11. Коссов В.С. Тележка с осевой нагрузкой 25 тс для грузового вагона нового поколения / В.С. Коссов, В.А. Чаркин, Л.К. Добрынин, Ю.В. Мещерин, Э.С. Оганьян, В.Н. Огуенко // Железнодорожный транспорт. -2008. -№ 7. C. 55–58.
- 12. Ромен Ю. С. Динамические качества грузовых вагонов на тележках с осевыми нагрузками до 25 тс / Ю. С. Ромен, А. В. Зверталюк, А. В. Коваленко // Вестн. ВНИИЖТ. 2006. № 1. С. 21–26.
- 13. ТУ 2292-006-55180710–2007. Уретановый форполимер марки ТТ-194 системы ТДИ. Первоуральск : ООО НПП «Уником-Сервис», 2007. 10 с.
- 14. ТУ2292-13-55180710–2009. Полиуретановые материалы марки Уникспур. Первоуральск : ООО НПП «Уником-Сервис», 2009.-13 с.
- 15. Шенаурин А. А. Фрикционный гаситель колебаний тележки железнодорожного вагона / А. А. Шенаурин, В. П. Ефимов, А. А. Пранов, В. А. Андронов, Н. А. Мылых, И. Н. Еленевский. Патент на изобретение № 2233759, приоритет от 2002.12.09. Заявка № 2002133297. 10.08.2004. Б. И. № 22.

### References

- 1. Boronenko Y. P. Strategycheskiye zadachy vagonostroyteley v razvytii tyazhelovesnogo dvyzheniya [Strategic missions of car constructors in the development of heavy traffic]. *Transport of the Russian Federation*, 2013, no. 5 (48), pp. 3–6. (In Russian)
- 2. Boronenko Y.P. Dorozhnaya karta sozdaniya innovatsionnykh vagonov novogo pokoleniya. *Podvyzh*noy sostav XXI veka: Innovatsii v gruzovom vagonostroyenii [The road map of creating innovative cars of the new generation. The 21<sup>st</sup> century rolling stock: Innovations in freight car building]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhniccheskoy konferentsii [Proceedings of the International scientific and technical conference]. Saint Petersburg, 2014, pp. 17–19. (In Russian)
- 3. Yefymov V.P. Noviye gruzoviye telezhky dlya zheleznykh dorog [The new freight-car trucks for the railroads of Russia and the countries of CIS]. *Heavy engineering industry*, 2008, no. 8, pp. 11–15. (In Russian)
- 4. Yefymov V. P., Pranov A. A., Baranov A. N. & Belousov K. A. Telezhka dlya gruzovykh vagonov novogo pokoleniya s povyshennymy osevymy nagruzkamy [A freight-car truck of the new generation with high axle loading]. *Railroad transport*, 2009, no. 6, pp. 58–61. (In Russian)
- 5. TU 411-101-07518941–2002. Otlyvky iz vysoko-prochnogo chuguna marky VCh-120. Tekhnicheskiye usloviya [TU 411-101-07518941–2002. Casting from high-strength iron of VCh-120 grade. Technical regulations]. Nizhny Tagil, State Unitary Enterprise Production Association "Uralvagonzavod" Publ., 2002, 8 p. (In Russian)
- 6. Velykanov A. V. & Borsh V. B. Fryktsionniye klyniya iz vysokoprochnogo chuguna [Friction wedges made of high-strength iron cast]. *Bulletin of VNIIZhT*, 2007, no. 2, pp. 19–22. (In Russian)
- 7. Zhevnov P. M. & Belousov V. N. Sovershenstvovaniye telezhek gruzovykh vagonov po rezultatam ikh ispytaniy i ekspluastatsii [The improvement of freight-car trucks based on the results of testing and operation of the latter]. Problemy i perspektyvy razvytiya gruzovogo vagonostroyeniya [The issues and prospects of freight car building development]. Materialy nauchno-praktycheskoy konferentsii [Proceedings of research and training conference]. Yekaterinburg, Nizhny Tagil, 2005, pp. 128–131. (In Russian)

- 8. Velykanov A. V. & Borsh V. B., Fedyn V. M., Borts A. I. & Yuriyeva Y. I. Tekhnologiya proizvodstva, kachestvo i rabotosposobnost zakalennykh fryktsionnykh klyniyev iz vysokoprochnogo chuguna [Production process, quality and operating capacity of chilled friction wedges made of high-strength iron cast]. *Bulletin of VNIIZhT*, 2007, no. 5, pp. 19–24. (In Russian)
- 9. Yefimov V.P. Tekhnicheskiy uroven telezhky 18-578 v sravnenii s telezhkoy 18-100 [Technical level of 18-578 truck compared to 18-100 truck].] *Railroad transport*, 2006, no. 7, pp. 56–60. (In Russian)
- 10. Boronenko Y. P. & Orlova A. M. Telezhky s povyshennoy osevoy nagruzkoy [Trucks with high axle loading]. *Railroad transport*, 2008, no. 10, pp. 50–53. (In Russian)
- 11. Kossov V. S., Carkyn V. A., Dobrynyn L. K., Mesheryn Y. V., Oganyan E. S. & Oguyenko V. N. Telezhka s osevoy nagruzkoy 25 ts dlya gruzovogo vagona novogo pokoleniya [A 25 tnf axle loading truck designed for a freight car of the new generation]. *Railroad transport*, 2008, no. 7, pp. 55–58. (In Russian)
- 12. Romen Y. S., Zvertaluk A. V. & Kovalenko A. V. Dynamycheskiye kachestva gruzovykh vagonov na telezhkakh s osevymy nagruzkamy do 25 ts

- [Dynamic qualities of freight cars with axle loading up to 25 tnf]. *Bulletin of VNIIZhT*, 2006, no. 1, pp. 21–26. (In Russian)
- 13. TU 2292-006-55180710–2007. Uretanoviy for-polymer marky TT-194 systemy TDI [TU 2292-006-55180710–2007. TT-194 grade urethane prepolymer of TDI system]. Pervouralsk, OOO the Research and Production Enterprise "Unikom-Service" Publ., 2007, 10 p. (In Russian)
- 14. TU 2292-13-55180710–2009. Polyuretanoviye materialy marky UNIKSPUR [TU 2292-13-55180710–2009. Polyurethane materials of UNIKSPUR grade]. Pervouralsk, OOO the Research and Production Enterprise "Unikom-Service" Publ., 2009, 13 p. (In Russian)
- 15. Shenauryn A.A., Yefimov V.P., Pranov A.A., Andronov V.A., Malykh N.A. & Yelenevskiy I.N. *Fryktsionniy gasytel kolebaniy telezhky zhelezno-dorozhnogo vagona* [*Friction shock absorber of a railroad cartruck*]. Patent na izobreteniye № 2233759, pryorytet ot 2002.12.09, zayavka no. 2002133297 [Patent of invention N 2233759, priority dated 2002.12.09, application N 2002133297, 10.08.2004]. Bulletin of Inventions, no. 22. (In Russian)

БУТОРИН Сергей Михайлович – исполнительный директор, sbutorin@unikom-service.ru (ООО НПП «Уником-Сервис»); ЕФИМОВ Виктор Петрович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, uiz123456@mail.ru (Уральское отделение АО «ВНИИЖТ»).

УДК 656.25(2Р37)+06

### О.И. Веревкина

# О ГИБРИДНОМ МЕТОДЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВАНИИ ОБЩЕГО ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА

Дата поступления: 21.09.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

Цель: Построение модели гибридного метода прогнозирования интенсивности нарушений безопасности движения по причинам, связанным с состоянием инфраструктуры железнодорожного транспорта, а также с факторами, производными от человеческого. Методы: Предложенный метод будет называться гибридным потому, что он одновременно использует общий логиковероятностный метод (ОЛВМ) моделирования интенсивности нарушений безопасности и статистические данные различного уровня по состояниям инфраструктуры, безопасности движения, человеческого фактора и интенсивностью действия опасных природных факторов. Особенностью железнодорожного транспорта по сравнению с иными видами транспорта (судовой, воздушный), а также с другими опасными объектами (АЭС, АПЛ) является наличие обширной отраслевой статистики по показателям состояния элементов инфраструктуры, одновременно с показателями нарушений безопасности движения поездов, что предполагается использовать в методе прогнозирования в дополнении с ОЛВМ. Результаты: Сформулированы основные положения гибридного метода прогнозирования интенсивности нарушения безопасности движения поездов. Метод апробирован для оценки вероятности нарушения безопасности движения по ответственности инфраструктуры на скоростном участке железной дороги «Москва-Санкт-Петербург» для комплекса ключевых факторов риска. Практическая значимость: Применение метода позволяет решать обратную задачу: уточнить значения переменных (вероятностей), определяющих состояние «человеческого фактора», участвующих в формировании функции целостности и риска. Эти параметры относятся к наиболее трудно оцениваемым, что помимо прочего подчеркивает актуальность данного направления развития ОЛВМ в интересах железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** Безопасность, риск, прогнозирование, факторы, инфраструктура, гибридный метод, дерево событий, модель, оценка, общий логико-вероятностный метод.

**Olga I. Verevkyna**, Cand. Sci. Eng., associate professor, ov18111966@mail.ru (Rostov State Transport University) ON THE HYBRID METHOD OF FORECASTING THE RISKS ON RAILWAY TRANSPORT BASED ON THE GENERAL LOGICAL-AND-PROBABILISTIC METHOD

### Summary

**Objective:** To construct a model of the hybrid method of forecasting the severity of traffic security violation due to the reasons connected with the state of railway transport infrastructure, as well as with human-derived factors. **Methods:** The suggested method is called hybrid because it simultaneously uses the general logical-and-probabilistic method (OLVM) of severity of traffic security violation simulation and statistic data of different level according to the state of infrastructure, traffic security, human factor and the intensity of natural hazards exposure. The specificity of the railway transport, compared to other types of transport (marine, air transport), as well as other hazardous facilities (APP – atomic power plant, NPS – nuclear powered submarine) is the availability of extensive statistics on the indices of the state of elements of an infrastructure along with the indices of railway traffic security violation, the latter is

supposed to apply in the method of forecasting in addition to OLVM. **Results:** The main propositions of the hybrid method of forecasting the railway traffic security violation were formulated. The method was approved for the assessment of probability of traffic security violation on responsibility of infrastructure at the section of "Moscow–Saint Petersburg" high-speed network, for the complex of key risk factors. **Practical importance:** Application of the method in question allows for the solution of the reverse problem: to specify the values of the variables (probabilities), that determine the state of the "human factor" and take part in generation of consistency and risk function. These parameters refer to the ones that are most difficult to assess, which, including the above-mentioned, emphasizes the topicality of the given direction of OLVM development for the benefit of the railway transport.

**Keywords:** Security, risk, forecasting, factors, infrastructure, hybrid method, event tree, model, assessment, general logical-and-probabilistic method.

В данной статье описывается подход к прогнозированию рисков на железнодорожном транспорте, основанный одновременно и на общем логико-вероятностном методе (ОЛВМ), и на использовании отраслевых статистических данных. В связи с этим отличием от стандартного ЛВМ он назван гибридным.

Разработке предшествовал статистический анализ рисков по ответственности путевого хозяйства [1–3], позволивший выделить основные транспортные происшествия. В статье производится формирование статистических показателей (по соотношению количеств предотказных состояний и количеств нарушений безопасности движения, по виду предотказных состояний), которые служат средством информационного контроля как статических показателей вероятности и риска, так и показателей, используемых для прогноза.

ЛВМ стал интенсивно развиваться в 1960—1990 гг., в том числе в трудах отечественных ученых [4—6]. Первые шаги по применению ЛВМ для задач оценки рисков в некоторых сегментах на железнодорожном транспорте освещались в работах [7, 8] и далее развивались в [9, 10].

### Общая схема гибридного метода

В настоящий момент развитие управления безопасностью движения, менеджмента риска в ОАО «РЖД» находится в такой стадии, кото-

рая требует от моделей безопасности полный учет технологии работ, включая различия технических, технологических, кадровых особенностей для разных регионов (железных дорогфилиалов ОАО «РЖД»), участков (линейных предприятий). В основе формирования таких моделей лежит:

- 1) декомпозиция технологии защитного комплекса на фрагменты, осуществляемая таким образом, чтобы каждый отдельный блок был адекватно описан функцией работоспособности и функцией риска. Связано это с необходимостью сравнивать различные кластеры железнодорожного транспорта по уровню риска;
- 2) формирование деревьев событий, функций работоспособности и функций риска;
- 3) проведение вероятностного анализа безопасности (ВАБ) на основе предыдущих пунктов;
- 4) формирование статистических данных контроля полученных значений.

В соответствии с [11, 12] одним из двух компонентов риска нарушения безопасности является вероятность появления события за контрольный промежуток времени. Поэтому далее проводится оценка вероятности события, которое несет наибольший риск — «сход железнодорожного подвижного состава». Рассматривается вероятность такого события по одному из ключевых факторов — отклонение геометрии рельсовой колеи от норматива 3-й, 4-й степени [13].

Гибридным предлагаемый метод назван потому, что контроль значения вероятности схода и уточнение отдельных входных данных производятся на основе отраслевых статистических данных. ОАО «РЖД» обладает уникальным набором отраслевых систем учета как первичных источников риска (АСУП и др.), так и на уровне отказов технических средств (КАСАНТ) и нарушений безопасности движения (АС РБ), обладающих значительной надежностью, использование которых отличает данную схему применения ЛВМ от рассматривавшихся ранее [4–8].

В формировании функции вероятности принимаются во внимание факторы технического состояния верхнего строения пути и данные, учитывающие состояние «человеческого фактора» [14, 15]. Для образования такой функции на нижнем уровне необходимы модели перерасчета статистической информации по укомплектованности кадров, текучести кадров профессий «монтер» и «контролер пути», «оператор путеизмерительной тележки», «оператор вагона-путеизмерителя». Ниже представлены модели, позволяющие

осуществить перерасчет состояния технических средств и «человеческого фактора» в вероятность срабатывания или несрабатывания компонентов защиты на примере дерева событий, описывающего технологию выявления и блокирования такого первичного источника риска как отклонение от норм содержания геометрии рельсовой колеи (ГРК) 3-й и 4-й степени.

### Формирование деревьев событий

Согласно [4], дерево событий разработано с блочной структурой в соответствии с функционалом персонала выполнения или невыполнения решений, связанных с безопасностью и риском на различных уровнях. На верхнем уровне (рис. 1) дерево содержит ключевое событие – появление отклонения на полигоне, на нижнем – следующие события:

- выявление (невыявление) отклонения
   ГРК 3-й и 4-й степени;
- введение (невведение) ограничения скорости;

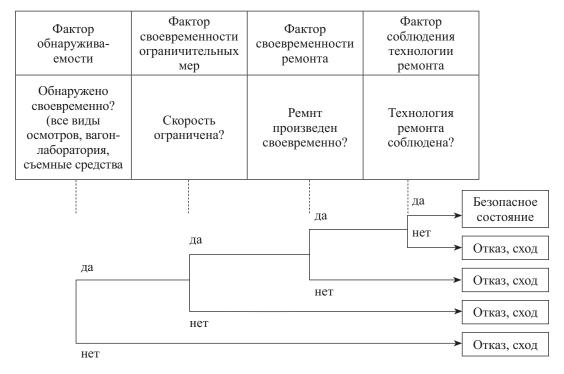


Рис. 1. Дерево событий первого уровня

- своевременное выполнение ремонта;
- качественное выполнение ремонта (выполнение его с нарушением технологии).

Деревья построены согласно правилам [12].

Каждая точка ветвления дерева представляет собой отдельную ветвь (блоки 2-го уровня), вход в которую расположен в точке ветвления, выходы — в точках ветвления следующего, более низкого уровня. В качестве примера на рис. 2 приведена одна из четырех ветвей. Дерево построено с учетом того, что для рассматриваемых участков технология по выявлению отклонений ГРК не содержит работу обходчика, выполняемую монтером пути. При наличии такого компонента он включается в структуру дерева.

В каждом узле ветвей блоков 2-го уровня содержатся ветви-блоки 3-го уровня. Точкой входа в них служат точки ветвления, точками выхода — два выхода: первый — соседний нижеследующий узел, второй — событие, состоящее в том, что управление по принятию решений и мер передается на следующий уровень.

На рис. 3 представлена ветвь — блок 3-го уровня по выявляемости отклонения ГРК 3-й и 4-й степени контролером пути.

# Формирование функции риска с учетом влияния факторов

После формирования всех блоков, согласно [4], строятся функции работоспособности и риска, в данном случае на примере блока «Выявляемость отклонения ГРК 3-й и 4-й степени».

Оценим вероятность ошибки контролера пути.

Предположение 1. Вероятность выполнения графика осмотров увязывается с укомплектованностью профессии «контролер пути». Введение переменной, описывающей вероятность прямого события, производится по формулам

$$p(c_1) = x_1,$$

$$q(c_1) = 1 - x_1,$$

здесь  $c_1$  — событие, состоящее в том, что график осмотров выполнен;  $p(c_1)$  — вероятность события, состоящего в том, что график осмотров выполнен;  $q(c_1)$  — вероятность того, что график осмотров не выполнен;  $x_1$  — перемен-

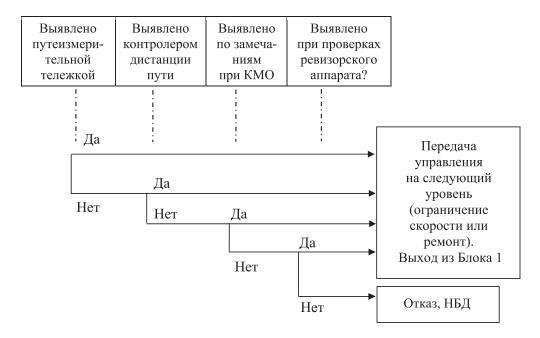


Рис. 2. Ветвь дерева по выявляемости отклонения ГРК 3-й и 4-й степени

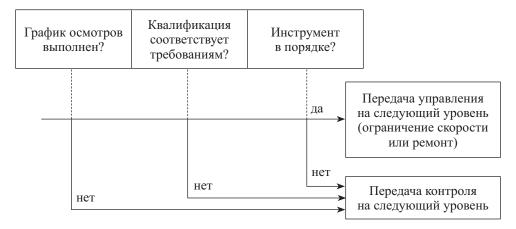


Рис. 3. Блок 3-го уровня (по выявляемости отклонения контролером пути)

ная, равная вероятности события, состоящее в том, что график осмотров выполнен.

При этом предположении конкретное значение  $x_1$  рассчитывается так:

$$x_{1,0} = \frac{\mathbf{y}_{\text{укп}}}{100},$$

где  $\mathbf{Y}_{\mathbf{y}\mathbf{k}\mathbf{n}}$  — процент укомплектованности контролерами пути;  $x_{1,0}$  — величина, принимаемая за конкретное значение вероятности выполнения графиков осмотра на участке.

В статистике Единой комплексной автоматизированной системы управления трудовыми ресурсами (ЕКАСУТР) величина  $x_1$  приводится в процентах, поэтому требование  $0 \le x_{1,0} \le 1$  выполняется автоматически.

Предположение 2. Количество работников со стажем работы (в %) в профессии 1 год вдвое больше, чем со стажем 2 и 3 года.

В этом случае процент распределение по стажу есть функция текучести кадров в такой профессии. Введение переменной, описывающей вероятность, производится по формулам

$$p(c_2) = x_2,$$

$$q(c_2) = 1 - x_2$$

где  $c_2$  — событие, состоящее в том, что работа по выявлению произведена безошибочно;  $p(c_2)$  — вероятность события, состоящего в том, что работа по выявлению произведена безоши-

бочно;  $q(c_2)$  — вероятность того, что источник риска не выявлен;  $x_2$  — переменная, равная вероятности события, состоящего в безошибочности выявления работы.

Конкретное значение вычисляется по формуле

$$\begin{split} x_{2,0} = & \left(\frac{T_k}{100}\right) \cdot p_1 + \left(\frac{T_k}{200}\right) \cdot p_2 + \left(\frac{T_k}{200}\right) \cdot p_3 + \\ & + \left(1 - \frac{2T_k}{100}\right) \cdot p_4 = x_2, \end{split}$$

где  $T_k$  — процент текучести кадров в профессии подразделения в год с номером k;  $p_1$  —  $p_4$  назначаются согласно теории ошибок человека оператора [14,15];  $p_1$  =  $5\cdot 10^{-2}$  (вероятность ошибки работника со стажем менее 1-го года);  $p_2$  =  $10^{-2}$  (вероятность ошибки работника со стажем менее 2-х лет, но более 1-го года);  $p_3$  =  $10^{-3}$  (вероятность ошибки работника со стажем менее 3-х лет, но более 2-х лет);  $p_4$  =  $10^{-4}$  (вероятность ошибки работника со стажем 3 года и более).

Предположение 3. Вероятность ошибки по причине неисправности измерительного инструмента приравниваем к количеству неисправного инструмента, нормированного к 100%.

Введение переменной, описывающей вероятность, производится по формулам

$$p(c_3) = x_3,$$

$$q(c_3) = 1 - x_3,$$

где  $c_3$  — событие, состоящее в том, что работа по выявлению произведена безошибочно;  $p(c_3)$  — вероятности события, состоящего в том, что инструмент исправен;  $q(c_3)$  — вероятность обратного события;  $x_3$  — переменная, равная вероятности события, состоящего в том, что работа по выявлению произведена безошибочно

При этом предположении рассчитываем конкретное значение  $x_3$  так:

$$x_{3,0} = \frac{M_{\rm u}}{100}$$

где  ${\rm H_{_{\scriptscriptstyle H}}}-$  процент исправного измерительного инструмента.

Вероятность выявления—невыявления отклонения ГРК контролером пути по всем причинам, определяется структурой дерева на рис. 3 и описывается выражениями

$$p(\mathbf{B}_{KII}) = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,$$

$$q(\mathbf{B}_{KII}) = 1 - x_1 \cdot x_2 \cdot x_3,$$
(1)

в которых в — событие, состоящее в том, что отклонение ГРК выявлено контролером пути;  $p(\mathbf{B}_{\text{кп}})$  — вероятность события, описанного выше;  $q(\mathbf{B}_{\text{кп}})$  — вероятность обратного события;  $x_1-x_3$  описаны выше.

Вторая вероятность соответствует сумме вероятностей по всем ветвям, где имеется вероятность того, что хотя бы одно из событий  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – ложь.

Из опыта практического применения известно, что вероятность пропуска отклонения ГРК по причине неисправного инструмента зависит от квалификации контролера пути, что может быть учтено при расчете уменьшения влияния величины  $x_3$  на результат, смещением этой величины к 1, т. е. переназначением:

$$1-x_{3H} = \frac{1-x_3}{10}$$
, откуда  $x_{3H} = 0.9 + \frac{x_3}{10}$ ,

где  $x_{3H}$  — переназначенное значение  $x_3$ .

Последнее выражение используется в расчете, а в дальнейшем может быть уточнено решением обратной задачи при использовании контрольных значений.

Оценим вероятность ошибки оператора вагона-путеизмерителя.

Предположение 4. Вероятность выполнения объема контроля – величина, определяющая вероятность пропуска источника риска.

Введение переменной, описывающей вероятность, производится по формулам

$$p(c_4) = x_4,$$

$$q(c_{\scriptscriptstyle A}) = 1 - x_{\scriptscriptstyle A},$$

в которых  $c_4$  — событие, состоящее в том, что выявлен источник риска при его появлении, за счет того, что источник находится в обследуемой области;  $p(c_4)$  — вероятность прямого события;  $q(c_4)$  — вероятность обратного события.

Определим конкретное значение вероятности успеха—неуспеха по формуле

$$x_{4,0} = \frac{B_{\Pi}}{100}$$

где  $B_{_{\Pi}}$  – объем выполнения плана (в %).

Аналогично формируются переменные, являющиеся вероятностью событий  $c_5$  и  $c_6$ .

Событие  $c_5$  – это событие, состоящее в том, что выявлен источник риска при исправной аппаратуре; расчет конкретной вероятности успеха производится по формуле

$$X_{5,0} = K_{\text{TTII}},$$

здесь  $K_{\rm тrn}$  — коэффициент технической готовности аппаратуры путеизмерителя; событие  $c_6$  состоит в том, что квалификации оператора вагона-дефектоскопа достаточно, чтобы выявить источник риска, конкретная его вероятность рассчитывается через пока-



Рис. 4. Блок 3-го уровня (по выявляемости вагоном-путеизмерителем)

затель текучести кадров операторов вагона-путеизмерителя:

$$\begin{split} x_{6,0} = & \left(\frac{T_{\text{kob}}}{100}\right) \cdot p_1 + \left(\frac{T_{\text{kob}}}{200}\right) \cdot p_2 + \\ + & \left(\frac{T_{\text{kob}}}{200}\right) \cdot p_3 + \left(1 - \frac{2T_{\text{kob}}}{100}\right) \cdot p_4, \end{split}$$

где  $T_{\text{ков}}$  — текучесть кадров операторов вагонов-путеизмерителей;  $p_1$ — $p_4$  — коэффициенты, назначающиеся согласно теории ошибок оператора, как и выше.

Для построения вспомогательной функции целостности и риска используется ветвь дерева событий, приведенная на рис. 4.

На основании этой ветви вспомогательная функция работоспособности:

$$f(x_4, x_5, x_6) = x_4 x_5 x_6,$$

вероятность пропуска (вероятность противоположного события):

$$q(B_{\text{BII}}) = 1 - x_4 x_5 x_6, \tag{2}$$

где  $B_{_{\rm BII}}$  — событие, состоящее в том, что источник риска выявлен вагоном-путеизмерителем.

Аналогично строятся: оценка вероятности ошибки оператора путеизмерительной тележки:

$$q(B_{_{\Pi H}}) = 1 - x_{_{T}} x_{_{8}} x_{_{9}} \tag{3}$$

и оценка вероятности невыявления ревизорским аппаратом:

$$q(B_{pa}) = 1 - x_{10}x_{11}, (4)$$

здесь  $B_{\rm nu}$  — событие, состоящее в том, что источник риска выявлен путеизмерительной тележкой;  $B_{\rm pa}$  — событие, состоящее в том, что источник риска выявлен ревизорским аппаратом.

Все участвующие параметры сведем в таблицу, а итоговый вид функции вероятности невыявления на основе (1)–(4) представим в виде

$$f_{1}(x_{1}, x_{2}, x_{3}, ... x_{11}) =$$

$$= (1 - x_{1}x_{2}x_{3}) (1 - x_{4}x_{5}x_{6}) \times (1 - x_{7}x_{8}x_{9}) \cdot (1 - x_{10}x_{11}).$$
(5)

Вероятность схода на участке по причине невыявления отклонения ГРК 3-й и 4-й степени

$$p_1 = \lambda_1 \cdot f_1(x_{10}, x_{20}, x_{30}, \dots x_{110}),$$
 (6)

где  $\lambda$  — интенсивность проявлений (генерации) первичных источников риска.

Вероятность схода для других причин (i = 2-5) формируется по аналогичной формуле

$$p_i = \lambda_i \cdot f_i(x_{i1,0}, x_{i2,0}, x_{i3,0}, \dots, x_{ik,0}).$$
 (7)

Наличие функции вероятности позволяет прогнозировать значение вероятности схо-

да по невыявлению отклонения ГРК 3-, 4-й степени, при тех или иных запланированных (прогнозируемых) изменениях статистических показателей, характеризующих факторы, влияющие на эту вероятность.

Перечень алгоритмов расчета значений переменных функции риска

Nº	Параметр	Вопрос точки ветвления	Формула пересчета в вероятность срабаты- вания уровня защиты	Обозначение в расчете*
1	Укомплектованность контролерами пути $(Y_{_{\kappa\Pi}})$	График контроля выполняется?	У <sub>кп</sub> / 100	<i>x</i> <sub>1,0</sub>
2	Исправность измерительного инструмента (И <sub>и</sub> )	Измерено верно?	И <sub>и</sub> / 100	x <sub>2,0</sub>
3	Текучесть кадров контролеров пути $(T_k)$	Квалификация соответствует?	$(T_k/100) \cdot p_1 + (T_k/200) \times $ $\times p_2 + (T_k/200) \cdot p_3 + $ $+ (1 - 2 T_k/100) \cdot p_4$	x <sub>3,0</sub>
4	Процент выполнения плана путеизмерительного вагона $(B_{\Pi})$	План путеизмери- тельного вагона выполнен?	$(B_{\rm n}) / 100$	$\mathcal{X}_{4,0}$
5	Коэффициент технической готовности оборудования вагона-путеизмерителя $(K_{_{\mathrm{TTI}}})$	Вероятность работы без сбоя оборудования вагона-путеизмерителя	$K_{_{ m TTH}}$	X <sub>5,0</sub>
6	Текучесть кадров операторов вагона путеизмерителя ( $I_{\text{ков}}$ )	Вероятность без- ошибочной работы оператора вагона- путеизмерителя	$ \begin{array}{l} (T_{_{\rm KOB}}/100) \cdot p_1 + \\ + (T_{_{\rm KOB}}/200) \cdot p_2 + \\ + (T_{_{\rm KOB}}/200) \cdot p_3 + \\ + (1 - 2 \ T_{_{\rm KOB}}/100) \cdot p_4 \end{array} $	X <sub>6,0</sub>
7	Укомплектованность операторами путеизмерительных тележек ( $\mathbf{Y}_{\text{ont}}$ )	Выполнен план путеизмерительной тележкой?	У <sub>опт</sub> / 100	x <sub>7,0</sub>
8	Коэффициент технической готовности оборудования путеизмерительной тележки $(K_{_{\mathrm{тонг}}})$	Выявлено отклонение ГРК 3-, 4-й степени оборудованием?	$K_{_{ m troint}}$	x <sub>8,0</sub>
9	Текучесть кадров операторов путеизмерительной тележки	Вероятность безоши- бочной работы опера- тора тележки	$\begin{aligned} & (T_{\text{копт}}/100) \cdot p_1 + \\ & + (T_{\text{копт}}/200) \cdot p_2 + \\ & + (T_{\text{копт}}/200) \cdot p_3 + \\ & + (1 - 2 \ T_{\text{копт}}/100) \cdot p_4 \end{aligned}$	x <sub>9,0</sub>
10	Объем выборочного контроля ревизорами (% выявл. ревиз.) $(O_{BK})$	Выявлено отклонение ГРК 3-, 4-й степени ревизорами?	O <sub>BK</sub> / 100	X <sub>10,0</sub>

<sup>\*</sup>  $x_1$ - $x_{11}$  – переменные,  $x_{1,0}$ - $x_{11,0}$  – значения переменных в данном примере.

# Формирование способа статистического контроля функции риска

Бесспорно, предложенные модели оценки вероятности, модели значимостей, сформированные таким образом, несут определенную погрешность, в ряде случаев весьма значительную. Для минимизации этой погрешности используются данные по соотношению количеств первичных источников риска и количества НБД по рассматриваемой причине, в данном случае отклонений ГРК 3-, 4-й степени. Принцип формирования таких соотношений отображен на рис. 5.

Вероятность НБД на один первичный источник риска рассчитывается, таким образом, по формуле

$$p_i = \frac{NB_i}{\lambda_i}, \tag{8}$$

где  $NB_i$  – количество НБД по причине i;  $\lambda_i$  – количество первичных источников риска данного вида; i – целый индекс (i = 1–5).

По существу величина  $P_i$  соответствует классическому определению вероятности НБД по причине одного первичного источника. Ввиду того, что оба вида параметра фиксируются в АСУ П и АС РБ железнодорожного транспорта, степень надежности таких данных является наивысшей, по сравнению с аналогичными в других отраслях. Производится корректировка значений  $x_{i,0}$  таким образом, чтобы вероятность по формулам (5)—(7) совпадала со статистической вероятностью, рассчитанной по (8). Причем для корректировки выбираются те  $x_i$ , в которых доля экспертной оценки наибольшая.

### Расчет значимостей переменных

Скорректированные таким образом значения  $x_{i,0}$  используются для расчета значимостей.

Поскольку функция вероятности представляет собой полином, где каждая переменная участвует в первой степени, то значимости по Бирнбауму [4–7] совпадают с частными производными, которые имеют вид

$$f_{x_{1}}' = -x_{2}x_{3}(1 - x_{4}x_{5}x_{6}) \times (1 - x_{7}x_{8}x_{9}) \cdot (1 - x_{10}x_{11}), \tag{9}$$

$$f_{x_2}' = -x_1 x_3 (1 - x_4 x_5 x_6) \times (1 - x_7 x_8 x_9) \cdot (1 - x_{10} x_{11}), \tag{10}$$

$$f_{x_3}' = -x_1 x_2 (1 - x_4 x_5 x_6) \times (1 - x_7 x_8 x_9) \cdot (1 - x_{10} x_{11}), \tag{11}$$

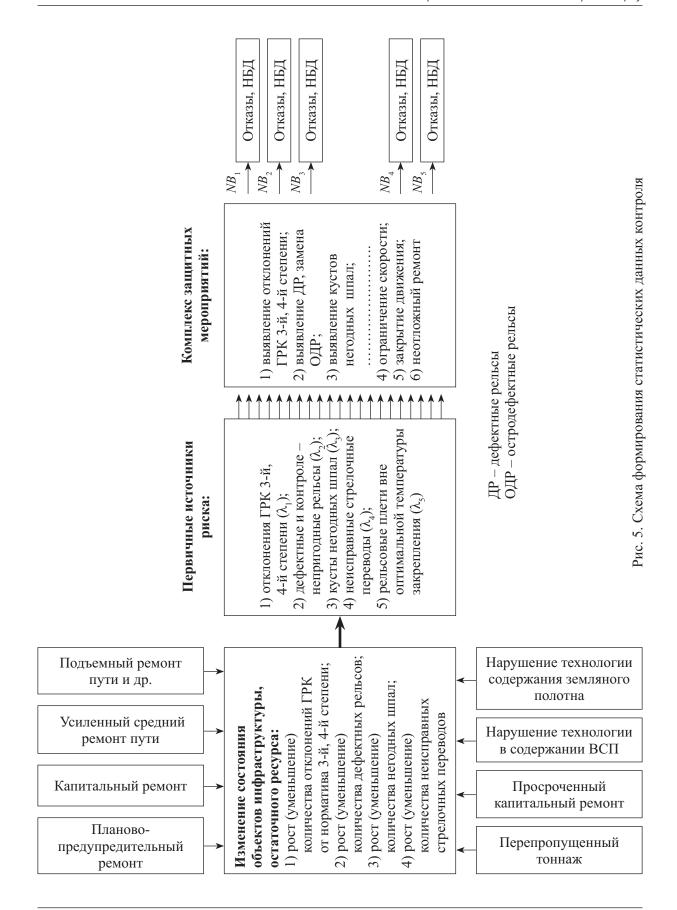
$$f_{x_{11}}' = -x_{10} (1 - x_1 x_2 x_3) \times (1 - x_4 x_5 x_6) \cdot (1 - x_7 x_8 x_9).$$
 (12)

Значимости, рассчитанные на основе (9)— (12) позволяют выделить именно те факторы, изменение которых в наибольшей степени влияет на функцию риска, и, следовательно, позволяют выбрать наиболее эффективные корректирующие воздействия на факторы, определяющие существенное уменьшение риска.

### Апробация

Рассмотренный подход апробирован на участках скоростного движения Октябрьской железной дороги.

Наличие дополнительных ограничений на переменные, задаваемых формулой (8), позволяет решать обратную задачу: уточнить значения переменных (вероятностей), определяющих состояние «человеческого фактора», участвующих в формировании функции целостности и риска. Такая возможность появляется при задании всех прочих переменных, менее связанных с методом экспертных оценок и поэтому более четко определенных. Эти параметры традиционно относятся к наиболее трудно оцениваемым.



### Заключение

Предложенный гибридный метод прогнозирования интенсивности НБД поездов основан на одновременном использовании ОЛВМ моделирования интенсивности нарушений безопасности и статистических данных различного уровня по состояниям инфраструктуры, безопасности движения, «человеческого фактора» и интенсивностью действия опасных природных факторов. Метод апробирован для оценки вероятности НБД по ответственности инфраструктуры на скоростном участке железной дороги «Москва-Санкт-Петербург» для комплекса ключевых факторов риска. Использование метода позволяет уточнить значения переменных (вероятностей), участвующих в формировании функции целостности и риска, и прогнозировать интенсивность нарушений и возможные места их возникновения для своевременного принятия корректирующих мероприятий.

## Библиографический список

- 1. Методика идентификации рисков в области функциональной безопасности движения поездов на инфраструктуре ОАО «РЖД» для управлений пути и сооружений, автоматики и телемеханики, электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД» (техн. номер в ЕАСД 28.03.3366).
- 2. Методика нормирования и оценки риска транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушениями правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. М.: ОАО «РЖД», 2016. 60 с.
- 3. Методика оценки рисков в области функциональной безопасности движения на инфраструктуре OAO «РЖД». М.: OAO «РЖД», 2016. 72 с.
- 4. Рябинин И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкасов. М.: Радио и связь, 1981. 248 с.
- 5. Можаев А. С. Современное состояние и некоторые направления логико-вероятностных мето-

- дов анализа систем. Ч. І / А. С. Можаев // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып. 1 / под ред. И. А. Рябинина. Препринт 101.— СПб. : ИПМАШ РАН,1994.— С. 23—53.
- 6. Можаев А.С. Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем / А.С. Можаев. Л.: ВМА им. Гречко, 2000. 68 с.
- 7. Можаев А. С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001) / А. С. Можаев // Труды Междунар. науч. школы «Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах». СПб. : Изд-во ООО «НПО "Омега"», 2001. С. 56—61.
- 8. Можаев А. С. Теоретические основы опыта применения и направления развития общего логиковероятностного метода и программного комплекса «Арбитр» моделирования надежности, живучести, безопасности и риска систем / А. С. Можаев // Науч. семинар НТЦ ПБ «Анализ безопасности и оценка техногенного риска в исследованиях российских ученых». М.: ОАО «СПИК СЗМА», 2009.—54 с.
- 9. Методические рекомендации по оценке рисков на железнодорожной инфраструктуре. М.: ОАО «РЖД», 2011. 104 с.
- 10. Замышляев А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим состоянием инфраструктуры железнодорожного транспорта: дис... докт. техн. наук: 05.13.06 / А.М. Замышляев. М.: Моск. гос. ун-т путей сообщения (МГУПС (МИИТ)), 2013. 340 с.
- 11. ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2011. 34 с.
- 12. ГОСТ Р МЭК 62502–2014. Менеджмент риска. Анализ дерева событий. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015. 30 с.
- 13. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения. М., 2013, взамен ЦП № 515.

- 14. Хинцен А. Влияние человеческого фактора на безопасность на железной дороге : дис. ... докт. техн. наук / А. Хинцен. Германия, Рейн-Вестфалия, 1993. 450 с.
- 15. Котик М. А. Природа ошибок человека-оператора на примерах управления человека-оператора / М. А. Котик, А. М. Емельянов. М. : Транспорт, 1993. 243 с.

### References

- 1. Metodyka identifikatsii riskov v oblasty funktsionalnoy bezopasnosty dvyzheniya poyezdov na infrastructure OAO "RZhD" dlya upravleniy puty i
  sooruzheniy, avtomatyky i telemekhanyky, elektryfykatsii i elektrosnabzheniya Tsentralnoy dyrektsii infrastrutury filiala OAO "RZhD" (tekhn. nomer v
  YASD 28.03.3366) [Risk identification technique in
  the sphere of functional safety of train operation on
  OAO "Russian Railways" infrastructure for track and
  facilities management, automatics and telemechanics,
  motorization and power supply of the Central offices
  of the infrastructure OAO Russian Railways subsidiary (tech. number in YASD (Unified computer-aided
  workflow system 28.03.3366))]. (In Russian)
- 2. Metodyka normyrovaniya i otsenky ryska transportnykh proisshestviy i inykh sobytiy, svyazannykh s narusheniyamy pravyl bezopasnosty dvyzheniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta [The method of regulation and risk assessment of traffic accidents and other incidents, connected with violation of traffic safety rules and railway transport operation]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2016, 60 p. (In Russian)
- 3. Metodyka otsenky riskov v oblasty funktsionalnoy bezopasnosty dvyzheniya na infrastructure OAO "RZhD" [Risk assessment technique in the sphere of functional safety of traffic on OAO "RZhD" railway transport]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2016, 72 p. (In Russian)
- 4. Ryabynyn I.A. & Cherkasov G. N. Logyko-ve-royatnostniye metody issledovaniya nadezhnosty strukturno-slozhnykh system [Logical-and-probabilistic research methods of reliability of structural-complicated systems]. Moscow, Radio and Communication Publ., 1981, 248 p. (In Russian)

- 5. Mozhayev A. S. Sovremennoye sostoyaniye i nekotoriye napravleniya logyko-veroyatnostnykh metodov analyza system [The current state and some prospects of logical-and-probabilistic analysis methods of systems]. Pt 1. Teoriya i informatsionnaya tekhnologiya modelyrovaniya bezopasnosty slozhnykh system [Theory and information technology of safety simulation of complex systems]; ed. by I.A. Ryabynyn. Preprint 101. Saint Petersburg, IPMASh RAN, 1994, vol. 1, pp. 23–53. (In Russian)
- 6. Mozhayev A. S. *Obshiy logyko-veroyatnostniy metod analyza nadezhnosty slozhnykh system* [*The universal logical-and-probabilistic method of complex systems security analysis*]. Leningrad, Grechko Naval Academy Publ., 2000, 68 p. (In Russian)
- 7. Mozhayev A. S. Programmniy kompleks avtomatyzyrovannogo strukturno-logycheskogo modelyrovaniya slozhnykh system (PK ASM 2001) [Automated structural and logical simulation solution for complex systems (PK ASM 2001)]. Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly "Modelyrovaniye i analyz bezopasnosty, ryska i kachestva v slozhnykh systemakh" [Proceedings of the International scientific school "Simulation and analysis of security, risk and quality in complex systems"]. Saint Petersburg, OOO "NPO "Omega"" Publ., 2001, pp. 56–61. (In Russian)
- 8. Mozhayev A. S. Teoretycheskiye osnovy opyt prymeneniya i napravleniya razvitiya obshego logykoveroyatnostnogo metoda i programmnogo kompleksa "Arbytr" modelyrovaniya nadezhnosty, zhyvuchesty, bezopasnosty i ryska system [Theoretical foundations, experience in application and development directions of the universal logical-and-probabilistic method and "Arbytr" software solution designed for the simulation of reliability, liveness, security and risk of systems]. Nauchniy seminar NTTs PB "Analyz bezopasnosty i otsenky tekhnogennogo ryska v issledovaniyakh rossiyskykh uchenykh" [Scientific workshop Scientific-Research Center on Industrial Safety "Security analysis and assessment of technology-related risk in the studies of the Russian scientists"]. Moscow, JSC "Specialized Engineering Company SZMA (SEVZAP-MONTAGEAUTOMATIKA)" Publ., 2009, 54 p. (In Russian)
- 9. Metodycheskiye rekomendatsii po otsenke ryskov na zheleznodorozhnoy infrastructure [Guidelines on risk assessment on railway infrastructure]. Moscow,

OAO "Russian Railways" Publ., 2011, 104 p. (In Russian)

- 10. Zamyshlyayev A. M. Avtomatyzatsiya protsessov kompleksnogo upravleniya tekhnicheskym sostoyaniyem infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [Automation of processes of technical state integrated management]: diss... D. Sci. Eng.: 05.13.06. Moscow, Moscow State Transport University (MGUPS (MIIT)) Publ., 2013, 340 p. (In Russian)
- 11. GOST R 54505–2011. Bezopasnost funktsionalnaya. Upravleniye riskamy na zheleznodorozhnom transporte [State Standard R 54505–2011. Functional safety. Management of risks on railway transport]. Moscow, Federal agency for technical regulation and metrology Publ., 2011, 34 p. (In Russian)
- 12. GOST R MEK 62502–2014. Menedzhment riska. Analyz dereva sobytiy [State Standard R International Electrotechnical Commission 62502–2014. Risk management. Event tree analysis]. Moscow, Federal

- agency for technical regulation and metrology Publ., 2015, 30 p. (In Russian)
- 13. Instruktsiya po otsenke sostoyaniya relsovoy kolei puteizmerytelnymy sredstvamy i meram po obespecheniyu bezopasnosty dvyzheniya [Instruction on state estimation of the track by means of track measuring facilities and traffic safety measures]. Moscow, 2013, replacing TsP (Tracks department) no. 515. (In Russian)
- 14. Khyntsen A. Vliyaniye chelovecheskogo faktora na bezopasnost na zheleznoy doroge [The influence of the human factor on railroad safety]: diss... D. Sci. Eng. Germany, Rein-Westphalia, 1993, 450 p. (In Russian)
- 15. Kotyk M.A. & Yemelyanov A. M. *Pryroda oshybok cheloveka operatora na prymerakh upravleniya cheloveka-operatora* [*The nature of human operator's errors via the examples of human-operator control*]. Moscow, Transport Publ., 1993, 243 p. (In Russian)

ВЕРЕВКИНА Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, ov18111966@mail.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения).

УДК 621.833.15

# А. А. Воробьев, Д. Е. Керенцев, И. В. Федоров

# ИСПЫТАНИЯ КОЛЕСНЫХ СТАЛЕЙ НА ИЗНОС И КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

### Аннотация

**Цель:** Экспериментальное определение характеристик сопротивления колесных сталей контактной усталости и абразивному изнашиванию с использованием малогабаритных образцов. **Методы:** Для разработки методики испытаний применялись аналитические методы расчета, основанные на теории Герца и теории размерностей. Для реализации экспериментального метода использовались серийно выпускаемая машина трения ИИ5018 и малогабаритные образцы, изготовленные из исследуемых колесных сталей. **Результаты:** Определены характеристики сопротивления колесных сталей контактной усталости и абразивному изнашиванию. **Практическая значимость:** Определеные в результате испытания характеристики колесных сталей используются для создания методики прогнозирования ресурса колес грузовых и пассажирских вагонов.

**Ключевые слова:** Колесо вагона, колесная сталь, контактная усталость, абразивное изнашивание, модель Арчарда, методика испытаний, малогабаритные образцы, теория размерностей.

\*Aleksander A. Vorobiyev, Cand. Sci. Eng., associate professor, 89219751198@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Dmytriy E. Kerentsev**, Cand. Sci. Eng., chief specialist in wheel design, kerentsev@bk.ru (Central Management Laboratory Engineering and Technical Center AO "Vyska Steel Works"); **Igor V. Fedorov**, senior lecturer, Fedorov281973@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) WEAR AND CONTACT FATIGUE TESTING OF WHEEL STEEL

### **Summary**

**Objective:** To experimentally determine the characteristics of wheel steel resistance to contact fatigue and abrasion wear by applying miniature samples. **Methods:** Analytical calculations, based on Hertz theory and the theory of dimensions, were applied in the development of a testing technique. II 5018 friction machine and miniature samples, produced from the wheel steel under test, were used in order to realize the experimental method in question. **Results:** The characteristics of wheel steel resistance to contact fatigue and abrasion wear were determined. **Practical importance:** The obtained wheel steel characteristics are applied in the process of creating the wheel life forecasting technique for freight and passenger cars.

**Keywords:** Car wheel, wheel steel, contact fatigue, abrasion wear, Archard's model, testing technique, miniature samples, dimension theory.

Железнодорожные колеса являются одними из ответственных элементов вагона. Они работают в сложных условиях нагружения, которые характеризуются вращением колесной пары при постоянно изменявшихся вертикальных, продольных и поперечных нагруз-

ках [1]. В точках контакта колеса и рельса возникают как вертикальные, так и продольные и поперечные силы, вызванные скольжением колеса по рельсу [2].

Скольжение колеса относительно рельса вызывает износ поверхности катания колеса.

Высокие вертикальные нагрузки приводят к накоплению под поверхностью катания колеса (на глубине 4–6 мм) усталостных повреждений, приводящих к возникновению развивающихся, как правило, в направлении поверхности катания трещин с последующим образованием отколов металла, называемых выщербинами. Поэтому колесные стали должны обладать значительной стойкостью при изнашивании и высокой контактно-усталостной прочностью.

Для определения характеристик сопротивления изнашиванию и контактно-усталостным повреждениям были проведены обследования малогабаритных образцов (роликов), изготовленных из сталей 2, Л и Т по ГОСТ 10791–2011 [3] с использованием машины для испытания материалов на трение и износ ИИ 5018 [4].

Испытания малогабаритных образцов значительно дешевле и проще, чем натурных колес, позволяют значительно ускорить процесс получения необходимых данных и не требуют разработки специального оборудования и применения крупногабаритных и энергоемких стендов (используется серийно выпускаемая машина трения ИИ 5018) [5].

Испытания проводились по схеме «роликролик», показанной на рис. 1. Модельные ролики при испытаниях контактируют с контрроликами, твердость которых соответствует твердости абразивных частиц, осуществляющих резание и пластическое разрыхление материала колеса при качении по рельсу. Модельные ролики выполнены из испытуемых

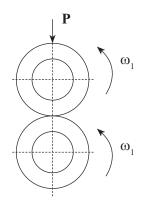


Рис. 1. Схема контакта роликов при испытаниях

колесных сталей, контр-ролики — из твердого сплава ВК-8 ГОСТ 3882—74 [6] (такой режим при испытаниях на абразивное изнашивание предусматривается ГОСТ 23.225—99 [7]). Машина трения ИИ 5018 показана на рис. 2.

ГОСТ 30480–97 [8] устанавливает, что малогабаритные образцы трибосопряжения могут использоваться при условии воспроизведения заданного процесса изнашивания, температурно-силовых полей такой же интенсивности, как в натурных трибосопряжениях. Испытаниям должно предшествовать определение масштабных коэффициентов перехода от малогабаритных образцов (физической модели) к натурным образцам элементов трибосопряжения. В результате таких испытаний, согласно ГОСТ 30480–97 [8], получают фрикционно-износные характеристики пары трения в заданных условиях.

В соответствии с требованиями ГОСТ 30480–97 [8], ГОСТ 33788–2016 [9] и Р 50-54-30–87 [10] специалистами кафедры «Технология металлов» ПГУПС были разработаны программа и методика испытаний малогабаритных образцов на износ и контактную усталость. Испытания проводились лабораторией нестандартных механических испытаний ЦИЛ ИТЦ АО «ВМЗ» с использованием машины трения ИИ 5018, обработку результатов осуществляли на кафедре «Технология металлов» ПГУПС. Ролики и контр-ролики, необходимые для проведения испытаний, изготавливались АО «ВМЗ».

При разработке программы и методики испытаний принималось, что износ в системе «колесо-рельс» описывается моделью Арчарда, несмотря на то, что ГОСТ 23.225–99 [7] в качестве основной расчетной модели, с помощью которой производится оценка износов деталей и узлов, устанавливает модель «фрикционной усталости», разработанную школой И.В. Крагельского (см. [5]). Модель Арчарда, благодаря своей простоте и минимальному количеству экспериментально определяемых параметров, сохраняет свою актуальность и успешно применяется для оценки износов поверхности катания колес [11–13].

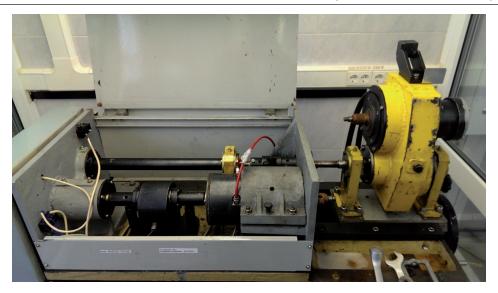


Рис. 2. Машина трения ИИ 5018

Согласно модели Арчарда, износ прямо пропорционален работе сил трения. Массовый износ I по этой модели рассчитывается по формуле

$$I = k \cdot A$$
.

$$k = \begin{cases} k_1, \ p / s < Q_0, \\ k_{21}, \ p / s \ge Q_0, \end{cases}$$

где k — коэффициент массового износа (мг/Дж);  $k_1$  — коэффициент массового износа для стадии слабого износа (мг/Дж);  $k_2$  — коэффициент массового износа для стадии сильного износа (мг/Дж); p — мощность сил трения в пятне контакта колесо—рельс, которую получают по результатам математического моделирования системы «вагон—путь» [11, 13] (МВт); s — площадь пятна контакта, устанавливаемая по результатам математического моделирования системы «вагон—путь» [11, 13], (м²);  $Q_0$  — пороговое значение удельной мощности, определяющей переход от стадии слабого износа к стадии сильного износа (7 МВт/м²) [11, 13]; A — работа сил трения (Дж).

Коэффициент массового износа k находили для каждой марки стали отдельно и для каждой стадии износа для поверхности катания колеса и гребня по результатам испытаний пяти роликов.

При моделировании износа по поверхности катания используется цилиндрический контр-ролик (показан на рис. 3, a), при моделировании износа гребня - тороидный контрролик (показан на рис. 3,  $\delta$ ). Размеры испытываемых цилиндрических роликов, изготавливаемых из колесных сталей, соответствуют размерам цилиндрического контр-ролика. Использование тороидного контр-ролика позволяет смоделировать при испытаниях высокие контактные напряжения, которые, как показывают результаты численного моделирования [11], имеют место в контакте гребень колеса головка рельса, практически не увеличивая силу прижатия роликов при испытаниях, что дает возможность применять установку ИИ 5018 без модификации.

Таким образом, для каждой марки испытываемой колесной стали изготавливалось 15 роликов, для моделирования трения: 5 — по поверхности катания для стадии сильного износа, 5 — по гребню для стадии сильного износа и 5 — по поверхности катания для стадии слабого износа.

Для определения критериев (чисел) подобия, позволяющих установить масштабные коэффициенты перехода от параметров системы «ролик–контр-ролик» к параметрам системы «колесо–рельс», при моделировании абразивного изнашивания воспользуемся теорией

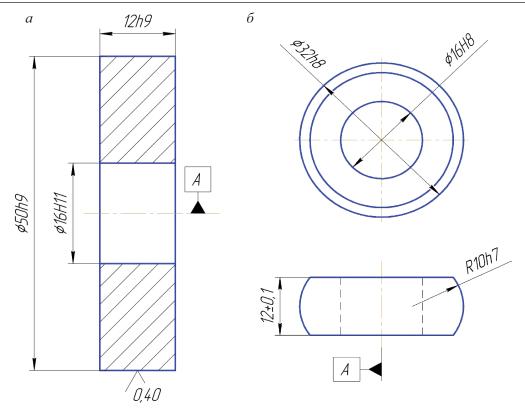


Рис. 3. Размеры цилиндрического (a) и тороидного ( $\delta$ ) контр-роликов

размерностей [5, 14]. Для этого представим массовый износ в виде функции от следующих параметров:

$$I = \Phi(HB, E, \rho, u, q_{\max}, n, \varepsilon, f),$$

где HB — твердость поверхности (МПа); E — модуль упругости материала (МПа);  $\rho$  — плотность материала (кг/м³); u — скорость скольжения (м/с);  $q_{\rm max}$  — максимальное контактное давление (МПа); n,  $\epsilon$ , f — безразмерные величины: n — число оборотов;  $\epsilon$  — характеристика проскальзывания (крип), f — коэффициент трения в контакте.

В процессе испытаний контролируется температура поверхности ролика, которая не должна превышать 200 °С. При 200 °С характеристики материала практически не изменяются. Поэтому теплотехнические характеристики при определении критериев подобия не учитываются. Шероховатости поверхностей ролика и контр-ролика соответствуют шероховатостям в системе колеса

и рельса, твердость контр-ролика – твердости абразивных частиц, изнашивающих поверхность катания колеса.

В базовой системе размерностей физических величин L дается в метрах, M – в килограммах, T – в секундах.

Для рассматриваемой системы можно получить 5 критериев (чисел) подобия. Система, определяемая с использованием критериев (чисел) подобия, согласно  $\pi$ -теореме [5, 14], будет записываться в следующем виде:

$$I = \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5),$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$  – безразмерные критерии (числа) подобия:

$$\Pi_1 = f, \tag{1}$$

$$\Pi_2 = \frac{q_{\text{max}}}{HB},\tag{2}$$

$$\Pi_3 = \frac{q_{\text{max}}}{\rho \cdot u^2},\tag{3}$$

$$\Pi_4 = \frac{\rho \cdot u^2}{F},\tag{4}$$

$$\Pi_5 = n \cdot \varepsilon \,. \tag{5}$$

Критерий (число) подобия  $\Pi_1$  представляет собой коэффициент трения. Критерий (число) подобия  $\Pi_2$  — число подобия (безразмерная площадь контакта), которое использовал И. В. Крагельский [15]. Критерий (число) подобия  $\Pi_3$  — число подобия Ньютона. Критерий (число) подобия  $\Pi_4$  — число подобия Гука. Критерий (число) подобия  $\Pi_5$  можно рассматривать как вариант записи числа подобия Струхаля.

Таким образом, для расчета параметров системы «ролик—контр-ролик», эквивалентных параметрам системы «колесо—рельс», используются хорошо известные критерии (числа) подобия. Так, у подобных явлений критерии (числа) подобия равны, потому приравняем критерии (числа) подобия, определяемые формулами (1)—(5) для колеса и модельного ролика.

Так как твердость, плотность и модуль упругости у колеса и ролика совпадают, то получим условия подобия для колеса и ролика:

$$q_{\max k} = q_{\max p},\tag{6}$$

$$f_k = f_p, (7$$

$$u_k = u_p, \tag{8}$$

$$n_k \cdot \varepsilon_k = n_p \cdot \varepsilon_p,$$
 (9)

в которых индекс k относится к параметрам колеса, индекс p – к параметрам ролика.

Таким образом, для обеспечения подобия системы «колесо-рельс» и системы «ролик-контр-ролик» максимальные контактные давления, коэффициенты трения и скорости скольжения должны совпадать.

Скорость скольжения u в системе «колесорельс» определяется по результатам математического моделирования системы «вагонпуть» [11, 13] по формуле

$$u = V \cdot \varepsilon$$
,

где V – скорость движения вагона (м/c).

При выполнении условий, определяемых формулами (6)–(9), у систем «колесо–рельс» и «ролик–контр-ролик» будут совпадать значения удельной мощности сил трения в пятне контакта.

При испытаниях по оценке износостойкости колесных сталей при абразивном изнашивании для стадии сильного износа контр-ролик устанавливается неподвижно, а ролики из колесных сталей вращаются, при этом скорость проскальзывания в системе «ролик—контр-ролик» соответствует скорости проскальзывания в системе «колесо—рельс».

При моделировании стадии слабого износа контр-ролик вращается со скоростью, равной 0,9 от скорости ролика (величина удельной мощности сил трения в пятне контакта при этих испытаниях составляет 2–3 МВт/м², что меньше порогового значения перехода от стадии слабого износа к сильному 7 МВт/м² [17]).

Сила прижатия ролика к контр-ролику определялась из условия (6). Для расчета контактных напряжений использовалась теория Герца [10, 16]. Напряжения в системе «колесо–рельс» рассчитывались по результатам численного моделирования системы «вагон–путь» [11, 13].

При испытаниях с помощью средств установки ИИ 5018 фиксировались момент сил трения в системе «ролик–контр-ролик» и число оборотов ролика. Перед началом испытаний ролик взвешивался с точностью до сотых долей грамма. После окончания испытаний ролик также взвешивался, и по этим данным производился расчет коэффициента массового износа в модели Арчарда K (в мг/Дж) по формуле

$$K = \frac{(m_H - m_K) \cdot 10^3}{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n},$$

где  $m_H$  — начальная масса ролика (г);  $m_K$  — конечная масса ролика, (г); M — среднее зна-

чение момента сил трения в процессе испытаний ( $\mathbf{h}\cdot\mathbf{m}$ ); n — число оборотов ролика от начала испытаний.

Коэффициент K определяется для каждого испытуемого ролика, окончательное значение коэффициента K принимается как среднее по всем роликам, изготовленным из данной марки колесной стали.

При испытаниях на контактную усталость ролик и контр-ролик вращаются с одинаковой скоростью без проскальзывания до возникновения контактно-усталостного повреждения на поверхности ролика. Испытания проводятся при пяти значениях вертикальной нагрузки для каждой марки стали. Для каждой нагрузки испытываются минимум два ролика. Таким образом, для каждой марки стали испытываются минимум 10 роликов.

При испытаниях, согласно P50-54-30–87 [10], расчетным путем (по заданной вертикальной нагрузке), определяются максимальные нормальные напряжения в пятне контакта (максимальное контактное давление)  $\sigma_{zmax}$  и число циклов нагружения (число оборотов ролика), при котором на поверхности ролика

возникают контактно-усталостные повреждения.

Нагрузка на ролик равномерно распределяется в диапазоне от соответствующей 1,1 от ожидаемого предела контактной выносливости до отвечающей 0,9 от предела текучести материала.

Основными критериями разрушения при установлении пределов контактной выносливости и построения кривых контактной усталости, согласно P50-54-30-87 [10], являются наличие на контактной поверхности ролика нескольких ямок выкрашивания или единичного выкрашивания диаметром, превышающим 50% малой полуоси пятна контакта.

Базовое число циклов  $N_0$  принималось в соответствии с ГОСТ 4835–2013 [18]  $2\cdot10^7$  циклов. Результаты испытаний на контактную усталость обрабатывались в соответствии с п. 9.5.2 ГОСТ 33788–2016 [9].

Коэффициенты массового износа, полученные в процессе испытаний, приведены на рис. 4, a–a, результаты испытания на контактную усталость — в таблице.

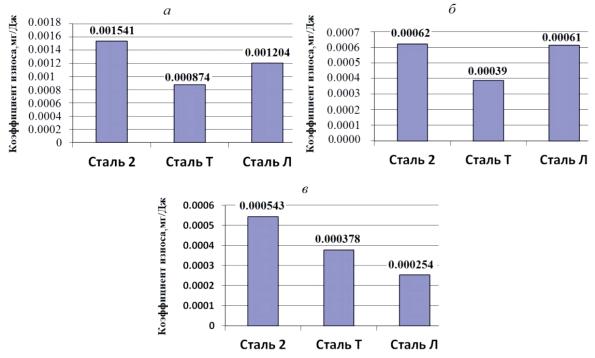


Рис. 4. Коэффициент массового износа для стадии сильного  $(a, \delta)$  и слабого износа (s): a – для гребня колеса,  $\delta$  – для поверхности катания колеса

- 1					
	Марка	Максимальное контактное давление, соответствующее среднему значению предела выносливости, $\sigma_{zmax}^{cp}$ , МПа	Максимальное контактное давление, соответствующее пределу выносливости, при односторонней доверительной вероятности, равной 0,95 $\sigma_{zmax}$ , МПа	Показатель степени в уравнении кривой выносливости, <i>m</i>	Коэффициент линейной корреляции
	2	511	398	6	0,94
	T	494	382	6	0,787
	Л	581	440	8	0,725

Результаты испытания образцов на контактную усталость

Из полученных результатов можно сделать следующий вывод: сталь Т отличается от стали 2 меньшим значением коэффициента массового износа и незначительно уступает этой стали по параметрам контактной усталости. Наилучшее сопротивление контактной усталости у стали Л, она также превосходит сталь 2 по параметрам износа гребня.

# Библиографический список

- 1. Лукин В. В. Конструирование и расчет вагонов: учебник / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, В. В. Кобищанов. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. 688 с.
- 2. Сакало В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В.И. Сакало, В.С. Коссов. М.: Машиностроение, 2004. 496 с.
- 3. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатанные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 53 с.
- 4. Гб 2.779.033 ПС. Машина для испытания материалов на трение и износ ИИ 5018. Паспорт. Иваново : Ивановское ОАО «ТОЧПРИБОР», 2010. 27 с
- 5. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
- 6. ГОСТ 3882–74. Сплавы твердые спеченные. Марки. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.

- 7. ГОСТ 23.225–99. Обеспечение износостойкости изделий. Методы подтверждения износостойкости. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2005. 157 с.
- 8. ГОСТ 30480–97. Обеспечение износостой-кости изделий. Методы испытаний на износостой-кость. Общие требования. М.: Стандартинформ, 1998. 12 с.
- 9. ГОСТ 33788–2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. М.: Стандартинформ, 2016. 46 с.
- 10. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. Рекомендации. Р50-54-30–87. М.: Стандартинформ, 1998. 65 с.
- 11. Орлова А. М. Определение методами математического моделирования движения грузового и пассажирского вагона: размера пятна контакта колеса и рельса, давления в пятне контакта (напряжения под поверхностью колеса), сил крипа, мощностей сил крипа, с учетом осевой нагрузки, скорости движения, износа профиля колеса (для профиля ГОСТ 10791) в паре с рельсами Р65: отчет по теме 80. Ч. 3 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. СПб.: ПГУПС, 2014. 75 с.
- 12. Орлова А. М. Определение методами математического моделирования параметров взаимодействия роликов стенда с учетом сил прижатия, скоростей вращения, формы профиля роликов: отчет по теме 80. Ч. 4 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев. СПб.: ПГУПС, 2014.—39 с.

- 13. Орлова А. М. Определение методами математического моделирования движения грузового и пассажирского вагона: размера пятна контакта колеса и рельса, давления в пятне контакта (напряжения под поверхностью колеса), сил крипа, мощностей сил крипа, с учетом осевой нагрузки, скорости движения, износа профиля колеса (для профиля ГОСТ 10791) в паре с рельсами Р65: отчет по теме 80. Ч. 5 / А. М. Орлова, А. А. Воробьев.—СПб.: ПГУПС, 2014.—34 с.
- 14. Седов Л. И. Механика сплошной среды : в 2 т. / Л. И. Седов. М. : Наука, 1970. Т. 1. 492 с. ; Т. 2. 568 с.
- 15. Фролов К. В. Конструирование машин : в 2 т. / К. В. Фролов. М. : Машиностроение, 1994. Т. 1.-528 с.
- 16. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп. / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. М. : Машиностроение, 1979. 702 с.
- 17. Саидова А.В. Совершенствование прогнозирования износа профилей колес грузовых вагонов : дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Саидова. СПб. : ПГУПС, 2013. 121 с.
- 18. ГОСТ 4835–2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014. 32 с.

### References

- 1. Lukyn V. V., Anysymov P. S., Korturanov V. N., Khokhlov A. A. & Kobyshanov V. V. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [*Development and computing of cars*]. Moscow, Learning and teaching educational center of railway transport Publ., 2011, 688 p. (In Russian)
- 2. Sakalo V.I. & Kossov V.S. *Kontaktniye zadachy zheleznodorozhnogo transporta* [Contact problems of railway transport]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2004, 496 p. (In Russian)
- 3. GOST 10791–2011. Kolesa tselnokanatniye. tekhnicheskiye usloviya [State Standard 10791–2011. Solidrolled wheels. Technical regulations]. Moscow, Standartinform Publ., 2012, 53 p. (In Russian)
- 4. Gb 2.779.033 PS. Mashyna dlya ispytaniya materialov na treniye i iznos II 5018. Pasport [Gb 2.779.033

- RS II 5018. Materials testing machine on friction and wear. Passport]. Ivanovo, Ivanovsky OAO "Tochprybor" Publ., 2010, 27 p. (In Russian)
- 5. Chychynadze A. V. *Treniye, iznos i smazka* [*Friction, wear and antifriction*]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 2003, 576 p. (In Russian)
- 6. GOST 3882–74. Splavy tverdiye spechenniye. Marky [State Standard 3882–74. Hard sintered alloys. Alloy grade]. Moscow, Standartinform Publ., 2008, 10 p. (In Russian)
- 7. GOST 23.225–99. Obespecheniye iznosostoykosty izdeliy. Metody podtverzhdeniya iznosostoykosty. Obshiye trebovaniya [State Standard 23.225–99. Provision of product wearing resistance. Acknowledgement strategies of wear resistance. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 157 p. (In Russian)
- 8. GOST 30480–97. Obespecheniye iznosostoykosty izdeliy. Metody ispytaniy na iznosostoykost. Obshiye trebovaniya [State Standard 30480–97. Provision of product wearing resistance. Testing methods on wearing resistance. General requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 1998, 12 p. (In Russian)
- 9. GOST 33788–2016. Vagony gruzoviye i passazhyrskiye. Metody ispytaniy na prochnost i dynamycheskiye kachestva [State Standard 33788–2016. Freight and passenger cars. Testing methods on serviceability and dynamic quality]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 46 p. (In Russian)
- 10. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody ispytaniy na kontaktnuyu ustalost. Rekomendatsii. R 50-54-30-87 [Calculations and durability tests. Testing methods on contact fatigue. Recommendations. R 50-54-30-87]. Moscow, Standartinform Publ., 1998, 65 p. (In Russian)
- 11. Orlova A. M. & Vorobiyev A. A. Opredeleniye metodamy matematycheskogo modelyrovaniya dvyzheniya gruzovogo i passazhyrskogo vagona: razmera pyatna kontakta kolesa i relsa, davleniya v pyatne kontakta (napryazheniya pod poverkhnostyu kolesa), syl krypa, moshnostey syl krypa, s uchetom osevoy nagruzky, skorosty dvyzheniya, iznosa profilya kolesa (dlya profilya GOST 10791) v pare s relsamy R65 [Mathematical model methods for the determination of freight and passenger cars operation: the size of a wheel and a rail contact spot, the pressure in a contact spot (the stress beneath the surface of a wheel),

creep forces, the power of creep forces, with allowance for axial load, running speed, wheel profile wear (for SS 10791 wheel profile) together with R65 rails]. Otchet po teme 80 [Report on subject 80]. Pt. 3. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 75 p. (In Russian)

- 12. Orlova A.M. & Vorobiyev A.A. Opredeleniye metodamy matematycheskogo modelyrovaniya parametrov vzaimodeystviya rolykov stenda s uchetom syl pryzhatiya, skorostey vrasheniya, formy profilya rolykov [Mathematical model methods for the determination of roll interaction parameters with allowance for pressing forces, rotation velocity, roll profile shape]. Otchet po teme [Report on subject 80]. Pt 4. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 39 p. (In Russian)
- 13. Orlova A. M. & Vorobiyev A. A. Opredeleniye metodamy matematycheskogo modelyrovaniya dvyzheniya gruzovogo i passazhyrskogo vagona: razmera pyatna kontakta kolesa i relsa, davleniya v pyatne kontakta (napryazheniya pod poverkhnostyu kolesa), syl krypa, moshnostey syl krypa, s uchetom osevoy nagruzky, skorosty dvyzheniya, iznosa profilya kolesa (dlya profilya GOST 10791) v pare s relsamy R65 [Mathematical model methods for the determination of freight and passenger cars operation: the size of a wheel and a rail contact spot, the pressure in a contact spot (the stress beneath the surface of a wheel), creep forces, the power of creep forces, with allowance

- for axial load, running speed, wheel profile wear (for SS 10791 wheel profile) together with R65 rails]. Otchet po teme 80 [Report on subject 80]. Pt 5. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 34 p. (In Russian)
- 14. Sedov L. I. *Mekhanyka sploshnoy sredy* [*Continuum mechanics*]: in 2 vol. Moscow, Nauka Publ., 1970, vol. 1, 492 p.; vol. 2, 568 p. (In Russian)
- 15. Frolov K. V. *Konstruirovaniye mashyn [Machine construction*]: in 2 vol. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1994, 528 p. (In Russian)
- 16. Byrger I.A., Shorr B. F. & Iosylevich G. B. Raschet na prochnost detaley mashyn. Spravochnyk [Stress calculation of machine elements. Reference book]. 3d ed., revised and enlarged. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1979, 702 p. (In Russian)
- 17. Saidova A. V. Sovershenstvovaniye prognosyrovaniya iznosa profyley koles gruzovykh vagonov [The improvement of predicting the wheel profile wear of freight cars]: Cand. Eng. diss. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 121 p. (In Russian)
- 18. GOST 4835–2013. Kolesniye pary zheleznodorozhnykh vagonov. Tekhnicheskiye usloviya [State Standard 4835–2013. Set of wheels for railway cars. Technical regulations]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 32 p. (In Russian)

\*ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — канд. техн. наук, доцент, 89219751198@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КЕРЕН-ЦЕВ Дмитрий Евгеньевич — канд. техн. наук, главный специалист по проектированию колес, kerentsev@bk.ru (ЦИЛ ИТЦ АО «ВМЗ»); ФЕДОРОВ Игорь Владимирович — старший преподаватель, Fedorov281973@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.463

## П.С. Григорьев, К.Е. Суворова

# ОЦЕНКА ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОЛОЧКЕ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

Цель: Повышение уровня безопасности движения поездов играет большую роль как при проектировании нового подвижного состава, так и в процессе эксплуатации. В частности, большинство собственников вагонного парка имеют в своем распоряжении вагоны-цистерны, зачастую используемые для перевозок опасных грузов. В настоящее время техническим устройствам, участвующим в перевозке подобных грузов, со стороны надзорных органов уделяется пристальное внимание с целью обеспечения безопасности и предотвращения чрезвычайных ситуаций. Представляет интерес рассмотреть вопрос о влиянии собственных частот колебаний оболочки котла вагонацистерны на ее напряженное состояние при динамических нагрузках. В качестве примера рассмотрена четырехосная цистерна для перевозки светлых нефтепродуктов. Методы: Вычисления основаны на полубезмоментной теории оболочек. Использованы уравнения, разработанные на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей собщения. Для учета динамических нагрузок в уравнения были введены дополнительные слагаемые. Решение полученных уравнений выполнялись в двойных тригонометрических рядах. Результаты: Выведена формула для оценки квадрата круговой частоты собственных колебаний оболочки котла цистерны. Найдены частоты собственных колебаний оболочки без учета жидкого груза и с его учетом. Рассчитаны собственные частоты колебаний для различных толщин оболочки цистерны. Основываясь на работах, выполненных сотрудниками кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского университета путей сообщения, проведен анализ полученных значений на возможность возникновения резонанса. Практическая значимость: Предложенный подход по решению поставленной задачи будет полезен специалистам, занимающимся разработкой новых моделей вагонов-цистерн. В связи с активной эксплуатацией подобных объектов в ракетно-космической отрасли такие задачи интересны для специалистов, работающих над решением вопросов, связанных с собственными частотами конструкций. Также статья будет представлять интерес для экспертов, выполняющих работы по обоснованию возможности эксплуатации вагонов-цистерн, перевозящих опасные грузы.

**Ключевые слова:** Подвижной состав, вагон-цистерна, котел цистерны, колебания котла цистерны, полубезмоментная теория оболочек, собственные частоты.

**Pavel S. Grygoriyev**, Cand. Sci. Eng., assistant, grigorev.p@gmail.com; \*Kseniya E. Suvorova, postgraduate student, ya.ksuvorova@yandex.ru (Emperor Nicholas II Moscow State Transport University) THE ASSESSMENT OF FREE FREQUENCY AND DYNAMIC STRESS ENCASED IN A TANK SHELL

### Summary

**Objective:** The improvement of train safety control level is prominent both for the construction and operation of a rolling stock. Particularly, the majority of car fleet owners have tank cars at their disposal, which are frequently used for transportation of dangerous goods. At present, supervisory bodies pay close attention to technical equipment used in transportation of such goods, in order to provide security

and prevent emergency situations. In view of the above-mentioned, the question of influence of natural oscillation frequencies of a tank shell on a stress state of a tank car during impact forces is worth considering. A bogie tank wagon built to transport light-oil products was analyzed as an example. Methods: The calculations were based on the theory of semi-momentless shells. The equations, developed at "Cars and rolling stock" chair of the Moscow State Transport University, were used. Additional summands were entered in equations for the purposes of dynamic load calculation. The solutions of the equations in question were performed in double trigonometric sequences. Results: A formula for the assessment of circular frequency square of natural oscillations of a tank shell was introduced. Natural oscillation frequencies of a shell were obtained without including liquid consignment and including it. Natural oscillation frequencies of varied tank shell thickness were calculated. The analysis of the obtained values, based on the studies conducted by chair members of "Cars and rolling stock" at Petersburg State Transport University, was carried out to assess the possibility of resonance initiation. **Practical importance:** The suggested approach to the solution of the given problem may be useful to experts in the development of new tank car models. Due to an active operation of such objects in aerospace field, the tasks may be of interest to experts working on the issues, related to natural oscillations of structures. The article may also be of concern to scientists working in the field of operation feasibility justification of tank cars, transporting dangerous goods.

**Keywords:** Rolling stock, tank car, tank shell, oscillations of a tank shell, theory of semi-momentless shells, natural oscillations.

Для решения поставленной задачи использовались расчетные уравнения полубезмоментной теории оболочек и расчетная схема котла, приведенные в книге [1]. Эти уравнения имеют вид

$$-\frac{E\delta^{3}}{12R^{3}} \left( \frac{\partial^{5}v}{\partial \varphi^{5}} + \frac{\partial^{3}v}{\partial \varphi^{3}} \right) + T_{t} - P_{1}R = 0,$$

$$E\delta \int_{\varphi} \frac{\partial^{3}v}{\partial x^{3}} R^{2} d\varphi - \frac{\partial S}{\partial \varphi} - P_{2}R = 0,$$

$$\frac{\partial T_{t}}{\partial \varphi} + \frac{\partial S}{\partial x} R + \frac{E\delta^{3}}{12R^{3}} \left( \frac{\partial^{4}v}{\partial \varphi^{4}} + \frac{\partial^{2}v}{\partial \varphi^{2}} \right) +$$

$$+P_{3}R = 0,$$
(1)

где E — модуль упругости материала оболочки;  $\delta$  — толщина оболочки; R — радиус оболочки;  $\nu$  — тангенциальное перемещение точек срединной поверхности оболочки;  $T_{\iota}$  — нормальное окружное усилие;  $P_{1}$  — распределенная по поверхности радиальная нагрузка;  $P_{2}$  — распределенная по поверхности продольная нагрузка;  $P_{3}$  — распределенная по поверхности тангенциальная нагрузка; S — сдвигающее усилие срединной поверхности оболочки.

Следует принимать во внимание, что уравнения (1) учитывают воздействия на оболочку котла статических нагрузок [2, 3]. В данной работе они дополнены слагаемыми, которые учитывают воздействия динамических нагрузок [3, 4]. При этом предполагалось, что основное влияние на динамическую нагруженность оказывают радиальные перемещения w точек срединной поверхности оболочки, которые будут зависеть от трех переменных: x – координата, ориентированная вдоль образующей цилиндра; R,  $\phi$  – координаты, отчитываемые по дуге окружности поперечного сечения (цилиндрические координаты) и времени t.

Решение уравнений строилось в двойных тригонометрических рядах [5], в которых тангенциальное перемещение  $\nu$  представлялось как

$$v = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} v_{mn} \sin \lambda x \sin n \varphi \sin \omega t, \qquad (2)$$

здесь  $v_{mn}$  — искомые коэффициенты ряда;  $\lambda = m\pi/L$ ; L — длина цилиндрической части котла; m — номер члена ряда радиального перемещения по длине образующей; n — номер члена ряда разложения по окружности попе-

речного сечения;  $\omega$  — частота колебаний (собственных  $\omega_c$ ) при отсутствии установившихся возмущающих воздействий,  $\omega_{_B}$  — частота вынужденных.

Необходимо иметь ввиду, что, согласно гипотезам полубезмоментной теории оболочек [6, 7], коэффициенты ряда радиального перемещения *w* связаны с коэффициентами тангенциального перемещения соотношением

$$W_{mn} = -nV_{mn}$$

индекс mn указывает, что коэффициенты зависят от двух номеров. Эта зависимость вытекает из условия отсутствия удлинения контура поперечного сечения оболочки. Уравнения (1) трансформируются в уравнения динамики, если к ним добавить слагаемое, отражающее силы инерции  $P_{\rm uh}$ :

$$P_{\text{\tiny UH}} = \frac{\gamma \delta}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \qquad (3)$$

где  $\gamma$  — плотность материала оболочки котла цистерны; w — ряд разложения радиального переменщения; g — ускорение свободного падения.

Если сила  $P_1$  представляет динамическую нагрузку, то в уравнениях (1) все искомые величины будут зависеть от перечисленных выше трех переменных. С учетом слагаемого (3) система уравнений будет отражать вынужденные колебания оболочки. При оценке частот собственных колебаний слагаемые, представляющие нагрузку, следует принять равными нулю. Тогда уравнения для отыскания коэффициентов ряда (2) и рядов усилий  $T_t$  и S

$$T_t = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} T_{mn} \sin \lambda x \cos n \varphi \sin \omega t,$$

$$S = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} S_{mn} \cos \lambda x \sin n\varphi$$

 $(T_{mn}$  и  $S_{mn}$  — коэффициенты рядов соответствующих усилий) примут вид

$$-\frac{E\delta^{3}}{12R^{3}}n^{3}(n^{2}+1) + \frac{\gamma\delta\omega_{c}^{2}R}{g} = 0 \quad 1$$

$$\frac{E\delta R^{2}\lambda^{3}}{n} = -n \quad 0 \times$$

$$\frac{E\delta^{3}}{12R^{3}}n^{2}(n^{2}-1) \qquad \lambda R \quad n$$

Известно, что, для того чтобы однородная система алгебраических уравнений имела решение, необходимо, чтобы определитель коэффициентов данной системы уравнений был равен нулю.

Вычислив определитель и выполнив необходимые преобразования, была получена формула для оценки квадрата круговой частоты собственных колебаний

$$\omega^2 = \frac{gE}{\gamma Rn^3} \left[ \frac{\delta^2 n^3 (n^4 - 1)}{12R^3} + \frac{R^3 \lambda^4}{n} \right].$$

Для учета влияния жидкого груза на частоту собственных колебаний оболочки котла и динамические напряжения были приняты следующие допущения:

- жидкий груз полностью заполняет цилиндрическую емкость;
- люки-лазы цистерны обеспечивают свободную поверхность жидкости;
- на поверхности контакта груза с оболочкой скорости и ускорения частиц жидкости равны скоростям и ускорениям точек оболочки котла;
- в центре жидкой фазы скорость движения жидкости принята равной нулю.

Таким образом, аппроксимирующая функция для радиального перемещения жидкости, отвечающая граничным условиям и принятым допущениям, была выбрана в следующем виде:

$$w = \left(\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} -nv_{mn} \sin \lambda x \cos \varphi \sin \omega t\right) \left(1 - \frac{z}{R}\right),$$

где z — координата, ориентированная по радиусу от поверхности оболочки к центру жидкой фазы.

Учитывая последнее предположение, можно подсчитать равнодействующую коэффициента ряда силы инерции жидкости, воспользовавшись выражением

$$P_{\text{ин}_{mn}} = \int_{0}^{R} \frac{\gamma_{\text{ж}}}{g} \omega^{2} n v_{mn} \left( 1 - \frac{z}{R} \right) dz =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\gamma_{\text{ж}}}{g} R \omega^{2} n v_{mn},$$

в котором  $\gamma_{_{\!\scriptscriptstyle M}}$  – плотность жидкого груза.

Эта сила инерции отражает давление колеблющейся жидкости на оболочку котла, и ее необходимо добавить к первому коэффициенту первого уравнения (4).

Используя уравнения (4), были рассчитаны частоты собственных колебаний оболочки без

учета жидкого груза и с его учетом. Варьировалось значение коэффициента n, который характеризует формы колебаний по окружности поперечного сечения оболочки. При этом коэффициент m принимался равным 1, так как известно, что первая форма колебаний ориентирована по образующей цилиндра, что соответствует наинизшей частоте [8]. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Из табл. 1, где  $f_{\text{тех}}$  — техническая частота колебаний, равная  $f_{\text{тех}} = \omega/2\pi$ , видно, что наинизшая частота колебаний относится к случаю, когда, как отмечено выше, срединная поверхность оболочки по длине искривляется по одной волне синусоиды, т. е. m=1, а по дуге имеет 3 волны, т. е. n=3.

Также были построены графики частоты колебаний порожнего и груженого котлов в зависимости от толщины оболочки. Так как характер изменения частоты не меняется от загруженности котла, на рис. 1 приведен один график, а результаты расчета сведены в табл. 2.

Из рис. 1 и табл. 2 следует, что частота собственных колебаний оболочки вагона с жид-

ТАБЛИЦА 1. Частоты собственных колебаний оболочки без учета и с учетом жидкого груза

Частота собственных колебаний об		олебаний оболочки, $f_{\mathrm{rex}}$
	порожнего вагона	груженого вагона
2	26,538	10,96
3	23,473	9,7
4	37,443	15,475
5	57,89	23,95

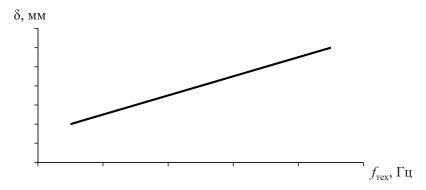


Рис. 1. Характер изменения частоты колебаний от толщины оболочки котла вагона

δ, мм	Частота колебаний оболочки, $f_{\text{\tiny tex}}$		
0, 11111	порожнего вагона	груженого вагона	
8	30,188	11,355	
9	33,809	13,37	
10	37,443	15,475	
11	41,088	17,66	
12	44,74	19,918	

ТАБЛИЦА 2. Значения собственной частоты колебаний при различных толщинах котла цистерны

ким грузом значительно ниже, чем у порожнего котла вагона. Так как к наиболее опасным относятся низкочастотные колебания [7, 8], необходимо проверить напряжения, возникающие в оболочке котла груженой цистерны, и возможность возникновения резонансных явлений при прохождении неровностей.

Расчет динамических напряжений осуществляется в предположении, что к опорному давлению, действующему на котел, добавлялись силы инерции, связанные с «подпрыгиванием» цистерны при проходе вертикальных неровностей, которые принимались синусоидальными, с длиной волны, равной длине рельсового звена. По длине волны и скорости движения

определялась частота вынужденных колебаний  $\omega_{_{\rm B}}$ , которая входила в расчетные формулы вместо  $\omega_{_{\rm C}}$ . Предполагалось, что вынужденные колебания установившиеся.

Дополнительно к проведенному исследованию был выполнен расчет частот собственных колебаний методом конечных элементов [9] рассматриваемой оболочки котла цистерны. Граничные условия задавались отсутствием поперечных перемещений котла. При построе-





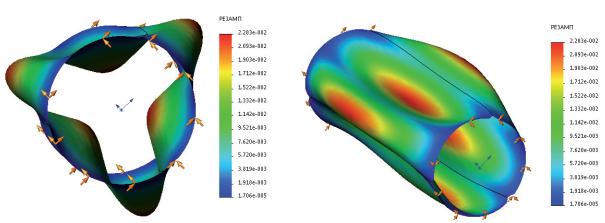


Рис. 2. Результат расчета методом конечных элементов для второй формы колебаний: слева — вид справа, справа — общий вид

10	Частота колебаний оболочки, $f_{\text{тех}}$ , рассчитанная	
n	по выражению (4)	методом конечных элементов
2	26,538	25,209
3	23,473	20,317
4	37,443	33,951
5	57,89	51,498

ТАБЛИЦА 3. Полученные значения частот собственных колебаний с использованием различных методов решения

нии сетки конечно-элементной модели было получено 28 079 узлов и 14 197 элементов. Результат расчета для второй формы колебаний представлен на рис. 2.

Результаты, полученные на основе зависимости (4) и с использованием численного метода решения, приведены в табл. 3. Как видно из нее, значения собственных частот удовлетворительно сходятся.

Выполненные расчеты показали, что реальные котлы цистерн имеют частоту собственных колебаний, существенно превышающую частоту возмущающих воздействий, что исключает возможность возникновения резонансных явлений.

### Библиографический список

- 1. Лукин В. В. Конструирование и расчет вагонов: учебник / В. В. Лукин, П. С. Анисимов, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, В. В. Кобищанов. М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011. 688 с.
- 2. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин / С.В. Бояршинов. М. : Машиностроение, 1973.-457 с.
- 3. Кармишин А. В. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций / А. В. Кармишин, В. И. Мяченков, А. Н. Фролов. М.: Машиностроение, 1975. 376 с.
- 4. Вершинский С.В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Р. Хусидов. М. : Транспорт, 1991.-360 с.

- 5. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. М. : Физматиздат, 1960. T. III. 656 c.
- 6. Власов В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. М.: Гостехтеориздат, 1949. 456 с.
- 7. Третьяков А.В. Анализ динамических напряжений и выбор параметров элементов оборудования четырехосных цистерн: дисс. ... канд. техн. наук: специализация (05.22.07) / А.В. Третьяков. Л.: ЛИИЖТ, 1986. 160 с.
- 8. Третьяков А.В. Расчет спектра ударного отклика при проведении испытаний переносных цистерн и газовых контейнеров / А.В. Третьяков, О.А. Третьяков, М.В. Зимакова // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3 (58). С. 60—65.
- 9. Секулович М. Метод конечных элементов / М. Секулович. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.
- 10. Власов В. 3. Общая теория оболочек и ее приложения в технике : монография / В. 3. Власов. М. ; Л. : Гостехиздат, 1949. 784 с.
- 11. Филипов А. П. Колебания деформируемых систем / А. П. Филипов. М. : Машиностроение, 1970.-730 с.
- 12. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИ ВНИИЖТ, 1996. 320 с.
- 13. Черных К. Ф. Линейная теория оболочек : в 2-х ч. / К. Ф. Черных. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1962. 4.1. 274 с.
- 14. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле: монография / С.П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер; пер с англ. Л.Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

15. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.

### References

- 1. Lukyn V. V., Anysymov P. S., Koturanov V. N., Khokhlov A. A. & Kobyshanov V. V. *Konstruirovaniye i raschet vagonov* [*Car construction and calculation*]. Moscow, Learning and teaching educational center of railway transport Publ., 2011, 688 p. (In Russian)
- 2. Boyarshynov S. V. *Osnovy stroitelnoy mekhanyky mashyn* [*The basics of machine structural engineering*]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1973, 457 p. (In Russian)
- 3. Karmyshyn A. V., Myachenkov V. I. & Frolov A. N. Statyka i dynamyka tonkostennykh obolochennykh konstruktsiy [Statics and dynamics of thin-walled shell constructions]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1975, 376 p. (In Russian)
- 4. Vershynskiy S. V., Danylov V. N. & Khusydov V. R. *Dynamyka vagona* [*Dynamics of a car*]. Moscow, Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)
- 5. Fykhtengoltz G. M. *Kurs dyfferentsialnogo i integralnogo ischysleniya* [*Calculus course*]. In 3 vol. Moscow, Physmatizdat Publ., 1960, vol. 3, 656 p. (In Russian)
- 6. Vlasov V.Z. *Obshaya teoriya obomlochek* [*General theory of shells*]. Moscow, Gostekhteorizdat Publ., 1949, 456 p. (In Russian)
- 7. Tretiyakov A. V. Analyz dynamycheskykh napryazheniy i vybor parametrov elementov oborudovaniya chetyrekhosnykh tsystern [The analysis of dynamic parametres and parameter selection of equipment pieces of a bogie tank wagon]. Diss. Cand. Eng. concentration 05.22.07. Leningrad, LIIZhT Publ., 1986, 160 p. (In Russian)

- 8. Tretiyakov A. V., Tretiyakov O. A. & Zymakova M. V. Raschet spectra udarnogo otklyka pry provedenii ispytaniy perenosnykh tsystern i gazovykh konteynerov [Spectral analysis of shock response when performing the tests on portable tanks and gas vessels]. *Transport of the Russian Federation*, 2015, no. 3 (58), pp. 60–65. (In Russian)
- 9. Sekulovich M. *Metod konechnykh elementov* [*Finite-element method*]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993, 664 p. (In Russian)
- 10. Vlasov V. Z. Obshaya teoriya obolochek i yeye prylozheniya v tekhnike [General theory of shells and its application in engineering]. Moscow, Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1949, 784 p. (In Russian)
- 11. Phylypov A. P. Kolebaniya deformyruyemykh system [Oscillations of deformable systems]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1970, 730 p. (In Russian)
- 12. Normy rascheta i proyektyrovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Codes of design and construction of 1520 mm gauge railway cars (non-self-propelled) for the Ministry of railroads]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT Publ., 1996, 320 p. (In Russian)
- 13. Chernykh K. F. *Lyneynaya teoriya obolochek* [*Linear theory of shells*]. In 2 pt. Leningrad, Leningrad University Publ., 1962, 274 p. (In Russian)
- 14. Timoshenko S. P., Young D. H. & Weaver W. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Oscillations in engineering]; tr. from English by L. G. Korneychuk; ed. by E. I. Grygolyuk. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1985, 472 p. (In Russian)
- 15. Aleksandrov A. v. & Potapov V. D. *Osnovy teorii* uprugosty i plastychnosty [The basics of elasticity and plasticity theory]. Moscow, Higher school Publ., 1990. 400 p.

ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич – канд. техн. наук, ассистент, grigorev.p@gmail.com; СУВОРОВА Ксения Евгеньевна – аспирант, ya.ksuvorova@yandex.ru (Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II).

УДК 629.463.32

### И.Г. Киселев, В.В. Галов, С.Б. Комиссаров

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА РАСПЛАВЛЕННОЙ СЕРЫ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЕ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

### Аннотация

Цель: Проверка эксплуатационных характеристик, связанных с загрузкой, транспортировкой, разогревом и разгрузкой серы, с целью подтверждения конструкторских решений, реализованных в новых моделях вагона. Методы: Применено уравнение теплового баланса для изучения процессов разогрева. Результаты: Исследованы перспективы потребления расплавленной серы промышленными предприятиями химической промышленности России и стран СНГ. Выполнен обзор существующего подвижного состава для перевозки расплавленной серы, указывающий на необходимость обновления парка вагонов-цистерн. Обозначены цели натурных испытаний подвижного состава для перевозки расплавленной серы. Описаны характеристики опытного образца вагона-цистерны модели 15-9544, разработанного управляющей компанией «РэйлТрансХолдинг». Представлена последовательность проведения функциональных испытаний вагона-цистерны модели 15-9544 с электрическими нагревателями для перевозки расплавленной серы. Изучены условия проведения функциональных испытаний вагона-цистерны. Установлены зависимости коэффициента теплопередачи изоляции котла вагона-цистерна, времени затвердевания серы, скорости ее разогрева существующей системой электрических нагревателей от внешних условий. Определены перспективы проверок указанного вида вагона-цистерны для запуска в серийное производство. Практическая значимость: На основе представленных зависимостей осуществляется теплофизический расчет вагонов-цистерн. Результаты исследований могут быть применены при проектировании новых вагонов-цистерн с улучшенными по сравнению с существующим подвижным составом характеристиками.

Ключевые слова: Вагон-цистерна, расплавленная сера, функциональные испытания.

**Igor G. Kyselev**, D. Sci. Eng., professor, kteploteh@pgups.ru; **Vladimir V. Galov**, Cand. Sci. Eng., v\_galov@hotmail.com; \***Sergey B. Komissarov**, postgraduate student, s. b.komissarov@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) EXPERIMENTAL RESEARCH OF MOLTEN SULPHUR ELECTRIC HEATING IN A RAILROAD TANK CAR

### Summary

**Objective:** To check operational characteristics connected with loading, transportation, heating and discharging of Sulphur, in order to confirm engineering solutions, realized in the new models of cars. **Methods:** The heat-balance equation was applied to study the heating processes. **Results:** The prospects molten sulfur consumption by chemical industry enterprises of Russia and the CIS countries were studied. A review of the current rolling stock built to transport molten sulfur was carried out, pointing out the necessity of technical improvement of tank-cars. The goals for field tests of a rolling stock, designed to transport molten sulfur, were set. The characteristics of a sample 15-9544 modification tank-car, designed by the managing company "RailTransHolding" were described. Experimental procedure of functional tests of a 15-9544 modification tank-car with electric heating units, designed to transport molten sulfur, was presented. The conditions for conducting functional tests of a tank-car were studied. The dependencies of heat-transfer coefficient of a tank-car boiler coating, the time of sulfur solidification, its heating rate by the current system of electric heating units from environmental conditions were established. Testing

prospects of the given model of a tank-car for commercializing were determined. **Practical importance:** Thermophysical calculations of tank cars are carried out on the basis of the dependencies in question. The research results may be applied in the design of new tank-cars with improved characteristics in comparison with those of the current rolling stock.

Keywords: A tank car, molten sulfur, functional tests.

В связи с развитием агропромышленного комплекса стран СНГ, в том числе России, в настоящее время продолжает расти темп потребления серы предприятиями химической промышленности, ориентированных на производство минеральных удобрений.

Увеличение потребления серы приводит к возрастанию объемов ее производства и соответственно перевозок, в том числе железнодорожным транспортом. Для перевозки расплавленной серы железнодорожным транспортом используются четырехосные вагоны-цистерны моделей 15-1480, 15-1482 (-02, -05, -06) производства ОАО «МЗТМ» (г. Мариуполь, Украина), модели 15-1256 производства АО «Рузхиммаш» (г. Рузаевка, Россия). К настоящему времени эксплуатационный парк таких вагонов-цистерн сильно изношен и требует обновления.

Для решения этой проблемы потребуется наладить серийный выпуск новых моделей подвижного состава, в связи с чем становится актуальным вопрос проверки эксплуатационных характеристик, связанных с загрузкой, транспортировкой, разогревом и разгрузкой серы, с целью подтверждения конструкторских решений, реализованных в новых моделях вагона, т. е. необходимо проведение функциональных испытаний.

Исходя из специфики перевозки жидкой серы железнодорожным транспортом, основными целями испытаний соответствующих цистерн являются экспериментальная проверка работоспособности устройств загрузкиразгрузки, систем теплоизоляции и электроразогрева, а также проверка теплотехнических параметров вагона и сопоставление с результатами проведенных конструктивных расчетов.

В 2015 г. управляющей компанией «Рэйл-ТрансХолдинг» на ОАО «Новозыбковский машиностроительный завод» был изготовлен опытный образец вагона-цистерны модели 15-9544 (рис. 1), успешно прошедший комплекс предварительных и приемочных испытаний.

В объем экспериментальных проверок в рамках функциональных испытаний были включены:

- определение коэффициента теплопередачи изоляции котла вагона;
- оценка времени охлаждения груза в вагоне до температуры застывания;
- нахождение скорости разогрева груза, разгрузки вагона.

Для определения коэффициента теплопередачи порожний вагон должен быть размещен в крытом помещении вдали от источников теплового излучения. Внутри котла вагона необходимо установить источник теплоты. Согласно схеме (рис. 2), снаружи и внутри вагона нужно смонтировать датчики для измерения температуры.

С помощью источника теплоты воздух внутри порожнего котла нагревается до наступления установившегося теплового режима.

При этом определяется средняя температура воздуха внутри котла вагона  $t_B$  как среднее арифметическое значений температур внутри вагона  $t_{B1}-t_{B8},\ t_{\rm Ul}-t_{\rm US},$  снаружи вагона  $t_H$  — как среднее арифметическое значений температур на наружной поверхности вагона  $t_{H1}-t_{H16},$  а также мощность источника тепловыделений Q.

Коэффициент теплопередачи изоляции котла вагона-цистерны k (в Bт/м·К) определяется по формуле

$$k = \frac{Q}{F(t_B - t_H)},$$



Рис. 1. Общий вид вагона-цистерны модели 15-9544 для перевозки расплавленной серы

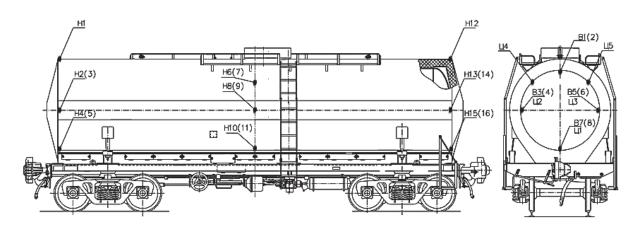


Рис. 2. Схема размещения контрольных точек измерения температуры на наружной и внутренней поверхностях вагона: H — точки наружной поверхности вагона; В — точки внутренней поверхности вагона в центральном сечении котла. Слева — вид сбоку, справа — вид спереди

в которой Q — мощность источника теплоты (Вт); F — теплопередающая поверхность вагона (м²);  $t_B$ ,  $t_H$  — температуры на внутренней и наружной поверхностях вагона (°C).

Общее время охлаждения груза  $\tau_{\text{общ}}$  (в с) складывается из трех составляющих:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{охл1}} + \tau_{\text{3ст}} + \tau_{\text{охл2}},$$

где  $\tau_{\rm oxn1}$  — время охлаждения груза до температуры застывания серы (c);  $\tau_{\rm 3cT}$  — время застывания груза при температуре застывания серы (c);  $\tau_{\rm oxn2}$  — время частичного охлаждения твердых слоев груза (c).

Оценку скорости разогрева груза в вагоне производят для жидкой фазы груза, когда температура груза  $t_{\rm rp}$  превышает температуру плавления серы  $t_{\rm nn}$ . Скорость разогрева груза

 $V_p$  (в °C/с) в вагоне при температуре окружающей среды  $t_{\rm cp}$  определяют по формуле

$$V_p = \frac{t_{\rm CJI} - t_{\rm rp}}{\tau_p},$$

здесь  $t_{\rm cn}$  – температура слива груза (°С);  $\tau_p$  – время разогрева от температуры груза  $t_{\rm rp}$  до температуры слива  $t_{\rm cn}$  (c).

За температуру окружающей среды  $t_{\rm cp}$  принимают среднее арифметическое значений измеренных температур воздуха в процессе разогрева груза.

Проведение функциональных испытаний является неотъемлемой частью экспериментальных проверок при постановке на производство перспективных конструкций подвижного состава для перевозки расплавленной серы. Окончательный вывод о работоспособности всех систем вагона подобной конструкции в различных климатических условиях может быть сделан после проведения подконтрольной эксплуатации образцов из установочной серии вагонов.

#### Библиографический список

- 1. Битюцкий А. А. Пути повышения эффективности грузовых вагонов, выпускаемых российскими вагоностроительными предприятиями / А. А. Битюцкий // Тяжелое машиностроение. 2008. № 2. С. 29—33.
- 2. Битюцкий А.А. Специализированные вагоны для операторских компаний / А.А. Битюцкий // Вагоны и вагонное хозяйство. 2004. Пилотный выпуск. С. 16–18.
- 3. Галов В. В. Функциональные испытания перспективного вагона-цистерны для перевозки расплавленной серы модели 15-9544 / В. В. Галов, С. Б. Комиссаров, Р. В. Граборов, Р. И. Шейченко, М. А. Чубань // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Машинознавство та САПР. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 39 (1211). С. 50—55.
- 4. Киселев И.Г. Перспективы модернизации системы электронагрева вязких грузов при сливе из

- железнодорожных цистерн / И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2016. Т. 13, вып. 1. С. 25–30.
- 5. Киселев И. Г. Совершенствование системы электронагрева вязких грузов при сливе из железнодорожных цистерн / И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров // VIII Междунар. симпозиум «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» : тез. докл. СПб. : ПГУПС, 2015. С. 15.
- 6. Киселев И. Г. Перспективные вагоны-цистерны для перевозки загустевающих грузов / И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров // Труды Междунар. науч.-практич. конференции «Транспорт—2013», апрель 2013 г. : в 4 ч. Ч. 2. Технические науки. Ростов н/Д. : Ростов. гос. ун-т путей сообщения, 2013. С. 173—175.
- 7. Кузьмич Л. Д. Вагоны (проектирование, устройство и методы испытаний) / Л. Д. Кузьмич. М.: Машиностроение, 1978. 376 с.
- 8. Битюцкий А.А. Методика определения объема ремонта котлов при восстановлении ресурса вагонов-цистерн для перевозки жидкого пека / А.А. Битюцкий, К.И. Рыжов // Совершенствование методов испытаний и диагностики грузовых вагонов: сб. науч. трудов. Вып. 2 / под ред. А.А. Битюцкого; Инженерный центр вагоностроения. СПб.: ОМ-Пресс, 2007. С. 90—100.
- 9. Моисеев В. И. Модели процесса охлаждения цистерны с горячими нефтепродуктами при их перевозках в осенне-зимний период / В. И. Моисеев // Бюл. результатов науч. исследований. 2012. Вып. 2. С. 98—110.
- 10. Морчиладзе И. Г. Железнодорожные цистерны / И. Г. Морчиладзе, А. П. Никодимов, М. М. Соколов, А. В. Третьяков. М.: ИБС—Холдинг, 2006. 516 с.
- 11. Расчет процессов разогрева вязких грузов в железнодорожных цистернах с применением электронагревателей: метод. указания / Федеральное агентство ж.-д. транспорта, ФГБОУ ВО ПГУПС, кафедра «Теплотехника и теплосиловые установки»; сост.: И.Г. Киселев, В.В. Галов, С.Б. Комиссаров.—СПб.: ПГУПС, 2015.—14 с.

12. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справ. пособие / сост. Р.С. Глазкова, Р.Ф. Канивец, В.Н. Котуранов, К.В. Мотовилов, А.В. Смольянинов, И.Б. Феоктистов, В.Н. Филиппов, Г.Ф. Чугунов, В.М. Бубнов. – М. : МПС РФ, Изд-во стандартов, 1993. – № 889. – 119 с.

#### References

- 1. Bytuzkyi A.A. Puty povysheniya effektyvnosty gruzovykh vagonov, vypuskayemykh rossiyskymy vagonostroytelnymy predpriyatiyamy [The ways for efficiency improvement of freight cars produced by the Russian car production facilities]. *Tyazheloye mashynostroyeniye* [*Heavy manufacturing*], 2008, no. 2, pp. 29–33 (In Russian)
- 2. Bytuzkyi A.A. Spetsialyzyrovanniye vagony dlya operatorskykh kompaniy [Special-purpose cars produced for the companies of operators]. *Vagony i vagonnoye khozyaistvo* [*Cars and rolling stock*], 2004, Pilot issue, pp. 16–18. (In Russian)
- 3. Galov V.V., Komissarov S.B., Graborov R.V., Sheychenko R.I. & Chuban M.A. Funktsionalniye ispytaniya perspektyvnogo vagona-tsysterny dlya perevozky rasplavlennoy sery modely 15-9544 [Experimental research of a long-range tank car of 15-9544 modification designed to transport molten sulfur]. Vysnyk NTU "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR [Vestnik of NTU "KhPI". Series Machinostroenia and SAPR]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 39 (1211), pp. 50–55. (In Russian)
- 4. Kyselev I.G., Galov V.V. & Komissarov S.B. Perspektyvy modernizatsii systemy elektronagreva vyazkykh gruzov pry slyve iz zheleznodorozhnykh system [Modernization prospects of vicious freight electric heating systems when dispensing rail tank cars]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2016, vol. 13, issue 1, pp. 25–30. (In Russian)
- 5. Kyselev I.G., Galov V.V. & Komissarov S.B. Sovershenstvovaniye systemy elektronagreva vyazkykh gruzov pry slyve iz zheleznodorozhnykh tsystem [The improvement of a vicious freight electric heating system when dispensing rail tank cars]. *Mezhdunarodnyi symposium "Elektryfykatsiya, razvitiye elektroenergetycheskoy infrastruktury i elektrycheskogo pod-*

- vyzhnogo sostava skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta" [International academic conference "Motorization, the development of electric power infrastructure and electric vehicles of fast and high-speed railway transport"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 15. (In Russian)
- 6. Kyselev I.G., Galov V.V. & Komissarov S.B. Perspektyvniye vagony- tsysterny dlya perevozky zagustevayushykh gruzov [Long-range tank cars designed to transport thickening consignment]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii "Transport–2013"* [*Proceedings of the International research and training conference "Transport–2013"*]. In 4 parts. Rostov-on-Don, the Rostov State Transport University Publ., 2013, pp. 173–175. (In Russian)
- 7. Kuzmich L.D. Vagony (proyektyrovaniye, ustroystvo i metody ispytaniy) [Cars (design, organization and methods of testing)]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1978, 376 p. (In Russian)
- 8. Bytutskiy A.A. & Ryzhov K.I. Metodyka opredeleniya obyema remonta kotlov pry vosstanovlenii resursa vagonov-tsystern dlya perevozky zhydkogo peka [The determination method of barrel repair size in case of extending operational life of tank cars built to transport liquid pitch]. Sovershenstvovaniye metodov ispytaniy i diagnostyky gruzovykh vagonov [The improvement of testing methods and diagnostics of freight cars]. Sbornyk nauchnykh trudov [Collection of research papers]; ed. by A.A. Bytutskiy. Saint Petersburg, OM-Press Publ., 2007, issue 2, pp. 90–100. (In Russian)
- 9. Moiseyev V.I. Modely protsessa okhlazhdeniya tsysterny s goryachymy nefteproduktamy pry ikh perevozkakh v osenne-zymniy period [Cooling process models of a tank-car with hot oil during its transportation in the autumn-winter period]. *Bulletin of scientific research results*, 2012, issue 2, pp. 98–110. (In Russian)
- 10. Morchyladze I. G., Nykodymov A. P., Sokolov M. M. & Tretyakov A. V. *Zheleznodorozhniye tsysterny* [*Railroad tank cars*]. Moscow, IBS–Holding Publ., 2006, 516 p. (In Russian)
- 11. Kyselev I. G., Galov V. V. & Komissarov S. B. Raschet protsessov razogreva vyazkykh gruzov v zheleznodorozhnykh tsysternakh s prymeneniyem elektronagrevateley [The heating process calculation of vicious consignment in railway tank cars using elec-

tric heating units]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 14 p. (In Russian)

12. Glazkova R. S., Kanyvets R. F., Koturanov V. N., Motovylov K. V., Smolyanynov A. V., Feoktystov I. B., Filippov V. N., Chugunov G. F. & Bubnov V. M. *Spet*- sialyzyrovanniye tsysterny dlya perevozky opasnykh gruzov [Special purpose tank cars designed to transport dangerous goods]. Moscow, Ministry of railways RF Publ., Stds Publ. House, 1993, no. 889, 119 p. (In Russian)

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич — доктор техн. наук, профессор, kteploteh@pgups.ru; ГАЛОВ Владимир Викторович — канд. техн. наук, v\_galov@hotmail.com; \*КОМИССАРОВ Сергей Борисович — аспирант, s.b.komissarov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.34

# А. М. Костроминов, А-р А. Костроминов, О. Н. Тюляндин

# ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПРОПУСКА СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С РАДИОЧАСТОТНЫХ МЕТОК АППАРАТУРОЙ СБПП

Дата поступления: 11.09.2017 Решение о публикации: 13.11.2017

## Аннотация

**Цель:** Исследовать причины случаев пропуска считывания информации с RFID-меток и на основании полученных результатов дать рекомендации по повышению надежности функционирования системы бесконтактной привязки к пути (СБПП) метрополитена. **Методы:** Применено математическое моделирование, проведен вычислительный эксперимен**Результаты:** Разработана математическая модель считывания меток аппаратурой СБПП, позволяющая оценить вероятность пропуска последних в зависимости от скорости поезда и заданного времени сканирования. На основании полученных результатов даны рекомендации по выбору времени сканирования. **Практическая значимость:** Причиной роста интереса к данной теме послужили несколько пропусков считывания информации с меток аппаратурой СБПП на перегонах, где преобладают сравнительно высокие скорости движения (60 км/ч и более). Предложенное решение позволяет уменьшить вероятность пропуска меток на два порядка путем увеличения времени их сканирования с 1 с до верхнего возможного значения 65 с, причем реализация описанного решения достигается минимальной корректировкой программного обеспечения аппаратуры.

**Ключевые слова:** RFID, время сканирования, пропуск перегонных меток, система бесконтактной привязки к пути, надежность считывания.

**Alexander M. Kostromynov**, D. Sci. Eng., professor, triak@grozon.spb.ru; **Alexander A. Kostromynov**, Cand. Sci. Eng., associate professor, alkostrom@gmail.com; \***Oleg N. Tyulyandyn**, postgraduate student, tyulyandin@vklay.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE ASSESSMENT OF INFORMATION READOUT OMISSION PROBABILITY FROM RF TAGS BY THE SYSTEM OF CONTACTLESS TRACK CONNECTION (SBPP)

#### **Summary**

**Objective:** To study the reasons of cases, in which information readout omission from RFID-tags occurred, and give recommendations on reliability improvement of the subway system of contactless track connection (SBPP) on the basis of the obtained data. **Methods:** Simulation modelling was applied, as well as a computing experiment was conducted. **Results:** A mathematical model of reading tags by SBPP equipment was developed. The model in question makes it possible to assess the probability of information readout omission from tags, depending on the train speed and the allowed scanning time. Recommendations on the selection of scanning time were given on the basis of the obtained data. **Practical importance:** The reason for the growing interest to the topic was a number of information readout omissions from tags by SBPP equipment on railway hauls with high speed movement (60 km/h and more). The suggested solution makes it possible to minimize the probability of tag omission in 20 times by means of increasing the scanning time from 1 s up to the highest possible value of 65 s. It should be noted that implementation of the presented solution is achieved by minimum software fixes of the equipment.

**Keywords:** RFID, scan time, railway haul tags missing, the system of contactless connection to tracks, readout security.

## Введение

В процессе эксплуатации системы бесконтактной привязки к пути (СБПП) [1–4], базовой частью которой являются RFID-средства (радиометки, устанавливаемые на стенах тоннеля, и ридеры с антеннами, располагаемые на борту головных вагонов пассажирских поездов; структурная схема представлена на рис. 1) [5–7], было зафиксировано несколько случаев пропуска считывания перегонных меток.

Эти немногочисленные случаи актуализировали задачу повышения надежности функ-

ционирования СБПП, требующую разработки метода оценки вероятности пропуска считывания радиочастотных меток.

# Описание взаимодействия ридера с радиочастотной меткой

В системе бесконтактной привязки к пути ридер осуществляет поиск меток после получения соответствующей команды от вагонного контроллера. При этом команда содержит настраиваемое время сканирования (от 100 мс до 65 с).

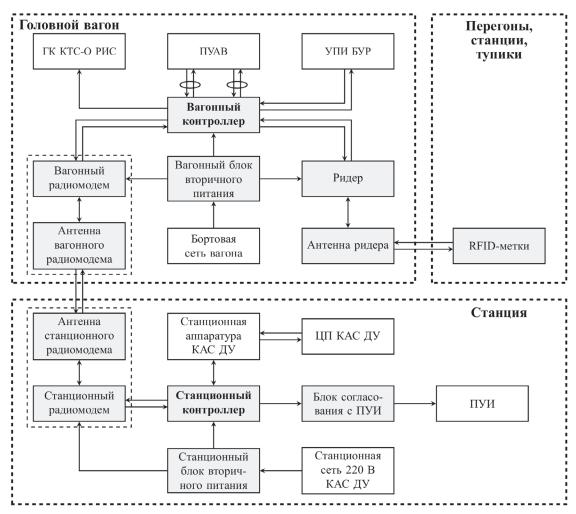


Рис. 1. Структурная схема СБПП (ГК КТС-О РИС – головной контроллер комплекса технических средств оповещения рекламно-информационной системы; ПУАВ – поездное устройство автоведения; УПИ БУР – устройство передачи информации с бортового устройства регистрации событий; КАС ДУ – комплексная автоматизированная система диспетчерского управления; ЦП КАС ДУ – центральный пункт КАС ДУ; ПУИ – поездные устройства индикации)

В случае нахождения RFID-антенны в зоне радиовидимости метки ридер «накачивает» метку энергией, затем посылает запрос на считывание; по завершении накачки метка обрабатывает запрос и «отвечает» согласно протоколу Gen2 [8]. После информационного обмена ридер завершает сканирование и передает считанные данные в контроллер.

Если по истечении заданного времени ни одна метка не была считана, ридер независимо от текущего состояния прекращает сканирование и информирует об этом контроллер. Обработав ответ ридера, контроллер посылает повторную команду на поиск. На этом цикл связи ридера с меткой завершается.

По данным экспериментальных наблюдений время от момента выключения сканирующего поля до очередного включения является случайной величиной, имеющей нормальную плотность распределения со средним значением 40 мс и среднеквадратичным отклонением 4 мс.

Время накачки и информационного обмена описывается сложнее. В случае первой накачки (накопленная энергия в метке отсутствует) информация с метки считывается за 40 мс. В остальных случаях время считывания есть случайная величина, подчиненная нормальному закону распределения с математическим ожиданием 35 мс и среднеквадратичным отклонением 5 мс.

# Метод оценки вероятности пропуска меток

Введем ряд условных обозначений: l — ширина зоны радиовидимости метки (в рамках решаемой задачи примем детерминированной величиной, равной 230 см) [1, 3]; v — скорость поезда при проезде зоны радиовидимости метки\*;  $t_{\text{зад}}$  — задержка в управлении ридером (случайная величина);  $t_{\text{сq}}$  — длительность пер-

вой накачки метки и радиообмена (детерминированная величина);  $t_{\rm ckah}$  — настраиваемое время сканирования.

Примем, что задержка в управлении ридером и время повторного считывания метки распределены по законам с плотностями  $f_{\text{зад}}(t)$  и  $f_{\text{повт.сч}}(t)$  соответственно.

С учетом изложенных условий определим возможные исходы проезда зоны радиовидимости метки.

- 1. Метка будет считана.
- 2. Метка не будет считана: время накачки метки и радиообмена превысит время проезда зоны радиовидимости, т. е.  $t_{cu} > l/v$ .

Однако известно, что ширина зоны радиовидимости перегонных меток составляет 2,3 м, а суммарное время накачки и считывания — 40 мс. Отсюда следует, что по рассматриваемой причине метка будет пропущена при скорости поезда свыше 200 км/ч, но такая величина в Петербургском метрополитене недостижима. Таким образом, указанный исход допустимо исключить.

- 3. Метка не будет считана: поезд наедет на зону радиовидимости метки с отключенным радиополем (происходит при остановке поиска за время  $t \in [0, t_{_{3ад}} (l/v t_{_{cч}})]$  до наезда на зону радиовидимости), а после восстановления сканирования не успеет считать метку выйдет из зоны ее радиовидимости.
- 4. Метка не будет считана: ридер отключится при накачке метки или радиообмене, т.е. на временном интервале  $[0, t_{cq}]$ , и после восстановления сканирующего поля не успеет считать метку до выхода поезда из зоны радиовидимости.

Исходы 1, 3 и 4 обозначим буквами A,  $C_1$  и  $C_2$  соответственно. Очевидно, что указанные исходы несовместны и образуют полную группу событий [9–11], т. е.  $P(A+C_1+C_2)=1$ . Поэтому вероятность пропуска метки при проезде зоны радиовидимости можно вычислить следующим образом:

$$P(\overline{A})(l,v,t_{\text{ckah}}) = P(C_1) + P(C_2),$$
 (1)

где 
$$P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$
.

<sup>\*</sup> Здесь и далее будем рассматривать поезд как материальную точку, сконцентрированную в центре RFID-антенны.

Вероятность реализации исхода  $C_1$  является условной и может быть определена по формуле [11]

$$P(C_{1})(l, v, t_{\text{cKaH}}) =$$

$$= \int_{\frac{l}{v} - t_{\text{cY}}}^{\infty} f_{3\text{AJ}}(t) \cdot F_{\text{OTKJ}}(t + t_{\text{CY}} - \frac{l}{v}) dt, \qquad (2)$$

в которой  $F_{\text{откл}}(t)$  — вероятность выхода ридера из сканирующего режима на временном отрезке t, она тождественна функции равномерного распределения на интервале  $[0,t_{\text{скан}}]$ .

Аналогично может быть вычислена и вероятность осуществления исхода  $C_2$ :

$$P(C_{2})(l, v, t_{\text{CKAH}}) =$$

$$= \int_{0}^{t_{\text{CH}}} f_{\text{OTKJ}}(t) \cdot \int_{\frac{l}{v} - t}^{\infty} (f_{\text{HOBT.CH}} * f_{\text{3AJ}})(\tau) d\tau dt,$$
(3)

здесь  $f_{\text{откл}}(t)$  — плотность вероятности отключения сканирующего поля ридера, тождественна плотности непрерывного равномерного распределения на интервале  $[0,t_{\text{скан}}];*$  — операция свертки.

Из теории математического анализа известно [12], что под сверткой понимается функция

$$(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cdot g(x - \xi) d\xi.$$

```
ratprint: false$
load(distrib)$
/* Плительность полной накачки и радиообмена в милисекундах */
/* Математическое ожидание задержки */
md: 40$
/* Плотность распределения задержки перевода ридера в режим сканирования */
fd(t) := pdf_normal(t, 40, 4)$
/* Плотность распределения времени повторной накачки метки и радиообмена */
fc(t) := pdf_normal(t, 35, 5)$
/* Плотность распределения момента отключения сканирования */
fo(t,tsearch) := pdf_continuous_uniform(t,0,tsearch+md)$
/* Функция распределения момента отключения сканирования */
Fo(t,tsearch) := cdf_continuous_uniform(t,0,tsearch+md)$
/* Объявление функции численного интегрирования свертки плотностей
* распределения задержки и времени повторной накачки метки с радиообменом на
 * интервале от t до бесконечности/
 * assume (x > 0)$
* F1(t) :=
    quad qagi(ilt(laplace(fc(x),x,s)*laplace(fd(x),x,s),s,y),y,t,inf)[1]$
 * Онако для случая суммы двух нормальных плотностей формула может быть
    упрощена: */
Fl(t) := 1 - cdf normal(t, 75, 6.4)$
/* Объявление функций вычисления вероятностей пропуска меток из-за выполнения
* условий 3 и 4 */
p3(l,v,ts) := quad_qagi(fd(t)*Fo(t+tc-l/v,ts),t,l/v-tc,inf)[1]$
p4(l,v,ts) := quad_qags(fo(t,ts)*Fl(l/v-t),t,0,tc)[1]$
/* Функция вычисления полной вероятности пропуска меток. Размерность скорости
* как аргумента функции -- м/мс */
p(l,v,ts) := if (l/v >= tc)
   then p3(1,v,ts) + p4(1,v,ts) else 1$
```

Рис. 2. Объявление функции p(l, v, ts), позволяющей оценить вероятность пропуска меток в зависимости от ширины зоны радиовидимости, скорости и настраиваемого времени сканирования

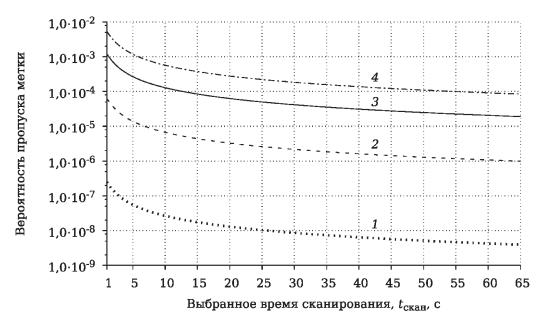


Рис. 3. Вероятности пропуска меток в зависимости от времени сканирования на скоростях 60(1), 65(2), 70(3) и 75 км/ч (4)

Однако возможно альтернативное представление свертки через использование преобразований Лапласа (именно оно будет использовано при численном решении)

 $(f*g)(x) = \mathcal{L}^{-1} \Big( \mathcal{L} \{ f(x) \} \cdot \mathcal{L} \{ g(x) \} \Big).$ 

С учетом (2) и (3) перепишем выражение (1):

$$P(\overline{A})(l, v, t_{\text{ckah}}) =$$

$$= \int_{\frac{l}{v} - t_{\text{cy}}}^{\infty} f_{\text{3a}, t}(t) \cdot F_{\text{OTK}, t}(t + t_{\text{cy}} - \frac{l}{v}) dt +$$

$$+ \int_{0}^{t_{\text{cy}}} f_{\text{OTK}, t}(t) \cdot \int_{\frac{l}{v} - t}^{\infty} (f_{\text{повт. cy}} * f_{\text{3a}, t})(\tau) d\tau dt.$$

$$(4)$$

Подставлять исходные данные в (4) и преобразовывать выражение дальше в статье не имеет большого смысла, поэтому остановимся на полученном результате и перейдем к численной оценке вероятности пропуска меток.

Для вычисления вероятности пропуска меток по формуле (4) была выбрана система ком-

пьютерной алгебры Maxima\*. Исходный код авторского решения с комментариями представлен на рис. 2.

# Верификация результатов моделирования

В графической форме результаты вычислений приведены на рис. 3. Полученные значения соответствуют наблюдениям на перегонах 4-й линии метрополитена, согласно которым вероятность пропуска меток при времени сканирования, равном 1 с, составляет 1,2·10<sup>-4</sup> (результат получен путем обработки логов аппаратуры СБПП).

#### Заключение

Результаты моделирования свидетельствуют, что при увеличении времени сканирования с 1 с до возможного значения 65 с вероятность пропуска меток уменьшается примерно

<sup>\*</sup> URL: http://maxima.sourceforge.net/ru.

на два порядка для максимально допустимых в метрополитене скоростей поездов.

# Библиографический список

- 1. Костроминов А. М. Регрессионная модель зоны радиовидимости для системы бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена / А. М. Костроминов, Т. В. Крючкова // Транспорт Урала: науч.-технич. журн. 2012. 34, № 3. С. 49—53.
- 2. Костроминов А. М. Алгоритм функционирования системы управления движением электроподвижного состава в метрополитене на базе RFID-технологии / А. М. Костроминов, Т. В. Крючкова // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2014. Вып. 2. С. 42—48.
- 3. Костроминов А. М. Контроль состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП в условиях электродепо метрополитена / А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюляндин // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2016.—13, вып. 2.— С. 180—186.
- 4. Костроминов А. М. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена / А. М. Костроминов, М. Ю. Королев, В. В. Гаврилов, Т. В. Крючкова // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2009. Вып. 3. С. 91—97.
- 5. Дшхунян В. Л. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты / В. Л. Дшхунян, В. Ф. Шаньгин. М.: ООО «Изд-во АСТ»; Изд-во «НТ Пресс», 2004. 695 с.
- 6. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice / D. M. Dobkin. Newton, MA, USA: Newnes, 2007. 504 p.
- 7. Finkerzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. 2<sup>nd</sup> ed. / K. Finkerzeller. Chichester, West Sussex, England: Willey, 2003. 427 p.
- 8. GS1 EPCglobal Inc.— EPC<sup>TM</sup> Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015.— Online; accessed 11 April 2016.— URL: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2\_Protocol\_Standard.pdf (дата обращения: 11.04.2016).

- 9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд. / Е.С. Вентцель. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
- 10. Davidson A. C. Statistical Models / A. C. Davidson. Cambridge, NY, USA: Cambridge University Press, 2008. 726 p.
- 11. Freedman D. Statistics. International student edition. 4<sup>th</sup> ed. / D. Freedman, R. Pisani, R. Purves. New York, NY, USA: W. W. Norton & Company, 2007. 720 p.
- 12. Hogg R. Introduction to Mathematical Statistics. 6<sup>th</sup> ed. / R. Hogg, A. Craig, J. McKean. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 692 p.

#### References

- 1. Kostromynov A. M. & Kruchkova T. V. Regressionnaya model zony radiovydymosty dlya systemy beskontaktnoy pryvyazky k puty podvyzhnogo sostava metropolytena [A regression model of radio visibility zone for the system of contactless connection to the tracks of an underground rolling stock]. *Transport of the Urals*, 2012, vol. 34, no. 3, pp. 49–53. (In Russian)
- 2. Kostromynov A.M. & Kruchkova T.V. Algorytm funktsionyrovaniya systemy upravleniya dvyzheniyem elektropodvyzhnogo sostava v metropolytene na baze RFID-tekhnologii [Operation algorithm of an electric stock control system in a subway based on RFID-technology]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2014, issue 2 (39), pp. 42–48. (In Russian)
- 3. Kostromynov A. M., Rakhmanyn S. A., Smyrnov B. O. & Tulyandyn O. N. Kontrol sostoyaniya reader-antennogo trakta apparatury SBPP v usloviyakh elektrodepo metropolytena [Condition monitoring of an SBPP reader-aerial route under conditions of subway electric engine house]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2016, vol. 13, issue 2, pp. 180–186. (In Russian)
- 4. Kostromynov A. M., Korolev M. Y., Gavrylov V. V. & Kruchkova T. V. Prymeneniye RFID-tekhnologiy v systeme avtovedeniya poyezdov metroplolytena [Application of RFID-technologies in the system of automatic subway trains operation]. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2009, issue 3 (20), pp. 91–97. (In Russian)
- 5. Dshkhunyan V. L. & Shangyn V. F. *Elektron-naya identifikatsiya*. *Beskontaktniye elektronniye iden-*

tyfikatory i smart-karty [Electronic identification. Contactless electronic identifiers and smart cards]. Moscow, OOO "AST" Publ., NT Press Publ., 2004, 695 p. (In Russian)

- 6. Dobkin D. M. *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice*. Newton, MA, USA, Newnes Publ., 2007, 504 p.
- 7. Finkerzeller K. *RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. 2<sup>nd</sup> ed. Chichester, West Sussex, England, Willey Publ., 2003, 427 p.
- 8. GS1 EPCglobal Inc. EPC<sup>TM</sup> Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015. –

- URL: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2 Protocol Standard.pdf (accessed: 11.04.2016).
- 9. Venttsel Y. S. *Teoriya veroyatnostey* [*The theory of probability*]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p. (In Russian)
- 10. Davidson A. C. *Statistical Models*. Cambridge, NY, USA, Cambridge University Press, 2008, 726 p.
- 11. Freedman D., Pisani R. & Purves R. *Statistics*. *International student edition*. 4<sup>th</sup> ed. New York, NY, USA, W. W. Norton & Company Publ., 2007, 720 p.
- 12. Hogg R., Craig A. & McKean J. *Introduction to Mathematical Statistics*. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey, Prentice Hall Publ., 2004, 692 p.

КОСТРОМИНОВ Александр Михайлович – доктор техн. наук, профессор, triak@grozon.spb.ru; КОСТРОМИНОВ Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, alkostrom@gmail.com; \*ТЮЛЯНДИН Олег Николаевич – аспирант, tyulyandin@vklay.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.42

# В. А. Мнацаканов

# ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Дата поступления: 10.10.2017 Решение о публикации:13.11.2017

#### Аннотация

Цель: Вывести в простом и понятном виде основной закон электрической тяги, который прямо связывает удельную электрическую мощность тяговой сети и развиваемую тяговым приводом электроподвижного состава удельную пусковую мощность тяги с основными параметрами его движения – скоростью и ускорением. Методы: Применен предложенный Эйнштейном метод «идеализированного эксперимента», дополненный введенным автором условием ограниченности мощности тяговой сети. На основе этих допущений получены закон полного поля для разгона электроподвижного состава с постоянным ускорением и закон ослабленного поля для его разгона в условиях постоянной мощности тяги. Результаты: Установлены аналитические зависимости, представляющие собой уравнения проектирования электрической тяги. Впервые выведены три следствия из закона ослабленного поля, которые показывают, как меняются время разгона и пройденный электроподвижным составом при разгоне путь при варьировании зонами регулирования тяги: зоной работы с постоянным ускорением и зоной работы с постоянной мощностью. Выводы, сделанные на основе указанных следствий, подтверждены примерами расчетов и результатами испытаний вагонов метрополитена. Показано, что результаты теоретических расчетов по уравнениям проектирования совпадают с результатами испытаний с точностью 5-7%. Отмечается, что в ряде случаев сравнительные теоретические расчеты по уравнениям проектирования могут дать более высокую точность, чем результаты испытаний, поскольку погрешность приборов может превысить погрешность теоретических расчетов, выполненных с вышеуказанными допущениями. Практическая значимость: Полученные уравнения проектирования целесообразно ввести в электрическую тягу, поскольку с их помощью можно теоретически исследовать вопросы проектирования и выбора параметров электрической тяги. Они помогут читателю глубоко проникнуть в электрическую тягу, в ее законы и следствия из них и ощутить радость творчества в этой сфере человеческих знаний, как однажды ощутил ее сам автор.

**Ключевые слова:** Электрическая тяга, идеализированный эксперимент, законы, уравнения проектирования.

Valeriy A. Mnatsakanov, Cand. Sci. Eng., director general, associate fellow at Russian Academy of Engineering, kamotltd@gmail.com (OOO «TOMAK LTD») THE LAWS OF ELECTRIC TRACTION

#### Summary

**Objective:** To derive the fundamental law of electric traction in a simple and clear form, which connects directly the specific electric power of electric traction network and the specific starting power of traction, developed by an electric stock towline, with the basic parameters of movement of an electric stock – speed and acceleration. **Methods:** Einstein's method of "idealized experiment" was applied, complemented with a condition of electric traction boundedness of the network, introduced by the author. On the basis of the assumptions in question, the law of total field for electric stock speedup with constant acceleration and the law of weak field for its speedup in conditions of constant traction power were obtained. **Results:** Analytical dependencies were established representing the equations of electric traction projection. Three corollaries were first derived from the law of weak field, showing the way acceleration time and the speedup distance of an electric stock were changing under the diversity of traction control

zones: the zone of operation with constant acceleration, the zone of operation with constant power. The conclusions made on the basis of the given corollaries were verified by the examples of calculations and transit vehicles testing results. It was shown, that the results of theoretical calculations which follow from projection equations were 5–7% in agreement with testing results. It should be noted, that in some cases the comparative theoretical calculations, derived from equations of design, may present higher accuracy than testing results, as the number of errors in theoretical equations, performed with the assumptions stated above, may be exceeded by the number of instrument errors. **Practical importance:** It is advisable to introduce the obtained equations of design in electric traction, as the latter make it possible to study the issues of design and selection of electric traction parameters in theory. The equations will help the reader to obtain an understanding of electric traction, its laws and corollaries and feel the joy of creation in this sphere of human knowledge, as it once did the author of the study.

**Keywords:** Electric traction, idealized experiment, laws, equations of design.

Электрическая тяга — наука о превращении электроподвижным составом электрической энергии в механическую работу [1]. Тяговый привод развивает заданную мощность и создает тягу, обеспечивает ускорение и повышает скорость электроподвижного состава. Соотношения между электрической мощностью, скоростью и ускорением определяют параметры основных режимов работы электрической тяги.

Электрическая тяга получает питание от контактной сети, одним из главных свойств которой является ограниченность мощности ( $P_c = \text{const}$ ) [2]. Из этой предпосылки можно вывести основные законы электрической тяги.

## Закон полного поля

Рассмотрим разгон вагона метрополитена, оснащенного тяговыми двигателями постоянного тока и системой их безреостатного пуска, на прямом горизонтальном пути от начала движения до выхода тяговых двигателей на естественную характеристику полного возбуждения.

Следуя классической физике, рассмотрим «идеализированный эксперимент», в котором отсутствует сопротивление движению. «Идеализированный эксперимент никогда не может быть осуществлен, так как невозможно исключить все внешние влияния. Но он ука-

зывает путь, на котором были установлены основы механики движения» [3, с. 364].

При отсутствии сопротивления движению, которое в этом режиме составляет около 5% от силы тяги, для пуска вагона с постоянным пусковым ускорением имеем следующие соотношения:

$$P_{\Pi} \cdot \eta_{3} = F_{\Pi} \cdot V_{\Pi}, \tag{1}$$

где  $P_{_{\rm II}}$  — пусковая мощность на валу тяговых двигателей, Вт,  $P_{_{\rm II}}=P_{_{\rm C}}-\Delta P;$   $P_{_{\rm C}}$  — мощность, потребляемая тяговым приводом из сети, Вт;  $\Delta P$  — потери мощности в тяговом приводе, Вт;  $\eta_{_3}$  — КПД зубчатой передачи,  $\eta_{_3}\approx 0.97;$   $V_{_{\rm II}}$  — пусковая скорость при полном возбуждении (при максимальной мощности) тяговых двигателей, м/с;  $F_{_{\rm II}}$  — сила тяги на ободе колеса в режиме пуска, Н:

$$F_{\Pi} = m_{\rm B} (1 + \gamma) a_{\Pi}, \qquad (2)$$

здесь  $m_{_{\rm B}}$  — инерционная масса вагона, кг;  $(1+\gamma)$  — коэффициент инерции вращающихся масс,  $(1+\gamma)\approx 1{,}07; \ a_{_{\rm II}}$  — пусковое ускорение, м/с<sup>2</sup>.

Формула (2) без  $(1+\gamma)$  представляет собой известный закон движения Ньютона. В статье «К 200-летию со дня смерти Исаака Ньютона», написанной в 1927 г., Эйнштейн назвал эту формулу «фундаментом всей механики и, пожалуй, всей физики». На ее основе выведем основные формулы электрической тяги.

Подставив (2) в (1), имеем

$$P_{_{\Pi}} \mathfrak{g}_{_{3}} = m_{_{\mathbb{R}}} (1 + \gamma) a_{_{\Pi}} V_{_{\Pi}}.$$
 (3)

После преобразований получим формулу, представляющую собой **Основной закон электрической тяги**, поскольку он прямо связывает удельную пусковую мощность тяги с основными параметрами движения — скоростью и ускорением электроподвижного состава:

$$p_{_{\Pi}} \mathfrak{y}_{_{3}} = a_{_{\Pi}} V_{_{\Pi}}, \tag{4}$$

где  $p_{_{\Pi}}$  — удельная пусковая мощность тяги, кВт/т, определяемая как

$$p_{\Pi} = \frac{P_c - \Delta P}{m_{\nu}(1 + \gamma)} = \frac{P_{\Pi}}{m_{\nu}(1 + \gamma)}.$$
 (5)

Для времени разгона с постоянным ускорением имеем

$$t_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{a_{\Pi}}.\tag{6}$$

Подставив в соотношение (6) формулу (4), получим уравнение, представляющее собой **Закон полного поля**:

$$t_{\pi} = \frac{V_{\pi}^2}{p_{\pi} \eta_{\alpha}}.\tag{7}$$

Закон полного поля: при ограниченной мощности источника питания и разгоне вагона с постоянным ускорением время достижения им скорости выхода тяговых двигателей на полную мощность (на характеристику полного поля) прямо пропорционально квадрату этой скорости.

Для пути при разгоне с постоянным ускорением справедливо:  $S = \frac{at^2}{2}$  .

Подставив сюда (4) и (7), получим

$$S_{\pi} = \frac{V_{\pi}^3}{2p_{\pi}\eta_3},\tag{8}$$

где  $S_{_{\Pi}}$  – путь при разгоне с постоянным ускорением до скорости  $V_{_{\Pi}}$ , м.

**Пример 1.** Разгон вагона метро, оснащенного тяговыми двигателями постоянного тока типа ДК-117, до скорости их выхода на естественную характеристику полного возбуждения ( $V_{\rm n}$ ). Удельная пусковая мощность тягового привода вагона в этом режиме с достаточной точностью может быть определена по формуле

$$p_{_{\Pi}} = \frac{[mU_{_{\rm C}} - n_{_{\rm JB}} r_{_{\rm JB}} I_{_{\rm S}}]I_{_{\rm S}}}{m_{_{\rm B}}(1+\gamma)},\tag{9}$$

где m — число параллельных групп тяговых двигателей, m = 2;  $U_{\rm c}$  — напряжение контактной сети, B;  $n_{_{\rm дВ}}$  — число тяговых двигателей на вагоне,  $n_{_{\rm дВ}}$  = 4;  $r_{_{\rm дВ}}$  — сопротивление обмоток тягового двигателя,  $r_{_{\rm дВ}}$   $\approx$  0,1 Ом;  $I_{_{\rm g}}$  — ток якоря, A;  $m_{_{\rm B}}$  — масса вагона с максимальной нагрузкой,  $m_{_{\rm B}}$  = 57 т.

При напряжении  $U_{\rm c} = 850~{\rm B}$  и токе якоря  $I_{\rm g} = 440~{\rm A}$ 

$$p_{\text{II}} = \frac{[2 \cdot 850 - 4 \cdot 0, 1 \cdot 440] \cdot 440}{57 \cdot 1,07} = 11 \text{ kBt/t.}$$

При  $V_{_{\Pi}}=30$  км/ч (8,33 м/с) и  $\eta_{_{3}}=0,97$  получим

$$t_{\rm m} = \frac{V_{\rm m}^2}{p_{\rm m} \eta_{\rm a}} = \frac{8.33^2}{11 \cdot 0.97} = 6.5 \text{ c},$$

$$S_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}^3}{2p_{\Pi}\eta_3} = \frac{8,33^3}{2\cdot11\cdot0,97} = 27,1 \text{ M},$$

$$a_{\text{II}} = \frac{p_{\text{II}}\eta_{\text{3}}}{V_{\text{II}}} = \frac{11 \cdot 0.97}{8.33} = 1.28 \text{ m/c}^2.$$

Ценность формул для  $t_n$ ,  $S_n$  и  $a_n$  состоит в том, что они действительны для любого типа тягового электропривода. По ним легко анализировать, как влияют тяговые параметры вагона  $(p_n, V_n)$  на параметры разгона  $(a_n, t_n, S_n)$ .

Если для расчета  $P_{\rm n}$  затруднительно определить потери мощности в тяговом приводе

 $(\Delta P)$ , то в первом приближении можно воспользоваться формулой с КПД:

$$P_{\rm m} = P_{\rm c} \, \eta_{\rm m}$$

где  $\eta_{_{TII}}=0.85$ –0.9 – КПД привода с тяговыми двигателями постоянного тока;  $\eta_{_{TII}}=0.8$ –0.85 – КПД привода с тяговыми двигателями переменного тока.

Опытные данные показывают, что левая и правая части формулы (4) не равны друг другу. Расхождение между ними составляет ту удельную мощность тяги, которая идет на преодоление сопротивления движению. Таким образом, для каждого момента разгона можно опытным путем с достаточной точностью, по разнице левой и правой частей формулы (4), устанавливать величину сопротивления движению. Это открывает новые возможности для измерения величины сопротивления движению при езде «под током».

#### Закон ослабленного поля

Процесс разгона вагона в период, когда его тяговый привод развивает постоянную мощность, описывается уравнением

$$t = \int_{0}^{v} \frac{dv_i}{a_i},\tag{10}$$

где t — время разгона, с; v — скорость, м/с;  $a_i$  — текущее значение ускорения, м/с².

Как следует из (4),

$$a_i = \frac{p_{\pi} \eta_3}{v_i}. (4')$$

Подставив (4') в (10) и проинтегрировав, получим

$$t = \int_{0}^{\nu} \frac{v_i dv_i}{p_{\Pi} \eta_3} = \frac{V^2}{2p_{\Pi} \eta_3}.$$
 (11)

С учетом (11) найдем, что время ( $\Delta t$ ) разгона от скорости  $V_1$  до скорости  $V_2$  при постоянной мощности тягового привода составит

$$\Delta t = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2p_{\Pi}\eta_3}.$$
 (12)

Суммарное время  $(t_{on})$  разгона до скорости  $V_{on}$  при постоянном ускорении в диапазоне скоростей  $0-V_{n}$  и при постоянной мощности привода в диапазоне скоростей  $V_{n}-V_{on}$  можно рассчитать по формуле, представляющей собой Закон ослабленного поля:

$$t_{\text{on}} = t_{\text{n}} + \Delta t_{\text{on}} = \frac{V_{\text{n}}^{2}}{p_{\text{n}} \eta_{3}} + \frac{V_{\text{on}}^{2} - V_{\text{n}}^{2}}{2p_{\text{n}} \eta_{3}} = \frac{V_{\text{n}}^{2} + V_{\text{on}}^{2}}{2p_{\text{n}} \eta_{3}},$$
(13)

где  $t_{_{\rm II}}$  — время разгона с постоянным ускорением, с;  $\Delta t_{_{\rm OII}}$  — время разгона с постоянной мощностью, с.

Закон ослабленного поля: при разгоне с постоянным ускорением до скорости полного возбуждения, а затем с постоянной мощностью до скорости ослабленного возбуждения время достижения скорости ослабленного возбуждения прямо пропорционально полусумме квадратов скоростей полного и ослабленного возбуждения.

Основываясь на (13), можно рассчитать разницу во времени разгона до скорости  $V_{\text{оп}}$  в следующих случаях:

- 1)  $V_{_{\Pi}} < V_{_{\rm on}}$  (вариант с регулированием возбуждения)  $t_{_{\rm on1}}$ ;
- 2)  $V_{_{\Pi}} = V_{_{\text{оп}}}$  (вариант без регулирования возбуждения)  $t_{_{\Pi^2}}$ .

Время разгона во втором случае будет больше, чем в первом, на величину  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_{n2} - t_{on1} = \frac{V_{on}^2}{p_n \eta_0} - \frac{V_n^2 + V_{on}^2}{2 p_n \eta_0} = \frac{V_{on}^2 - V_n^2}{2 p_n \eta_0}.$$
 (14)

Законы, если они таковыми являются, должны позволять формулировать следствия, вытекающие из них и дающие новые знания [3].

Сравнение (14) и (12) позволяет сформулировать **Первое следствие** из закона ослабленного поля:

при питании от источника ограниченной мощности проигрыш во времени разгона до заданной скорости при разгоне без регулирования возбуждения по сравнению с вариантом, имеющим зону регулирования возбуждения, равен времени движения при регулировании возбуждения.

Путь, пройденный вагоном при разгоне до скорости  $V_{\rm or}$ , составит

$$S_{\text{on}} = S_{\text{n}} + \Delta S_{\text{on}} = \frac{V_{\text{n}}^3 + 2V_{\text{on}}^3}{6p_{\text{n}}\eta_3},$$
 (15)

где  $S_{_\Pi}$  – путь разгона до скорости  $V_{_\Pi}$  с постоянным ускорением, м;  $\Delta S_{_{\rm on}}$  – путь разгона от  $V_{_\Pi}$  до  $V_{_{\rm on}}$  с постоянной мощностью, м.

По аналогии с **Первым** можно сформулировать **Второе следствие** из закона ослабленного поля:

при питании от источника ограниченной мощности путь, пройденный при разгоне до заданной скорости без регулирования возбуждения тяговых двигателей, будет больше пути, пройденного при разгоне с регулированием возбуждения, на величину, равную половине пути, пройденному в режиме регулирования возбуждения.

Из анализа уравнений полного и ослабленного поля вытекает **Третье следствие:** 

при питании от источника ограниченной мощности отказ на проектируемом электроподвижном составе от регулирования возбуждения тяговых двигателей (отказ от использования зоны регулирования постоянной мощности) ведет к проигрышу по времени и пути разгона и, как следствие, к перерасходу электроэнергии на тягу при движении на заданном перегоне с заданной скоростью сообщения.

#### Пример 2.

1. При разгоне вагона до скорости  $V_{\rm on}$  с регулированием возбуждения ( $p_{_{\rm II}}=11~{\rm kBT/T},~V_{_{\rm II}}=30~{\rm km/q}$  и  $V_{_{\rm OII}}=60~{\rm km/q}$ ) время разгона и путь составят

$$t_{\text{off}} = \frac{V_{\text{ff}}^2 + V_{\text{off}}^2}{2p_{\text{ff}}\eta_3} = \frac{8,33^2 + 16,67^2}{2 \cdot 11 \cdot 0,97} = 16,27 \text{ c},$$

$$S_{\text{ori}} = \frac{V_{\text{ii}}^3 + 2V_{\text{ori}}^3}{6p_{\text{ii}}\eta_3} = \frac{8,33^3 + 2 \cdot 16,67^3}{6 \cdot 11 \cdot 0,97} = 153,7 \text{ M}.$$

2. При разгоне вагона до скорости  $V_{\rm on}$  с постоянным ускорением и без регулирования возбуждения ( $p_{\rm n}=11~{\rm kBT/T},~V_{\rm n}=V_{\rm on}=60~{\rm km/q}$ ) время разгона и путь составят

$$t_{\text{on}} = \frac{V_{\text{on}}^2}{p_{\text{n}}\eta_{\text{a}}} = \frac{16,67^2}{11 \cdot 0,97} = 26,04 \text{ c},$$

$$S_{\text{orf}} = \frac{V_{\text{orf}}^3}{2p_{\text{r}}\eta_{\text{r}}} = \frac{16,67^3}{2\cdot11\cdot0,97} = 217 \text{ M}.$$

Время разгона во втором случае больше, чем в первом, на 9,77 с (26,04-16,27=9,77 с). Эта разница равна времени движения вагона при регулировании возбуждения (16,27-6,5=9,77 с). Об этом говорит **Первое следствие** из закона ослабленного поля.

Путь (217 м), пройденный вагоном во втором случае (без регулирования возбуждения), больше, чем путь, пройденный им в первом случае (при регулировании возбуждения) (153,7 м) на 63,3 м. Эта величина (63,3 м) равна половине пути 126,6 м (153,7 – 27,1 = 126,6 м), пройденному вагоном в первом случае, за время регулирования возбуждения. Об этом говорит **Второе следствие** из закона ослабленного поля:

$$\Delta S_{\text{ori}} = \frac{V_{\text{ori}}^3 - V_{\text{ri}}^3}{3p_{\text{ri}}\eta_3} = \frac{16,67^3 - 8,33^3}{3 \cdot 11 \cdot 0,97} = 126,6 \text{ m}.$$

Приведенные формулы дают вполне приемлемую точность при сравнительных расчетах, когда делается, например, выбор между двумя группами тяговых двигателей, которые предполагается установить на вагон и которые не намного отличаются друг от друга значениями  $V_{\rm n}$ . В этом случае не учет влияния сопротивления движению примерно одинаково отражается на результатах расчетов в каждом из вариантов. Это обеспечивает точность сравнительных расчетов по времени, пути и расходу электроэнергии.

Следует отметить, что аналогичные формулы могут быть выведены для режима электрического торможения электроподвижного состава.

Представим результаты, полученные при испытаниях вагонов метро и определенные по формулам (7), (8), (13), (15):

$$t_{\text{II}}$$
, с  $S_{\text{II}}$ , м  $t_{\text{on}}$ , с  $S_{\text{on}}$ , м Расчет.....8,6 38 30 376 Опыт .....8,8 40 32,2 400

Расчетные и опытные данные были получены при  $p_{_{\rm II}}=9,13~{\rm kBT/T},~V_{_{\rm II}}=31,5~{\rm km/ч},~V_{_{\rm II}}=76,7~{\rm km/ч}.$ 

Как видно, результаты расчетов и опытные данные совпали с точностью 5–7%, что вполне приемлемо для практических целей.

Также эффективно теоретические формулы могут быть применены, когда требуется оценить, насколько изменятся время разгона и путь при увеличении или уменьшении  $V_{\rm n}$ , т. е. при варьировании диапазонами регулирования постоянной силы тяги и постоянной мощности.

В ряде случаев сравнительные теоретические расчеты могут дать даже более высокую точность, чем результаты испытаний, поскольку погрешность приборов при реальных измерениях может превысить погрешность теоретических расчетов, не учитывающих только разницу в сопротивлениях движению сравниваемых объектов, которая может быть незначительной.

Способ исключения влияния сопротивления движению на результаты сравнительных расчетов может быть использован для оценки величин погрешности измерений при проведении особо точных экспериментальных исследований, а также для проверки измерительной аппаратуры перед началом тягово-энергетических испытаний. Это сформирует новый подход к использованию теории и эксперимента, например, при проектировании электрической тяги для особо ответственных установок.

Уравнения движения электропоезда, используемые в электрической тяге [4–12], представляют собой математические форму-

лы, описывающие и объясняющие эмпирический материал, накопленный при многократном наблюдении перемещений реально существовавших объектов. Они сложны, требуют вычислений удельных равнодействующих сил и их составляющих. Значения и воздействие этих сил трудно себе физически представить. Поэтому с их помощью сложно проектировать тягу даже при наличии компьютеров.

Уравнения (4), (7), (8), (13), (15) можно назвать уравнениями проектирования. Они позволяют сопровождать процесс «мысленного проектирования» и «мысленного перемещения». Их идеализированный объект нельзя реально увидеть, а можно лишь его себе представить. Например, в виде некоторой абстрактной электротяговой установки с непрерывно меняющимися параметрами, такими, как ее инерционная масса, удельная пусковая мощность, характеристики ее тяговых двигателей, скорость их выхода на характеристику полного возбуждения и др.

Почему следует ввести уравнения проектирования в электрическую тягу? Потому, что с их помощью легко и просто теоретически исследовать вопросы проектирования и выбора параметров электротяговых устройств. И делать это более наглядно и основательно, чем без них.

Автор надеется, что уравнения проектирования помогут заинтересованному читателю глубоко проникнуть в электрическую тягу, осознать уровень своей подготовки и поверить в свои силы. А затем быстро перейти к творчеству в этой сфере человеческих знаний и ощутить радость самого творчества, как однажды ощутил ее сам автор.

# Библиографический список

- 1. Мнацаканов В. А. Основания электрической тяги / В. А. Мнацаканов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. 2007. Вып. 2 (11). С. 194–199.
- 2. Мнацаканов В. А. К теории тяговых параметров вагонов метрополитена / В. А. Мнацаканов. —

Труды ВНИИ вагоностроения. – 1975. – Вып. 26. – C. 89–103.

- 3. Эйнштейн А. Собр. науч. трудов: в 4 т. / А. Эйнштейн; пер. и под ред. И. Е. Тамма и др. М.: Наука, 1967. Т. 4. 599 с. (см. с. 357–543).
- 4. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. М. : Транспорт, 1983. 328 с.
- 5. Фергусон Т. Основы проектирования электрической тяги / Т. Фергусон ; пер. с англ. Л. В. Гуткина [и др.] ; под ред. А. П. Михеева. М. : Трансжелдориздат, 1957. 407 с.
- 6. Шевалин В. А. Выбор тягового электродвигателя / В. А. Шевалин. М. : Трансжелдориздат, 1934.-126 с.
- 7. Хвостов В.С. Теория тягового двигателя электровоза / В.С. Хвостов // Труды МИИТ. 1962. Вып. 156. С. 4—136.
- 8. Гаврилов Я.И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я.И. Гаврилов, В.А. Мнацаканов. М.: Транспорт, 1986. 230 с.
- 9. Лебедев А.Б. Основы электрической тяги / А.Б. Лебедев. Л.: ОНТИ, 1937. 620 с.
- 10. Мнацаканов В. А. Форсажный тяговый привод / В. А. Мнацаканов // Железнодорожный транспорт. -2006. № 2. С. 50—54.
- 11. Шевалин В. А. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев / В. А. Шевалин. Л. : Кубуч, 1931. 336 с.
- 12. Осипов С. И. Теория электрической тяги / С. И. Осипов, С. С. Осипов, В. П. Феоктистов. М. : Маршрут, 2006. 435 с.

## References

- 1. Mnatsakanov V. A. Osnovaniya elektrycheskoy tyagy [Foundations of electric traction]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2007, issue 2 (11), pp. 194–199. (In Russian)
- 2. Mnatsakanov V.A. K teorii tyagovykh parametrov vagonov metropolytena [On the theory of traction parameters of transit vehicles]. *Trudy VNII vagono*-

- stroyeniya [Proceedings of All-Russian research institute of car building], 1975, issue 26, pp. 89–103. (In Russian)
- 3. Einstein A. *Sobraniye nauchnykh trudov* [*Collected papers*]. In 4 vol. Tr. and red. by I. E. Tamm et al. Moscow, Nauka Publ., 1967, vol. 4, 599 p. (see pp. 357–543). (In Russian)
- 4. Rosenfeld V.Y., Isayev I.P. & Sydorov N.N. *Teoriya elektrycheskoy tyagy* [*The theory of electric traction*]. Moscow, Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)
- 5. Ferguson T. *Osnovy proyektyrovaniya elektry-cheskoy tyagy* [*Electric railway engineering*]. Tr. from English by L. V. Gutkyna et al.; ed. by A. P. Mikheyev. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1957, 407 p. (In Russian)
- 6. Shevalyn V.A. *Vybor tyagovogo elektrodvygatelya* [*The selection of a tractive motor*]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1934, 126 p. (In Russian)
- 7. Khvostov V. S. Teoriya tyagovogo dvygatelya elektrovoza [The theory of a locomotive tractive motor]. *Trudy MIIT* [*Proceedings of Moscow State Transport University*] Publ., 1962, issue 156, pp. 4–136. (In Russian)
- 8. Gavrylov Y. I. & Mnatsakanov V. A. *Vagony metropolytena s impulsnymy preobrazovatelyamy* [*Transit vehicles with switching converters*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 230 p. (In Russian)
- 9. Lebedev A.B. *Osnovy elektrycheskoy tyagy* [*The fundamentals of electric traction*]. Leningrad, ONTI (Joint Institute of Science and Technology) Publ., 1937, 620 p. (In Russian)
- 10. Mnatsakanov V.A. Forsazhniy tyagoviy pryvod [Augmented towline]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 2006, no. 2, pp. 50–54 (In Russian)
- 11. Shevalyn V.A. *Tyagoviye raschety elektry-cheskykh zheleznykh dorog i tramvayev* [*Grade computations of electric railways and street cars*]. Leningrad, Kubuch, 1931, 336 p. (In Russian)
- 12. Osypov S. I., Osypov S. S. & Feoktystov V. P. *Teoriya elektrycheskoy tyagy* [*The theory of electric traction*]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 435 p. (In Russian)

МНАЦАКАНОВ Валерий Александрович – канд. техн. наук, генеральный директор, член-корреспондент Российской инженерной академии, kamotltd@gmail.com (ООО «ТОМАК ЛТД»). УДК 625.031.05

# А. М. Орлова, В. И. Фёдорова

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕСУРСА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ КОЛЕС НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВАГОНАМИ МОДЕЛИ 12–9853 НА ТЕЛЕЖКАХ 18–9855 С ОСЕВОЙ НАГРУЗКОЙ 25 ТС

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Определить основные тенденции проектирования поверхности катания колес на примере стран, которые входят в Международную ассоциацию тяжеловесного движения (IHHA), а также период приработки колес полувагонов, находящихся в подконтрольной эксплуатации на тележках модели 18-9855, и произвести расчет ресурса поверхности катания колеса в зависимости от условий эксплуатации. **Методы:** Применены методы математического анализа и эмпирический. **Результаты:** Установлены тенденции проектирования профиля колеса вагонов для тяжеловесного движения и направление развития осевых нагрузок грузовых вагонов. Рассчитан период приработки поверхности катания колеса и гребня, построены графики зависимостей темпа износа колеса от пробега. На основе экспериментальных данных в зависимости от условий эксплуатирования колес осуществлен теоретический расчет ресурса поверхности катания колеса и гребня, а также построен график зависимости толщины обода от пробега. **Практическая значимость:** Проведенный анализ тенденций проектирования профиля колеса в странах, входящих в ІННА, позволит определить основные геометрические размеры профиля колеса, а также, зная период приработки и форму колеса, которые эксплуатируются под тележками модели 18-9855, уточнить геометрию, которую в дальнейшем возможно применить для уточнения размеров и ее анализа.

**Ключевые слова:** Профиль поверхности катания, период приработки, темп износа, прокат, ресурс.

Anna M. Orlova, D. Sci. Eng., professor, a-orlova@yandex.ru (PJSC "Research and production corporation United wagon company"); \*Veronika I. Fedorova, engineer, nika.veronika-fedorova@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THEORETICAL CALCULATION OF WHEEL THREAD ENDURANCE BASED ON EXPERIMENTAL OBSERVATIONS OF 1209853 MODEL CARS ON 12-9853 MODEL BOGIES WITH 25 TNF AXLE LOADING

# **Summary**

**Objective:** To determine principal trends of wheel thread design, by the example of countries included into the International Heavy Haul Association (IHHA), as well as the burn-in period of wheels of open railroad freight cars under field performance program on bogies of 18-9855 model and to predict wheel thread endurance, depending on operation conditions. **Methods:** Methods of mathematical analysis as well as the empirical method was applied. **Results:** The trends of wheel profile design for heavy haul wagons, as well as the tendency of freight car axle loading development were established. The burn-in period of wheel thread and wheel flange was calculated, dependency graphs of wheel wear rate and mileage were constructed. On the basis of the experimental data, depending on the conditions of wheel maintenance, theoretical calculation of wheel thread and flange endurance was performed, as well as the dependency graph of rim thickness and mileage was constructed. **Practical importance:** The conducted analysis of trends of wheel thread profile design in IHHA countries will make it possible to determine the basic

geometrical dimensions of wheel profile. Moreover, knowing the burn-in period and the form of the wheels, which are used in bogies of 18-9855 model, it is possible to revise geometry which in future may be applied for the correction of dimensions and its analysis.

**Keywords:** Wheel thread profile, burn-in period, rate of wear, wheel tread wear, endurance.

#### Введение

В России поиск формы профиля колес на начальном этапе развития железнодорожного транспорта осуществлялся железными дорогами самостоятельно, так как они были обособлены и отсутствовали единые подходы и требования к их созданию [1]. В 1881 г. был сделан первый шаг, чтобы унифицировать профиль, и им стало установление единого расстояния между внутренними гранями колес колесных пар. В 1926 г. на сети железных дорог СССР был введен объединенный профиль колес для вагонов и локомотивов, который практически без изменений используется по настоящее время на пассажирских и грузовых вагонах, а также на вагонах электропоездов. На рис. 1, а-г представлены профили, используемые в России: 1) профиль по ГОСТ 10791 (рис. Б.1) предназначен для грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, немоторных вагонов и специализированного подвижного состава; 2) профиль по ГОСТ 11018–2000 – для тягового подвижного состава; 3) профиль по ГОСТ 10791 (рис. Б.2) для пассажирских вагонов с конструкционной скоростью более 160 км/ч; 4) профиль 200-М-70 специально разработан для скоростного электропоезда «САПСАН» [2].

В настоящее время актуальным является вопрос совершенствования конструкции грузового вагона для обеспечения тяжеловесного движения в России. К наиболее важным частям грузового вагона относится колесная пара, которая передает нагрузку на рельс от всей конструкции вагона. Повышение надежности колеса приобретает особое значение при росте осевых нагрузок и скорости движения, так как улучшение характера движения экипажа возможно либо за счет корректировки параметров экипажа, либо посредством разработки нового профиля колеса.

# Обзор профилей для тяжеловесного движения

В странах с развитым тяжеловесным движением, таких как США, ЮАР, Австралия, Индия, ведутся разработки улучшенного профиля колеса и используются разные подходы для проектирования. Например, в США профиль колеса (AAR-1B) построили за счет форм изношенных колес, полученных из эксплуатации с учетом дальнейшей доработки [3], в Украине данным методом были созданы профиль ИТМ-73 [4, 5] и его аналоги, но профиль ориентирован для применения в тележке модели 18-100 с осевой нагрузкой не более 23,5 тс. В Швеции и Китае форму профиля колеса получили с помощью методов оптимизации [6, 7], путем нахождения оптимальных параметров взаимодействия колеса с рельсом. Также одним из способов построения профиля является его разработка на базе развертки поперечного сечения рельса. В таблице в качестве сравнения приведены параметры профилей колес разных стран, которые входят в Международную ассоциацию тяжеловесного движения (ІННА) [8].

Из таблицы видно, что профили имеют абсолютно разные формы и толщину гребня, эксплуатируются при разнообразных условиях и с различной осевой нагрузкой. Также в странах, входящих в ІННА, кроме России и Индии, железнодорожная линия является специализированной и выделенной. Таким образом, из представленного обзора профилей колес было принято решение на основе подконтрольной эксплуатации полувагонов 12-9853 на тележках 18-9855, с учетом сложных климатических условий, провести расчет темпов износа поверхности катания колес, гребней и построить приработанный профиль [9], который будет использоваться на началь-

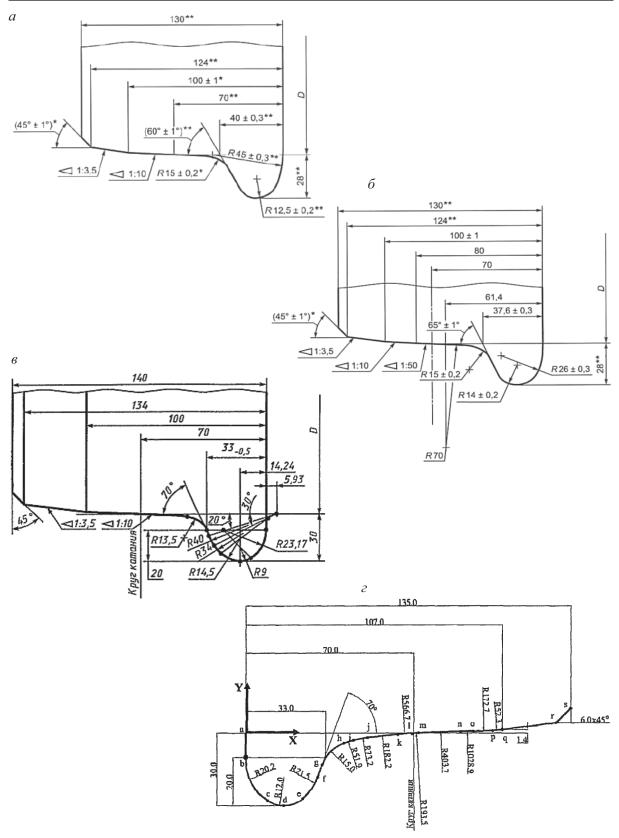


Рис. 1. Профили поверхности катания колес России: a — по ГОСТ 10791, рис. Б.1;  $\delta$  — по ГОСТ 10791, рис. Б.2;  $\epsilon$  — по ГОСТ 11018—2000;  $\epsilon$  — профиль 200-М-70

Основные геометрические характеристики профилей колес стран, входящих в ІННА

Наименование профиля	Форма профиля (конусность)	Толщина гребня, мм	Радиус выкружки, мм	Угол наклона гребня к горизонтали, град	Осевая на- грузка, тс
Россия, ГОСТ 10791	1:10	33	15	60	25
США, AAR-1B	1:20	33	14,3	75	32,5
Китай, LM профиль	Криволиней- ная	32	14	70	25
ЮАР, профиль	1:20	16	16	68	30
Индия, профиль	1:20	25	14	72	25
Австралия, ANZR1	1:20	30	16	70	до 40

ном этапе расчетов для дальнейшей его оптимизации.

# Определение темпов износа профиля колес в тележках модели 18-9855

На основе подконтрольной эксплуатации вагонов модели 12-9853 на тележках 18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс, которая снабжена колесными парами РВ2Ш-957-Г, удовлетворяющими требованиям ГОСТ 4835, с колесами повышенной твердости с криволинейным диском и профилем поверхности катания по ГОСТ 10791 (рис. 1, *a*), курсирующих на замкнутом маршруте между станциями Челутай Восточно-Сибирской дороги, и Ванино Дальневосточной дороги были определены темпы износа поверхности катания колес и темпы износа гребней колес [9]. Данные для расчета были взяты на основе комиссионных осмотров вагонов при среднем пробеге 65, 145, 210 и 315 тыс. км после осмотра при среднем пробеге в 400 тыс. км колеса вагонов были обточены, так как был достигнут износ по прокату, результаты замеров приведены в [9, 10].

Обмер профилей колес производился с использованием профилометра ИКП-5 [11] методом лазерного сканирования в четырех сечениях поверхности катания колеса (через

каждые  $90^{\circ}$ ). Толщина гребня определялась как расстояние, измеренное по горизонтали на высоте 18 мм от вершины гребня. Прокат находился как разность между измеренной на расстоянии 70 мм от наружной грани колеса высотой гребня и ее номинальным значением (28 мм). Погрешность измерений координат профилей колес составляет  $\pm 0.1$  мм.

Период приработки гребня колеса достигается при пробеге в 65 тыс. км, темп износа на момент приработки в среднем составляет 0,381 мм/10 тыс. км, в стационарном режиме он равен 0,034 мм/10 тыс. км (рис. 2).

Период приработки для поверхности катания колеса отличается от периода приработки гребня и достигается при пробеге, равном 210 тыс. км. В результате расчетов был определен темп износа на момент приработки и работы колеса в стационарном режиме — соответственно 0,73 и 0,71 мм/10 тыс. км (рис. 2).

# **Теоретический расчет ресурса поверхности катания колеса**

По результатам расчетов периода приработки и темпа износа поверхности катания и гребня колеса был выполнен теоретический расчет колеса по исчерпанию толщины обода. Для расчета было принято, что запас на износ

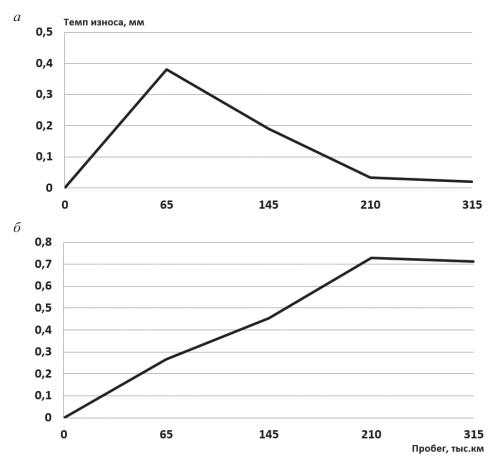


Рис. 2. График изменения темпов износа гребня колеса (a) и поверхности катания колеса (b) от пробега вагона

для гребня  $Z_{\rm гp}=8$  мм (с учетом, что профиль изначально выбран новый с толщиной гребня 33 мм) и поверхности катания  $Z_{\rm кат}=9$  мм (предельно допустимый прокат в эксплуатации), толщина обода в новом состоянии принималась равной 77,5 мм, допускаемая минимальная толщина обода по предельному износу в соответствии с [12] составляет 24 мм.

Рассчитаем предельный ресурс до обточки отдельно для гребня и поверхности катания:

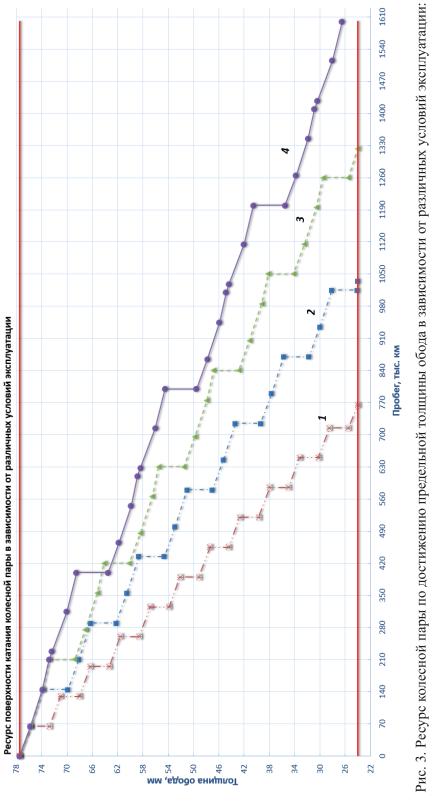
$$Z_{\mathrm{rp}} = \sum_{i=1}^{n=2} \dot{I}_i \cdot L_j,$$

$$Z_{\text{KAT}} = \sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{n=4} \dot{I}_i \cdot L_j,$$

где  $\dot{I}_i$  — темп износа, соответствующий каждому шагу расчета;  $L_j$  — пробег вагона, отвечающий каждому шагу расчета.

По результатам расчетов было определено, что ресурс гребня до обточки достаточно велик и составляет 1,7 млн км, в то же время поверхность катания исчерпает свой ресурс до обточки при пробеге 286 тыс. км.

Основываясь на данных подконтрольной эксплуатации полувагонов модели 12-9853 на тележках 18-9855, был произведен прогноз ресурса колеса по исчерпанию толщины обода, исходя из условия, что колесная пара будет обтачиваться по достижению максимального проката 9 мм (как и вагоны подконтрольной группы), а также для случаев предупредительных обточек через каждые 65, 145 и 210 тыс. км пробега (рис. 3). Приведенный расчет ресурса колеса не учитывает изменение твердо-



I- обточка каждые 65 тыс. км; 2- обточка каждые 145 тыс. км; 3- обточка каждые 210 тыс. км; 4- обточка по достижению проката 9 мм

сти и износостойкости по глубине обода ко-

При обточке колесной пары в среднем снимается от 3 до 8 мм слоя металла дополнительно к величине износа по кругу катания. В начальный период приработки процесс образования износа по кругу катания протекает медленнее, чем после приработки [13].

По вагонам эксплуатационной группы количество снимаемого металла после первой обточки составляет в среднем 5 мм (данное значение было принято при расчете ресурса колеса как максимальное с учетом наихудших условий и образования выщербин браковочного размера), которое обтачивается по достижению максимального проката; в остальных случаях для предупредительной обточки в 65, 145 и 210 тыс. км, исходя из ожидаемого износа поверхности катания, было принято соответственно 3, 4 и 4 мм снимаемого слоя металла.

Из прогнозируемого расчета ресурса колеса (см. рис. 3) видно, что для продления ресурса лучшим при эксплуатации является условие, когда колесная пара достигает проката в 9 мм, но это при том, что на поверхности катания не возникнут неисправности браковочного характера.

В качестве предупредительных мер до образования максимально допустимого проката и неисправностей возможно производить обточки каждые 145 или 210 тыс. км. Выполнять обточки каждые 65 тыс. км нецелесообразно, так как ресурс поверхности катания меньше в отличие от других случаев, и для грузовых вагонов обточка в каждые 65 тыс. км будет достаточно частой процедурой.

#### Заключение

На основе экспериментальных данных подконтрольной эксплуатации полувагонов 12-9853 на тележках 18-9855 было определено, что:

• период приработки гребня колеса достигается при пробеге в 65 тыс. км, темп износа

в период приработки в среднем составляет 0,381 мм/10 тыс. км, в стационарном режиме он равен 0,034 мм/10 тыс. км;

• период приработки для поверхности катания колеса отличается от периода приработки гребня и достигается при пробеге в 210 тыс. км. В результате расчетов был определен темп износа на момент приработки и работы колеса в стационарном режиме — соответственно 0,73 и 0,71 мм/10 тыс. км.

Полагаясь на экспериментальные данные, теоретический расчет ресурса колеса до обточки составляет 286 тыс. км для поверхности катания и 1,7 млн км для гребня.

Расчет прогнозируемого ресурса колеса по исчерпанию толщины обода в зависимости от различных условий эксплуатации показал, что, если выполнять предупредительные обточки колеса при пробеге, составляющем 65, 145 и 210 тыс. км, ресурс будет 765, 1,035 и 1,323 млн км соответственно. При проведении обточек по достижению максимального проката 9 мм ресурс колеса по исчерпанию толщины обода составляет 1,6 млн км.

# Библиографический список

- 1. Ромен Ю. С. Гармонизация профилей рельса и колесной пары / Ю. С. Ромен // Тез. докл. XI Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». Санкт-Петербург, 6–10 июля 2016 г. СПб.: ПГУПС, 2016. С. 20–22.
- 2. Максимов И. Н. Разработка профиля колес для скоростных поездов и прогнозирование его эволюции в процессе взаимодействия подвижного состава и пути: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / И. Н. Максимов. М.: Науч. исслед. ин-т ж.-д. транспорта, 2014. 226 с.
- 3. Харрис У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис, С. Захаров, Дж. Ландгрен, Х. Турне, В. Эберсен; пер. с англ.; под ред. С. М. Захарова, В. М. Богдановой. М.: Интекст, 2002. 408 с.

- 4. Ушкалов В.Ф. Увеличение ресурса колесных пар за счет использования износостойких профилей колес / В.Ф. Ушкалов, Н.В. Безрукавый // Техническая механика. 2015. № 1. С. 32–37.
- 5. Патент Российской Федерации на полезную модель «Колесо железнодорожного вагона» № 2011123145/11 от 09.06.2011 г. / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрий, И. А. Мащенко, И. Ю Малышева, А. Д. Лашко. М., 2011.
- 6. Li Li. Optimal design of wheel profile for highspeed train / Li Li, C. Dabin, J. Xuesong. – Chengdu, China, 2015. – 22 p.
- 7. Shevtsov I.Y. Wheel / Rail Interface Optimization / I.Y. Shevtsov. The Netherlands: Civil Engineering and Geosciences Delf University of Technology, 2008. 218 p.
- 8. Захаров С. М. Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров // Вестн. ВНИИЖТ. 2013. № 4. С. 9–17.
- 9. Орлова А. М. Анализ существующей ситуации взаимодействия колес и рельсов. Постановка задач исследования / А. М. Орлова, В. И. Федорова // Тез. докл. XI Междунар. науч.-технич. конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». Санкт-Петербург, 6–10 июля 2016 г. СПб.: ПГУПС, 2016. С. 121–123.
- 10. Лосев Д. Н. Вагоны на тележках «Барбер» : итоги эксплуатации / Д. Н. Лосев // Вагоны и вагонное хозяйство. 2016. № 4 (48). С. 8–9.
- 11. Лазерный профилометр поверхности катания колесной пары. Серии ИПК-5. Руководство по эксплуатации. Минск : ООО «РИФТЭК», 2010. 63 с.
- 12. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524 мм).— Согласован Комиссией Совета по железнодорожному транспорту полномочных специалистов вагонного хозяйства железнодорожных администраций. Протокол от 4—6 сентября 2012 г.
- 13. Иванов И. А. Ресурс и ремонтопригодность колесных пар подвижного состава железных дорог: монография / И. А. Иванов, А. А. Воробьев, С. И. Губенко, В. Г. Кондратенко, Д. П. Конов, А. М. Орлова. М.: ИНФРА-М, 2011. 264 с.

## References

- 1. Romen Y. S. Garmonyzatsiya profyley relsa i kolesnoy pary [Harmonization of rail profile and a set of wheels]. *Tezysy dokladov XI Mezdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Podvyzhniy sostav XXI veka: idey, trebovaniya, proyekty" [Abstracts of the 10<sup>th</sup> International research and technical conference "Rolling stock of the 21<sup>st</sup> century: ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 20–22. (In Russian)*
- 2. Maksymov I. N. Razrabotka profilya koles dlya skorostnykh poyezdov i prognozyrovaniye yego evolutsii v protsesse vzaimodeystviya podvyzhnogo sostava i puty [The development of rail profile for rapid trains and its evolution forecasting in the process of train-track interaction]. Diss... Cand. Sci. Eng.: 05.22.07. Moscow, Research institution of railway transport Publ., 2014, 226 p. (In Russian)
- 3. Harris W. J., Lundgren J., Tournay H. & Ebersohn W. Obobsheniye peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvyzheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa [Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: wheel and rail interface issues]. Tr. from English; ed. by S. M. Zakharov, V. M. Bogdanova. Moscow, Intext Publ., 2002, 408 p. (In Russian)
- 4. Ushkalov V.F. & Bezrukaviy N.V. Uvelycheniye resursa kolesnykh par za schet ispolzovaniya iznosostoykykh profyley koles [Wheel set life extension using wear-resistant rail profiles]. *Engineering mechanics*, 2015, no. 1, pp. 32–37. (In Russian)
- 5. Ushkalov V. F., Mokriy T. F., Mashenko I. A., Malysheva I. Y. & Lashko A. D. *Patent Rossiyskoy Federatsii na poleznuyu model "Koleso zheleznodor-ozhnogo vagona" no. 2011123145/11 ot 09.06.2011 [License of the Russian Federation for a utility model "Rail car wheel" N 2011123145/11 dated 09.06.2011]*. Moscow, 2011. (In Russian)
- 6. Li Li, Dabin C. & Xuesong J. *Optimal design of wheel profile for high-speed train*. Chengdu, China, 2015, 22 p.
- 7. Shevtsov I.Y. *Wheel/Rail Interface Optimization*. The Netherlands, Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology Publ., 2008, 218 p.
- 8. Zakharov S. M. Razvitiye tyazhelovesnogo dvyzheniya v myre [The development of heavyweight

traffic in the world]. *VNIIZhT Bulletin*, 2013, no. 4, pp. 9–17. (In Russian)

- 9. Orlova A. M. & Fedorova V. I. Analyz sushestvuyushey situatsii vzaimodeystviya koles i relsov. Postanovka zadach issledovaniya [The analysis of the current situation of rail and track interaction. Setting of research objectives]. Tezysy dokladov XI Mezdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Podvyzhniy sostav XXI veka: idey, trebovaniya, proyekty" [Abstracts of the 10<sup>th</sup> International research and technical conference "Rolling stock of the 21<sup>st</sup> century: ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp.121–123. (In Russian)
- 10. Losev D. N. Vagony na telezhkakh "Barber": itogy ekspluatatsii [Cars on "Barber" bogies: operation results]. *Cars and rolling stock*, 2016, no. 4 (48), pp. 8–9. (In Russian)
- 11. Lazerniy profylometr poverkhnosty kataniya kolesnoy pary. Serii IPK-5 [Laser range profilometer of a wheel thread. Series IPK-5]. Rukovodstvo po

- ekspluatatsii [User's guide]. Minsk, OOO "RIFTEK" Publ., 2010, 63 p. (In Russian)
- 12. Rukovodyashiy document po remontu i tekhnicheskomu obsluzhyvaniyu kolesnykh par s buksovymy uzlamy gruzovykh vagonov magystralnykh zheleznykh dorog kolei 1520 (1524mm) [Guidance document on maintenance of wage wheels with axle boxes of 1520 (1524 mm) gage trunk road freight cars]. Soglasovan Komyssiyey Soveta po zheleznodorozhnomu transportu polnomochnykh spetsialystov vagonnogo khozyaistva zheleznodorozhnykh administratsiy [Approved by the Committee for railroad transport of senior experts in rolling stock of railway administrations]. Protocol dated September, 4th–6th 2012. (In Russian)
- 13. Ivanov I.A., Vorobiyev A.A., Gubenko S.I., Kondratenko V.G., Kononov D.P. & Orlova A.M. Resurs i remontoprygodnost kolesnykh par podvyzhnogo sostava zheleznykh dorog [Wheel set life time and maintainability of railway rolling stock]. Moscow, INFRA-M Publ., 2011, 264 p. (In Russian)

ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, профессор, a-orlova@yandex.ru (ПАО «НПК ОВК»); \*ФЁДОРОВА Вероника Игоревна – инженер, nika.veronika-fedorova@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073:658.8

# О. Д. Покровская, О. Б. Маликов, М. А. Зачешигрива

# О НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕОРИИ ТЕРМИНАЛИСТИКИ

Дата поступления: 20.01.2017 Решение о публикации: 09.10.2017

#### Аннотация

Цель: Охарактеризовать терминалистику как новое научное направление по исследованию и рациональному проектированию инфраструктуры терминальных сетей и транспортных узлов. Метод: Использован аналитический метод. Результаты: Обоснована актуальность терминалистики, а также сформулированы факторы ее выделения из логистики в самостоятельное направление. Отмечены признаки научной новизны и аспекты практического применения результатов. В табличной и графической формах представлена эффективность теоретических основ терминалистики при их практической реализации. Возможные сферы применения научных результатов: 1) совершенствование проектирования, эксплуатации и развития терминально-складской инфраструктуры различных видов транспорта на основе систематизации разрозненных научных знаний и подходов (классификации, идентификации) в единое междисциплинарное комплексное научно-практическое направление (для всестороннего изучения логистических объектов); 2) разработка государственного стандарта по классификации и идентификации логистических объектов; 3) упрощение всех коммерческих операций с логистическими объектами любой сложности, адаптация унифицированного классификационного подхода к каждому участнику транспортно-логистического рынка (покупка, продажа, аренда и управление складами, грузовыми терминалами, логистическими центрами) инициирует рост данного сектора рынка, ускорит товарообменные процессы и улучшит взаимопонимание между всеми участниками рынка, а именно: совершенствование взаимодействия видов транспорта при выполнении мультимодальных перевозок; улучшение эксплуатационной работы транспортно-логистических, операторских компаний и логистических провайдеров, торговых девелоперов и операторов складов и грузовых терминалов в транспортных узлах; формирование рациональной транспортно-складской инфраструктуры в этих узлах для получения мультипликативного эффекта и снижения транспортной составляющей в конечной цене готовой продукции. Практическая значимость: Для ОАО «РЖД» оформление всех знаний о транспортных узлах как об объектах инфраструктуры в терминалистику даст возможность реализовать ключевые направления «Стратегии развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года» и выйти на уровень логистического провайдера 3-4 PL-уровня. Применение положений терминалистики позволит получить мультипликативный эффект, снизить транспортную составляющую в конечной цене готовой продукции, создать инвестиционно привлекательные условия предложения качественного транспортно-складского сервиса ОАО «РЖД».

Ключевые слова: Терминалистика, классификация, логистические объекты.

\*Oksana D. Pokrovskaya, Cand. Sci. Eng., associate professor, insight1986@inbox.ru; Oleg B. Malykov, D. Sci. Eng., professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University), Marina A. Zacheshigriva, Cand. Sci. Eng., associate professor (Siberian Transport University) ON RESEARCH AND PRACTICE IMPLEMENTATION OF THE THEORY OF TERMINALISTICS

# **Summary**

**Objective:** To characterize terminalistics as a new prospect of research and rational design of terminal networks and transportation nodes infrastructure. **Methods:** Analytical method was applied in the study. **Results:** The topicality of terminalistics, as well as the factors, which make it possible to single

terminalistics out of logistics as a separate aspect of research, was justified. The features of scientific novelty and the aspects of practical application of the results were pointed out. The effectiveness of practical application of terminalistics theory was presented in the form of a table and a graph. The possible spheres of application of scientific results are: 1) the improvement of design, maintenance and development of terminal stock infrastructure of different types of transport on the basis of classifying disaggregated scholarly knowledge and approaches (classification, identification) in a single interdisciplinary research and practice aspect (for comprehensive study of logistical objects); 2) the development of state standard on classification and identification of logistical objects; 3) simplification of all commercial operations with logistical objects of any complexity, adapting a unified classification approach to each member of transport logistic market (purchasing, selling, lease and management of warehouses, cargo terminals and logistic centers) will activate the growth of the market sector, expedite the processes of goods exchange and improve mutual understanding between all members of the market, specifically: the improvement of intermodal shipping; the development of service checks of transport logistic companies, operator companies and logistics providers, commercial developers, operators of warehouses and cargo terminals in transport nodes; the formation of an efficient storage-retrieval infrastructure in these nodes in order to gain a multiplicative effect and reduce transport costs in the price of an end product. **Practical importance:** The arrangement of the accumulated knowledge on transport nodes as objects of infrastructure in the science of terminalistics will allow OAO "Russian Railways" to implement the key directions of "The development strategy of railway transport of the Russian Federation for the period through to 2030" and achieve the 3-4 PL-level of a logistic provider. Application of terminalistics propositions will make it possible to gain a multiplicative effect, reduce transport costs in the price of an end product, create the investment attractive conditions of high-quality storage-retrieval service at OAO "Russian Railways".

**Keywords:** Terminalistics, classification, logistical objects.

#### Постановка задачи

Позиция ОАО «РЖД» на транспортном рынке требует от современной науки поиска новых методологических инструментов для построения рациональных терминальных сетей и совершенствования работы транспортных узлов. Так, в «Стратегии развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года» [1] (далее – Стратегии-2030) отмечается приоритетное развитие терминальноскладской инфраструктуры, соответствующее реалиям транспортно-логистического рынка. С одной стороны, относительная «молодость» логистики нашей страны объясняет низкий уровень развития высококачественной терминально-складской инфраструктуры; с другой – этапы фрагментарного развития логистики давно пройдены, и транспортнологистическая практика нуждается в комплексных логистических подходах к классификации, структуре, иерархии и управлению логистическими объектами (ЛО) различных форматов. Сложилась парадоксальная ситуация на транспортном рынке. Транспортные узлы, выполняя широкий ассортимент транспортно-логистического сервиса, не имеют при этом единой логистической классификации, позволяющей отразить их мощнейший логистический функционал и принимать комплексные, а не точечные решения при формировании систем доставки.

Если говорить о транспортно-логистической практике в целом, то отсутствует направление, в области изучения которого находились бы ЛО всех форматов — от грузового двора или склада с минимумом функций до сложнейших мультимодальных комплексов и логистических городов-гейтвеев. Так, существующие научные направления рассматривают только узкую группу проблем, связанных с организацией эффективной работы ЛО, не уделяя должного внимания остальным его «ипостасям» [2]. Такой «сбитый прицел» не позволяет принимать решения оперативно и комплексно, во взаимосвязи и интеграции

имеющейся мощной научно-практической базы в фокусе проблем и задач именно ЛО любой сложности [3].

Экономически и технологически обоснованные решения по проектированию терминальных сетей, начиная от формирования концепции грузодвижения и строительства узловых ЛО и заканчивая комплексными программами транспортно-логистического развития инфраструктуры отдельных регионов и всей страны, предполагают наличие не отдельных разрозненных исследований, но комплексное научное направление, позволяющее полноценно и всесторонне изучать столь сложные элементы транспортной системы как транспортные узлы. Комплексность этого направления означает не просто анализ какого-то фрагмента многогранной деятельности транспортных узлов, но и сущности ЛО во всех проявлениях и взаимосвязи решаемых вопросов.

Оформление всех знаний о транспортных узлах как об объектах инфраструктуры в стройную систему, в фокусе рассмотрения которой будет именно транспортный узел как ЛО, позволит реализовать ключевые направления Стратегии-2030 и повысить качество сервиса. Для достижения ОАО «РЖД» уровня логистического провайдера 4-го уровня, безусловно, требуется мощная методологическая база, чтобы рационально располагать и проектировать ЛО, а затем управлять процессами перевозок по опорной терминальной сети. Очевидно, что поиск новых методологических инструментов может и должен продолжаться.

Таким образом, актуальность научного направления, интегрирующего знания о ЛО различного формата, прежде всего о транспортных узлах и терминальных сетях, определяется: 1) отсутствием в настоящее время единого подхода к классификации, иерархии, идентификации транспортных узлов и других объектов инфраструктуры с позиций логистики; 2) усложнением ассортимента логистического сервиса и структуры цепей поставок с участием транспортных узлов; 3) быстрым ростом ЛО и требований рынка к дальней-

шему динамичному расширению терминальной сети ОАО «РЖД»; 4) усложнением взаимодействия участников процесса перевозки в транспортных узлах; 5) недостаточными полнотой, интегрированностью и комплексностью существующих исследований транспортных узлов и терминальных сетей.

Вышесказанное позволяет определить **цель данной работы** – сформулировать положения научной новизны и аспекты практической применимости терминалистики.

#### Решение

В терминалистике следует разработать универсальный методологический инструмент для рационального проектирования, прогнозирования, эксплуатации и развития объектов логистической инфраструктуры [4].

Факторами, способствующими выделению терминалистики из теории и практики логистики, являются: 1) неизбежность решения целого комплекса связанных с функционированием транспортных узлов (ТУ) задач (организация технологического и экономического взаимодействия не только видов транспорта, но и всех участников грузодвижения в транспортном узле); 2) значительная роль транспортных узлов при построении цепей поставок, вызванная продвижением товаров от начальных поставщиков до конечных потребителей; 3) высокая доля затрат времени, приходящегося на прохождение груза и транспортных средств через ТУ, что требует эффективных технико-технологических решений; 4) развитие идей логистики в фокусе работы ТУ как ЛО с учетом расширения и усложнения ассортимента реализуемых им услуг; 5) построение развитой терминальной сети как инфраструктурной основы для работы транспортных коридоров на территории страны с участием всех видов транспорта, отвечающей современным требованиям; 6) необходимость в комплексе и взаимосвязи решать вопросы рационального проектирования (внутреннего и внешнего) ЛО, районов, сетей (выбор количества и дислокации ЛО в составе терминальной сети, конфигурирование терминальной сети, выбор вида транспорта на каждом транспортном звене, расчет технической оснащенности и др.).

Терминалистика – логистика терминальных сетей и ТУ – наука об организации, проектировании, конфигурации и управлении терминальными сетями, узловыми элементами которых являются ЛО различного формата (в частности ТУ), включая вопросы количества и дислокации узлов, функциональнотехнологического состава, прогнозной и экспертной оценок, а также транспортную, инфраструктурную, интеграционную, экономическую и экологическую составляющие работы региональных терминальных сетей [2].

К основным задачам, которые может решать терминалистика, относятся: 1) проектирование терминальных сетей и управление процессами перевозок через них, включая определение их структуры, количества и дислокации узлов (грузовых терминалов), внутренней модульной структуры, функционального и технического оснащения узлов; 2) выбор вида (сочетания видов) транспорта для реализации транспортного обслуживания терминальных сетей, построение и расчет рациональных схем доставки грузов (включая мультимодальную) через терминальную сеть, интегрированную в сеть транспортных коридоров; 3) разработка альтернативных вариантов транспортно-логистического обслуживания регионов; 4) экономическая, экспертная полифакторная оценка эффективности работы терминальных сетей. В общем виде междисциплинарные связи терминалистики и ее положение в системе знаний о терминальных сетях и ЛО (ТУ) представлены на рис. 1.

Каждая составляющая определяет методологию проектирования и управления терминальными сетями, их структурой и организацией перевозок грузов через них.

Принципиальная формулировка терминалистики: 1) управление сложными цепями поставок и оказание: 2) внутри одной еди-

ной цепи, 3) одной сквозной комплексной услуги, 4) в одном месте, 5) от одного лица, 6) в одно окно, 7) с общей ответственностью, 8) по одному договору, 9) по одному перевозочному документу, 10) в одном формате всех компаний-участников с обеспечением: 11) глобализации и мультипликативного эффекта, 12) добавления стоимости на каждом участке сети, 13) при компактности (сосредоточенности) многих участников процесса перевозок и 14) многофункциональности предоставляемого сервиса как уникальной услуги (клиентоориентированность).

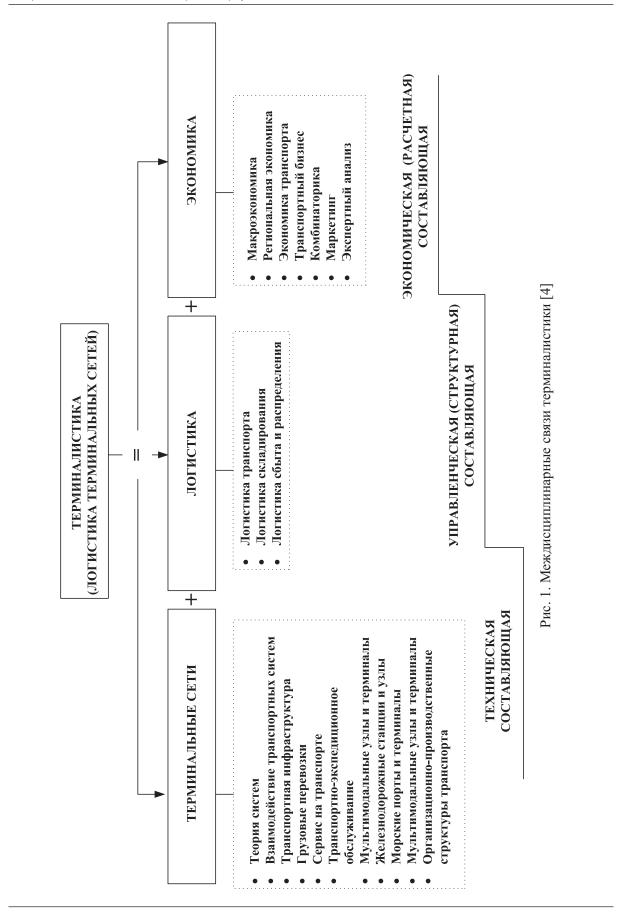
На рис. 2 показано функциональное положение терминалистики в системе базовых научных дисциплин в виде сотовой структуры. Ближайшие от центральной «терминалистики» соты — это ключевые научные знания, на которых основаны теоретическое и методологическое обеспечение терминалистики. Краеугольные камни терминалистики как науки, из которых образовано данное направление, — это вершины структуры. Частные теории расположены по внешнему периметру сотовой структуры.

В табл. 1 разграничены области исследования логистики и терминалистики.

Таким образом, концентрированное оформление в самостоятельную методологию всех знаний о ЛО с позиций современной логистики позволит принимать экономически и технологически обоснованные решения по проектированию транспортно-складских систем регионов, начиная от концепции управления перевозочным процессом через терминальные сети и строительства узловых ЛО и заканчивая комплексными программами транспортнологистического развития инфраструктуры отдельных регионов и всей страны.

# Уровневая модульная структура терминалистики и ее эволюции как нового научного направления

Эволюцию и структуру терминалистики по уровням и модулям иллюстрирует рис. 3.



Три уровня развития терминалистики представлены (слева, от низшего к высшему) внутренней логистикой, внутриузловой/зональной логистикой, внешней/контрактной логистикой. Внутриуровневое развитие идет слева направо. Модули терминалистики, на

которых основываются ее инструментарий и концепции,— это 9 квадратов. Цветом выделены базовые теории (этапы), по которым эволюционирует терминалистика (см. стрелку), начиная от задач внутреннего технического проектирования простейших складских ком-

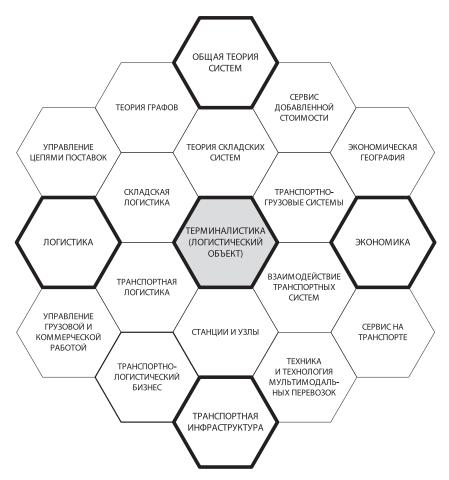


Рис. 2. Положение терминалистики в системе научных дисциплин

ТАБЛИЦА 1. Области исследования логистики и терминалистики

ЛОГИСТИКА	ТЕРМИНАЛИСТИКА			
Объект: материальные, финансовые, инфор-	Объект: потоки, связанные с деятельностью			
мационные, сервисные потоки (все виды пото-	ЛО, порождаемые и преобразуемые ими (де-			
ков, без детализации субъекта их природы).	тализация природы потока – только область			
Предмет: оптимизация потоков (одинаковый).	деятельности ЛО).			
Область исследований: широкий спектр во-	Предмет: оптимизация потоков (одинаковый).			
просов управления потоковыми процессами	Область исследований: ограничена требова-			
	ниями рационального проектирования и эф-			
	фективной эксплуатации ЛО			
Следовательно, терминалистика – это по-новому очерченное поле транспортно-логистических				

исследований.

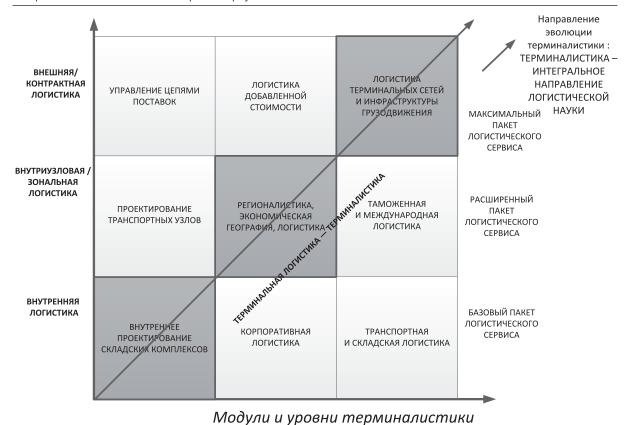


Рис. 3. Уровневая модульная структура терминалистики и ее эволюции

плексов, продолжая решением задач позиционирования ЛО в региональной логистической и экономической системе и заканчивая задачами построения сложных терминальных сетей масштаба страны, их интеграции в транспортные коридоры и формирования инфраструктуры грузодвижения.

Уровням соответствует комплексность решений терминалистики на каждом уровне (см. справа, от низшего к высшему) с учетом их функциональной роли: 1) решения базового пакета логистического сервиса — их можно разработать в рамках внутреннего проектирования локальных объектов, затем в границах корпоративной логистики и далее — складской и транспортной логистики; 2) решения расширенного пакета логистического сервиса — в рамках проектирования ТУ, затем регионалистики и, наконец, таможенной международной логистики; 3) решения максимального пакета логистического сервиса — в рамках сначала управления цепями поставок, затем

логистики добавленной стоимости и, далее, логистики терминальных сетей — терминалистики. Данная схема иллюстрирует одновременно взаимосвязи терминалистики со смежными областями научных знаний (модулями), логику построения ее теоретических основ, динамику последующего развития и область прикладных сервисных задач с учетом иерархии каждого модуля.

# Методология классификации, иерархии и идентификации ЛО

Предлагается система классификации и иерархии ЛО как адаптированный вариант концепции Родригэ—Ноттебума [5, 6], применимая не только для морских, но и для любых ЛО. Данная «пирамида терминалистики» и ее объектов (в подошве — простейшие объекты, на вершине — сложнейшие) построена по логи-

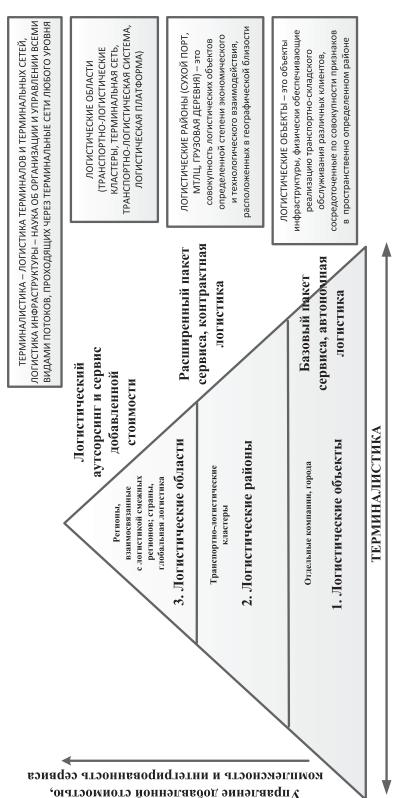


Рис. 4. Пирамида терминалистики

ке роста комплексности и интегрированности реализуемого ими сервиса добавленной стоимости. Кроме того, такая пирамида отражает уровни логистики -1 PL (автономная логистика), 2 PL (контрактная логистика 2-й стороны), 3 и 4 PL (логистический аутсорсинг).

# Классификация ЛО

Предлагается все объекты логистической инфраструктуры называть *«логистически-ми объектами»*, иерархия которых отражает их функциональные и форматные отличия. Формулировка *«логистический объект»* позволяет разработать не отдельные разрозненные (локальные) классификации складов, ТУ (по видам транспорта), грузовых дворов, терминально-складских объектов и т. д., но методологию единого классификационного подхода с позиций логистики. Это, в свою очередь, обеспечивает терминалистика.

В дальнейшем данная разработка может послужить основой для законодательного закрепления ряда положений о логистической деятельности таких объектов и придания им особого экономического статуса (опыт Евросоюза [7] и Республики Беларусь [8]).

**Терминальная сеть** — интегрированная грузопроводящая мезологистическая система; совокупность взаимодействующих и централизованно управляемых узлов (логистических центров), обеспечивающая межрегиональную интеграцию и выходы на транспортные коридоры страны.

Под **ЛО** предлагается понимать объекты инфраструктуры, физически обеспечивающие реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе. В частности, **железнодорожными** предлагается называть ЛО, относящиеся к терминально-складской инфраструктуре железных дорог, выполняющие функции узловых элементов терминальнологистической системы по техническому

обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта.

Вопросами проектирования и последующего развития различных ЛО занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Парадокс в том, что железнодорожные ЛО, играя роль полноценных многофункциональных узлов терминально-складской инфраструктуры, рассматриваются ими достаточно односторонне — только как транспортные, но не как транспортно-складские системы, что тоже не позволяет говорить об исчерпывающем характере их исследований.

Огромный вклад в создание отечественной теории ТУ внесли такие ученые как В. Н. Образцов, К. Ю. Скалов, С. В. Земблинов, И.Е. Савченко, Л.В. Канторович, В.Я. Негрей, Н. В. Правдин, А. В. Комаров, В. В. Повороженко, Е. В. Архангельский, В. М. Акулиничев, Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко и многие другие. Важнейшее значение для железнодорожной отрасли имеют труды С. М. Резера, Б. А. Левина, П. А. Козлова, А. Т. Осьминина, В. А. Кудрявцева, В. А. Персианова, П. В. Куренкова, А. Ф. Бородина, С. Ю. Елисеева, посвященные совершенствованию транспортных и логистических технологий доставки грузов. Значительную роль в формировании теории транспортно-грузовых систем, проектирования компоновки и технического оснащения ТУ играют работы А. А. Смехова, В. Н. Дегтяренко, И.С. Беседина, Н.П. Журавлева, Г.П. Гриневич, О.Б. Маликова, О.Н. Числова и др.

Существенный вклад в систему проектирования транспортно-логистических систем внесли научные труды Н. Д. Иловайского, Ю. О. Пазойского, В. П. Клепикова, С. В. Милославской, К. В. Плужникова, В. В. Багиновой, А. Н. Рахмангулова, А. С. Балалаева, А. М. Гаджинского, В. И. Сергеева, Т. А. Прокофьевой, Б. А. Аникина, В. С. Лукинского,

В. В. Дыбской, В. М. Самуйлова, М. Б. Петрова, В. М. Николашина, Р. Г. Леонтьева, О. Н. Ларина и др.

За рубежом вопросами формирования транспортно-логистических систем занимались такие ученые как Г. Поттгоф (G. Potthof), Л. Форд (L. R. Ford), Д. Фалкерсон (D.R. Fulkerson), Д. Бауэрсокс (D. J. Bowersox); Д. Клосс (D. A. Kloss), Д. Ламберт (D. M. Lambert); Д. Сток (J. R. Stock); М. Линдерс (М. Linders); М. Кристофер (М. Christopher); И. Фехнер (І. Fechner); А. Раштон (А. Rushton); Г. Ричардс (G. Richards); С. Хиггинс (С. D. Higgins); М. Фергюсон (М. R. Ferguson); Ж.-П. Родриге (J.-P. Rodrigue); Т. Ноттебум (Т. Notteboom); А. Мюссо (А. Миsso); Д. Миддендорф (D. Middendorf); Ф. Медда (F. Medda) и др.

Высоко оценивая труды перечисленных и многих других ученых в области проектирования ЛО (учитывая научные результаты [9–18] и др.), следует отметить, что вопрос остается недостаточно изученным в части построения комплексной, интегрированной системы анализа, оценки параметров работы объектов терминально-складской инфраструктуры.

Методология классификации и идентификации ЛО представлена на рис. 5.

Авторами была разработана общая классификация ЛО по следующим аспектам: «Пространство» (66 признаков, 283 типа), «Транспорт» (85 признаков, 392 типа), «Организация и экономика» (39 признаков, 149 типов), «Конструкция и техническое оснащение» (45 признаков, 322 типа), «Функциональнологистический сервис» (15 признаков, 64 типа). Была усовершенствована с позиций логистики классификация ТУ различных видов транспорта по экономико-географическому, транспортному, планировочному, эволюционному аспектам, разработаны на их основе адаптированные версии для участников процесса перевозки (рис. 6). Все предложения полностью автоматизированы в программных продуктах для ЭВМ с целью упрощения их использования.

На рис. 7 показана авторская система классификации и иерархии ЛО. В область исследования были включены только объекты логистической инфраструктуры железнодорожного транспорта — блок «Логистические объекты», т. е. базис пирамиды терминалистики (см. рис. 2). Согласно авторской системе иерархии (снизу вверх, по стрелке), на низшем уровне находятся отдельные грузовые площадки, районы, затем распределительные центры и транспортные терминалы, далее — логистические центры и транспортно-логистические узлы и на высшем уровне иерархии ЛО — мультимодальные транспортно-логистические центры (МТЛЦ).

# Практическая применимость решения

В табл. 2 отражены полученные научные результаты и области их использования.

Позитивные аспекты применения теории терминалистики показаны на рис. 8.

# Возможные сферы применения научных результатов

В сферы перспективного применения входят:

- 1) совершенствование проектирования, эксплуатации и развития терминально-складской инфраструктуры различных видов транспорта на основе систематизации разрозненных научных знаний и подходов (классификации, идентификации) в единое междисциплинарное комплексное научно-практическое направление (для всестороннего изучения ЛО);
- 2) разработка государственного стандарта по классификации и идентификации ЛО;
- 3) упрощение всех коммерческих операций с ЛО любой сложности, адаптация унифицированного классификационного подхода к каждому участнику транспортно-логистического рынка (покупка, продажа, аренда и управле-

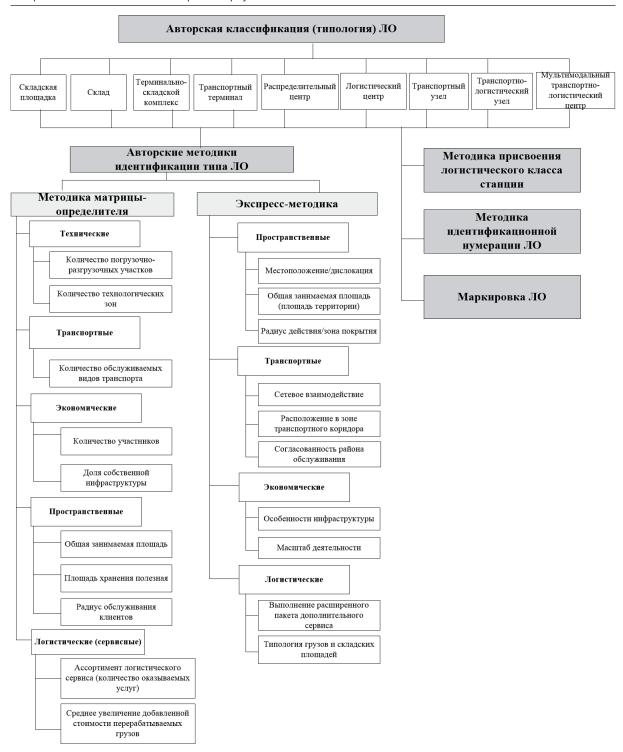
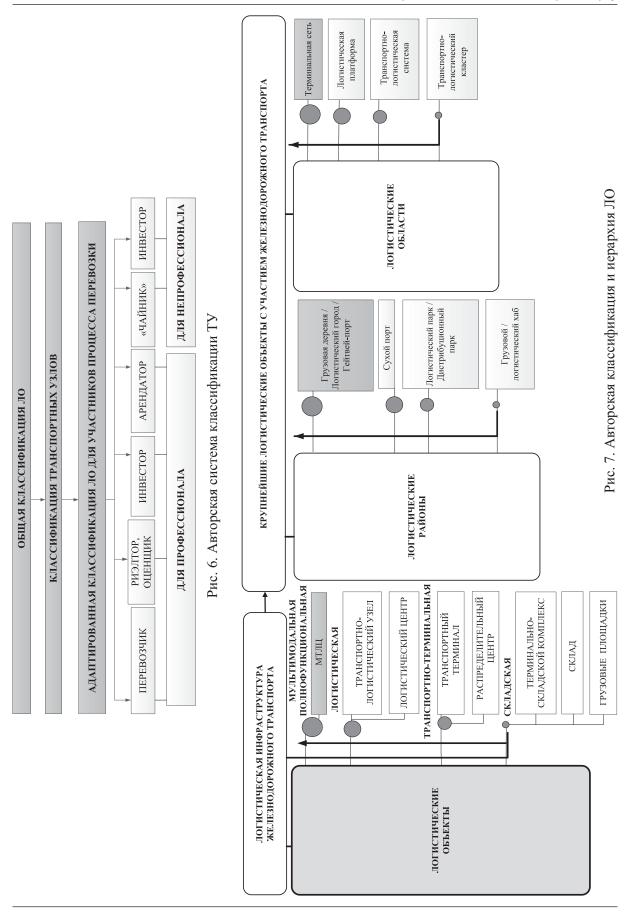


Рис. 5. Методология классификации и идентификации ЛО

ние складами, грузовыми терминалами, логистическими центрами) инициируют рост данного сектора рынка, ускорят товарообменные процессы и улучшат взаимопонимание между всеми участниками рынка:

- совершенствование взаимодействия видов транспорта при выполнении мультимодальных перевозок;
- улучшение эксплуатационной работы транспортно-логистических, операторских



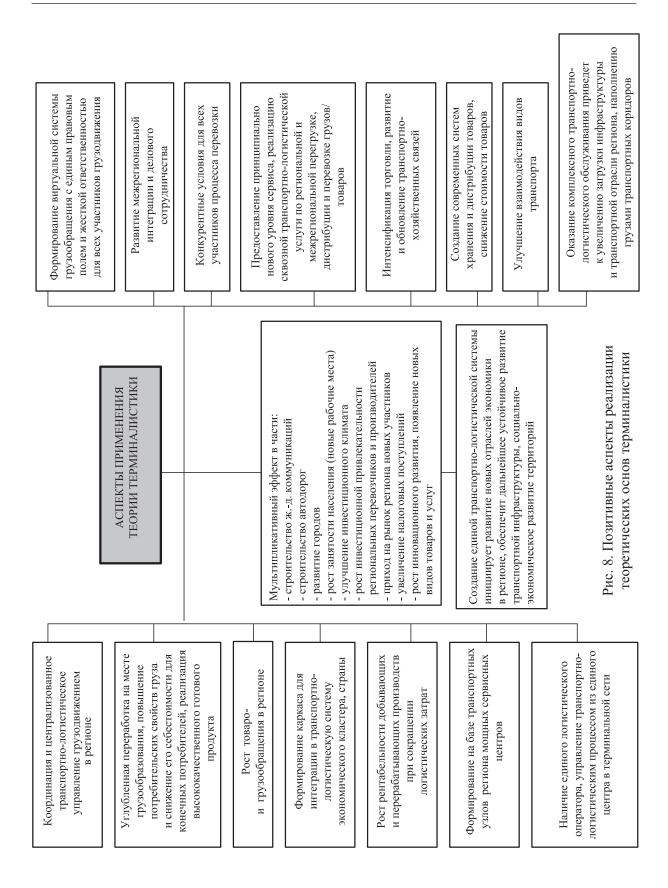


ТАБЛИЦА 2. Практическая применимость научных результатов

Научный результат терминалистики	Область практического применения
1. Принципы взаимодействия участников транспортного процесса	<b>Транспорт, грузовые перевозки.</b> Формирование эффективной системы «бесшовной» технологии комплексного транспортно-логистического сервиса на базе железнодорожного узла
2. Система клас- сификации и идентификации ЛО	<b>Транспорт, торговля, производство, сервис добавленной стоимости.</b> Унифицированная система знаний о всех ЛО, простая и удобная для проектировщика, арендатора, владельца, оценщика, инвестора, перевозчика
3. Метод пространственно- количественного формирования терминальных сетей	Транспортная и складская инфраструктура железных дорог и автомо- бильного транспорта; индустриальный и транспортно-логистический кластер. Планирование рационального развития объектов с учетом потреб- ностей города и обслуживаемой клиентуры
4. Принципы терминалистики для проектирования узловых элементов терминальных сетей	Торговля, интенсификация грузодвижения, управление цепями поставок, сервис добавленной стоимости, экономика и международная логистика. Формирование развитого рынка транспортно-складского сервиса полного цикла. Снабжение торговых, промышленных резидентов качественной складской площадью. Эффективное развитие территории, смежных производств. Развитие государственно-частного партнерства

компаний и логистических провайдеров, торговых девелоперов и операторов складов и грузовых терминалов в ТУ;

• формирование рациональной транспортно-складской инфраструктуры ТУ для получения мультипликативного эффекта и снижения транспортной составляющей в конечной цене готовой продукции.

## Выводы

В работе предпринята попытка охарактеризовать терминалистику и перспективные направления ее реализации. Основными положениями научной новизны являются:

1) выделение из логистики самостоятельного научного направления – терминалистики;

2) уровневая модульная структура терминалистики и ее эволюции как нового научного направления; 3) методология классификации, иерархии и идентификации ЛО; 4) авторская классификация и терминология ЛО.

Для ОАО «РЖД» оформление всех знаний о ТУ как об объектах инфраструктуры в терминалистику позволит реализовать ключевые направления Стратегии-2030 и выйти на уровень логистического провайдера 3—4 РL-уровня. Применение положений терминалистики даст возможность получить мультипликативный эффект, снизить транспортную составляющую в конечной цене готовой продукции, создать инвестиционно привлекательные условия предложения качественного транспортноскладского сервиса ОАО «РЖД».

# Библиографический список

- 1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года. М. : Красный пролетарий, 2008.-183 с.
- 2. Покровская О. Д. Терминалистика как новое научное направление / О. Д. Покровская // Путь науки. 2014. № 3 (3). С. 21–24.
- 3. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // РЖД-Партнер. 2016. 20.06. URL: http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityipritsel-klientoorientirovannosti (дата обращения: 25.11.2017).
- 4. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific / O. D. Pokrovskaya / Italian Science Review. 2016. N 1 (34). P. 112–116.
- 5. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems / J.-P Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. London; New York: Taylor & Francis e-Library, 2006. 259 p.
- 6. Notteboom T. Inland terminals within North American and European supply chains / T. Notteboom, J.-P. Rodrigue // Transport and Communications. Bull. for Asia and the Pacific. 2009. N 78. P. 14–22.
- 7. Europlatforms. ECE/TRANS/WP.24/2011. URL: http://www.europlatforms.eu (дата обращения: 25.11.2017).
- 8. СТБ 2133–2010. Классификация складской инфраструктуры // Класіфікацыя складской інфраструктуры : изд. офиц. / БелНИИТ : Транстехника. Введ. 2011-07-01. Минск : Госстандарт, 2010.
- 9. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы / Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, Н. В. Правдин и др. ; под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. М. : Учеб.- метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 450 с.
- 10. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др.; под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. М.: Маршрут, 2014. 1086 с.
- 11. Маликов О.Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О.Б. Ма-

- ликов. М. : Учеб. метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. 536 с.
- 12. Земблинов С.В. Основы построения транспортных узлов / С.В. Земблинов, В.А. Бураков, А.М. Обермейстер и др.; под общ. ред. С.В. Земблинова. М.: Транспорт, 1959. 47 с.
- 13. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К. Ю. Скалова, Г. С. Молярчук. М. : Транспорт, 1977.-184 с.
- 14. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России: учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. М.: Издат. дом «Экономическая газета», 2012. 522 с.
- 15. Балалаев А.С. Транспортно-грузовые системы железных дорог: учеб. пособие / А.С. Балалаев, И.А. Чернышова, А.Ю. Костенко. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. 108 с.
- 16. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта: монография / С. Ю. Елисеев. М.: ВИНИТИ РАН, 2005. 96 с.
- 17. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. М. : Альфа-Пресс, 2009. 720 с.
- 18. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. Ростов н/Д.: Феникс, 2009. 408 с.

#### References

- 1. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 g. [Development strategy of the Russian Federation railway transport for the period until 2030]. Moscow, Krasniy proletariy Publ., 2008, 183 p. (In Russian)
- 2. Pokrovskaya O. D. Termynalistika kak novoye nauchnoye napravleniye [Terminalistics as a new school]. *Science path*, 2014, no. 3 (3), pp. 21–24. (In Russian)
- 3. Pokrovskaya O. D. "Sbytiy prytsel" kliyentooriyentirovannosty ["Upset sight" of customer-oriented approach]. *RZhD-Partner*, 2016. URL: http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti (accessed: 25.11.2017). (In Russian)

- 4. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific. *Italian Science Review*, 2016, no. 1 (34), pp. 112–116.
- 5. Rodrigue J.-P., Comtois C. & Slack B. *The Geography of Transport Systems*. London, New York, Taylor & Francis e-Library Publ., 2006, 259 p.
- 6. Notteboom T. & Rodrigue J.-P. Inland terminals within North American and European supply chains. *Transport and Communications*. *Bull. for Asia and the Pacific*, 2009, no. 78, pp. 14–22.
- 7. Europlatforms. ECE/TRANS/WP.24/2011. URL: http://www.europlatforms.eu (accessed: 25.11.2017).
- 8. STB 2133–2010 Standards of the Republic of Belarus 2133–2010. *Klassifikatsiya skladskoy infrastruktury*. Izdaniye ofytsialnoye [*Classification of warehouse infrastructure*. Official edition]. BelNIIT, Transtekhnika, Minsk, Gosstandart Publ., 2010. (In Russian)
- 9. Yefimenko Y. I., Apattsev V. I., Pravdyn N. V. et al. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and transport nodes*]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2014, 450 p. (In Russian)
- 10. Pravdyn N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. & et al. *Proyektyrovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhniye i transportniye uzly)* [Railroad transport infrastructure designing (stations, railway junctions and transport nodal points)]. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)
- 11. Malykov O. B. *Perevozky i skladyrovaniye tovarov v tsepyakh postavok* [*Traffic and storing in supply chains*]. Moscow, Learning and teaching educational centre of railway transport Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

- 12. Zemblinov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M. et al. *Osnovy postroyeniya transportnykh uzlov* [Foundations of construction of transport nodal points]. Moscow, Transport Publ., 1959, 47 p. (In Russian)
- 13. Stykoviye punkty transportnykh uzlov [Transport division points]. Ed. by K. Y. Skalov & G. S. Molyarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)
- 14. Prokofyeva T.A. & Sergeyev V.I. Logisticheskiye tsentry v transportnoy systeme Rossii [Logistic centers in the transport system of Russia]. Moscow, Economic Newspaper Publ., 2012, 522 p. (In Russian)
- 15. Balalayev A. S., Chernyshova I.A. & Kostenko A. Y. *Transportno-gruzoviye systemy zheleznykh dorog* [*Railway transport and cargo systems*]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)
- 16. Yeliseyev S.Y. Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskymy i rechnymy portamy i drugymy vydamy transporta [The system of logistical control of sea ports and river ports and other types of transport interaction]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2005, 96 p. (In Russian)
- 17. Dybskaya V. V. *Upravleniye skladyrovaniyem v tsepyakh postavok* [Storing management in supply chains]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)
- 18. Myrotyn L. B., Bulba A. V. & Demyn V. A. Logistika, tekhnologiya, proyektyrovaniye skladov, transportnykh uzlov i termynalov [Logistics, technology, designing of stores, transport nodal points and railheads]. Rostov-on-Don, Phoenix Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

\*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru; МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ЗАЧЕШИГРИВА Марина Александровна – канд. техн. наук, доцент (Сибирский государственный университет путей сообщения).

УДК 629.4.027.25

# Л.В. Цыганская, В.С. Коршунов

# РАЗРАБОТКА ТРЕХОСНОЙ ТЕЛЕЖКИ С РАДИАЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ КОЛЕСНЫХ ПАР С ОСЕВОЙ НАГРУЗКОЙ 25 ТС

Дата поступления: 28.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

Цель: Создание железнодорожной трехосной тележки с новой конструктивной схемой, отвечающей всем современным требованиям и имеющей улучшенные технические и эксплуатационные характеристики. Методы: Использованы аналитический метод исследования конструкций трехосных тележек и численный метод расчета рессорного подвешивания, принимая во внимание нестандартное расположение рессорных комплектов по сравнению с двухосными тележками. Результаты: Разработана новая конструктивная схема трехосной тележки с возможностью обеспечения радиальной установки колесных пар с учетом недостатков находящихся в эксплуатации трехосных тележек, к которым относятся быстрый износ опорных поверхностей боковых рам, приводящий к заклиниванию крайних колесных пар в челюстных проемах, интенсивный износ гребней колесных пар и сходы колесных пар в кривых, а также повышенное сопротивление движению вагонов на криволинейных участках пути. В результате расчетов были установлены основные параметры рессорного комплекта четырех вариантов центрального подвешивания, рассчитаны величины рамной силы и коэффициента вертикальной динамики и определена величина сопротивления трехосной тележки относительному продольному перемещению между боковыми рамами при перемещении, равному 10 мм. Практическая значимость: Итогом проделанной работы является создание новой схемы трехосной тележки, на основании которой в настоящее время проводится разработка эскизного проекта трехосной тележки с осевой нагрузкой 25 тс с радиальной установкой колесных пар.

**Ключевые слова:** Тележка, трехосная тележка, тележка вагона, конструктивная схема, радиальная установка колесных пар, рессорное подвешивание.

**Lyudmila V. Tsyganskaya,** Cand. Sci. Eng., associate professor, tcyganskaya@gmail.com; \*Vladimir S. Korshunov, postgraduate student, kormir91@mail.ru (Petersburg State Transport University) DEVELOPMENT OF THE THREE-AXLE BOGIE WITH RADIAL INSTALLATION OF THE AXLES WITH AXLE LOAD 25 T

# **Summary**

**Objective:** To develop a railway three-axle bogie with a new design scheme, that meets all modern requirements, having improved technical and operational characteristics. **Methods:** Analytical research method was applied to study the design of three-axle bogies and numerical method was used for spring suspension calculation, given the non-typical arrangement of spring kits compared to bogie trucks. **Results:** A new constructive scheme of a three-axle bogie with the possibility of providing radial installation of wheel pairs was developed with account of the deficiencies of three-axle bogies in operation, which include quick wear of the bearing surfaces of the side frames, which leads to jamming of extreme wheelsets in the jaw openings, heavy wear of the wheelset ridges and convergence of wheel pairs in curves, as well as the car movement increased resistance on curved track sections. As a result of the conducted calculations the basic parameters of spring set of four variants of bolster suspension were determined, values of frame force and the coefficient of vertical dynamics were estimated, as well as the resistance value of the three-

axle bogie to relative longitudinal movement between the side frames when moving that equals 10 mm. **Practical importance:** The conducted research made it possible to create a new scheme of a three-axle bogie on the basis of which the development of a conceptual design of a three-axle bogie with axle load of 25 t with radial installation of wheel pairs is currently being carried out.

**Keywords:** Bogie, three-axle bogie, bogie of railcar, constructive scheme, radial installation of the axles, bogie suspension.

Разработке и созданию трехосных тележек грузовых вагонов посвящено много работ в России и за рубежом. В разные годы ведущие вагоностроительные заводы занимались проектированием и производством трехосных тележек грузовых вагонов [1, 2]. Однако, учитывая конструктивные недостатки разработанных трехосных тележек, их применение не получило широкого распространения. Поэтому вопрос создания трехосной тележки с новыми конструктивными схемами, отвечающей всем современным требованиям и имеющей улучшенные технические и эксплуатационные характеристики, остается открытым [3].

Находящиеся в эксплуатации трехосные тележки с центральным рессорным подвешиванием имеют ряд недостатков, связанных с их конструктивным устройством. Во-первых, это быстрый износ опорных поверхностей боковых рам, который приводит к заклиниванию крайних колесных пар в челюстных проемах, не позволяя им смещаться при проходе кривых. Во-вторых, быстрый износ гребней колесных пар, а также сходы колесных пар в тележках в кривых, причиной которых является увеличенные силы бокового воздействия на путь, возникающие из-за большого сопротивления при смещении колесных пар в пределах зазоров в буксовых проемах [4]. Также отмечается повышенное сопротивление движению вагонов на криволинейных участках пути [5, 6].

Для создания новой конструкции трехосной тележки предложен вариант тележки с центральным рессорным подвешиванием с возможностью обеспечения радиальной установки колесных пар [7].

В конструкции трехосной тележки для передачи вертикальной и горизонтальной

нагрузок на надрессорные балки от пятника кузова вагона предлагается использовать соединительную балку, установленную с опорой через «плоский пятник-подпятник» на две надрессорные балки, в отличие от традиционной конструкции жесткого болтового крепления шкворневой балки с надрессорными в отечественных трехосных тележках [8]. Предлагаемое техническое решение позволит обеспечить поворот надрессорных балок вместе с боковыми рамами при прохождении вертикальных и горизонтальных неровностей пути, а также улучшит прохождение кривых малого радиуса [9]. Схема распределения вертикальной и горизонтальной нагрузок от кузова вагона на колесные пары представлена на рис. 1.

При входе тележки в кривой участок пути происходит набегание колеса на рельс первой по ходу движения колесной пары, вследствие чего боковая сила (H) приводит к беспрепятственному повороту надрессорных балок вместе с боковыми рамами вокруг осей пятников соединительной балки, при этом хоботы боковых балок со стороны наружного рельса смещаются в пазах балансира навстречу друг другу  $(x - \Delta)$ , а со стороны внутреннего рельса расходятся  $(x + \Delta)$ , тем самым центрируя балансир и среднюю колесную пару, при этом расстояния между буксами крайних колесных пар со стороны внутреннего рельса уменьшается  $(lm - \Delta)$ , а со стороны внешнего рельса увеличивается  $(lm + \Delta)$ , за счет чего обеспечивается радиальная установка колесных пар.

Схема изменения геометрии трехосной тележки при набегании колеса на рельс в кривых участках пути показана на рис. 2.

В конструкции новой трехосной тележки предполагается применять балансир особой конструкции (рис. 3), представляющий

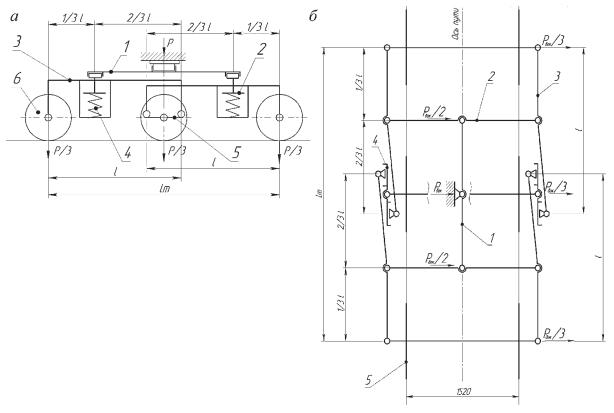


Рис. 1. Схема распределения вертикальной (a) и горизонтальной ( $\delta$ ) нагрузок от кузова вагона на колесные пары:

1 — соединительная балка; 2 — надрессорная балка; 3 — боковая рама; 4 — рессорный комплект; 5 — балансир; 6 — колесная пара

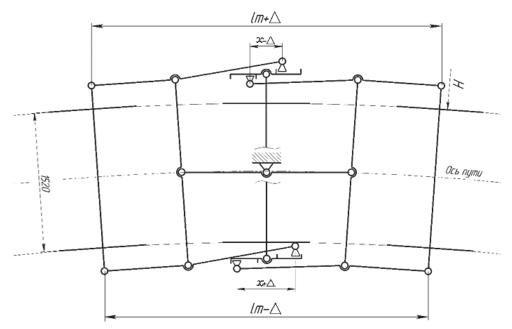


Рис. 2. Схема изменения геометрии трехосной тележки при набегании колеса на рельс в кривых участках пути

собой стальную отливку I в виде коромысла с центральным проемом E для размещения буксового узла средней колесной пары, в состав которого входят пята I, адаптер I и прокладка I, отличающийся тем, что в плечах балансира имеются пазы для опоры боковых рам I (см. рис. I), опорная поверхность I их имеет три участка: центральный, находящийся в горизонтальной плоскости, и боковые наклонные симметрично расположенные под углом I0.

Балансир работает следующим образом. Когда трехосная тележка находится на прямом участке пути (рис. 4) консоли боковых рам 5 располагаются по центру пазов балансира (расстояние между консолями составляет L).

При движении тележки излишние продольные колебания (виляние) центральной колесной пары гасятся за счет сил сухого трения между прокладками 7 и вкладышами 8, на которые через упругие элементы 10 опираются консоли боковых рам 5. Наличие наклонных поверхностей пазов балансира препятствует перемещению консолей боковых рам на прямых участках пути.

При входе тележки в кривой участок пути (рис. 5) консоли боковых рам 5 со стороны наружного рельса смещаются в пазах балансира I навстречу друг другу ( $-\Delta$ ), а со стороны внутреннего рельса расходятся ( $+\Delta$ ), тем самым центрируя балансиры I и среднюю ко-

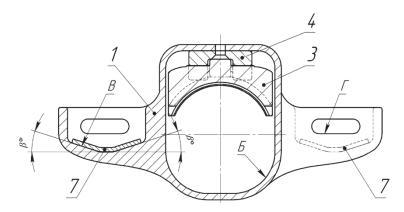


Рис. 3. Общий вид балансира

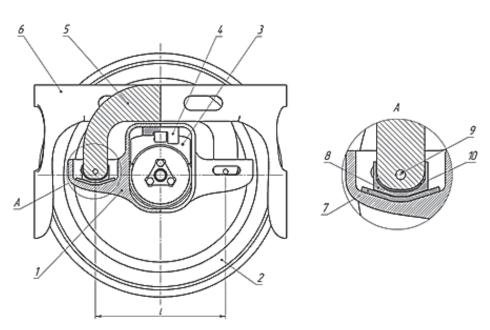


Рис. 4. Принцип работы балансира на прямом участке пути

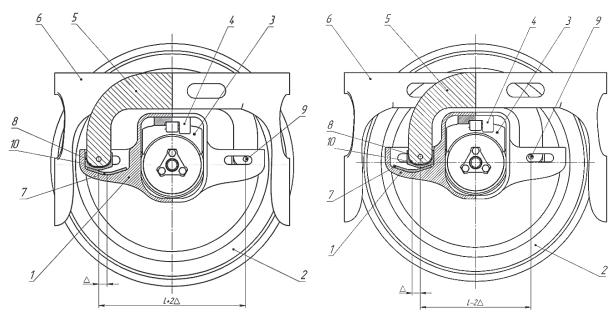


Рис. 5. Принцип работы балансира в кривом участке пути со стороны наружного (слева) и внутреннего (справа) рельса

лесную пару 2, при этом расстояние между буксами крайних колесных пар со стороны внутреннего рельса уменьшается  $(L-2\Delta)$ , а со стороны внешнего рельса увеличивается  $(L+2\Delta)$ , за счет чего обеспечивается радиальная установка колесных пар.

При переходе тележки из кривого в прямой участок пути под действием сил тяжести боковые рамы, скользя по наклонной поверхности балансира, смещаются к центрам пазов балансира, тем самым центрируя его и предотвращая излишние колебания средней колесной пары.

Валики 9 при нормальных режимах работы тележки не воспринимают нагрузку и служат как предохранительные устройства, препятствующие самопроизвольному расформированию тележки при нештатных ситуациях (сходах), а также при ремонтных манипуляциях, связанных с подъемом тележки.

Также особенностью трехосной тележки с центральным подвешиванием является наличие двух пар рессорных комплектов, при этом нагрузка на одну пару рессорного комплекта в 1,5 раза ниже, чем у двухосных тележек с центральным подвешиванием и соответствующей осевой нагрузкой [10]. По-

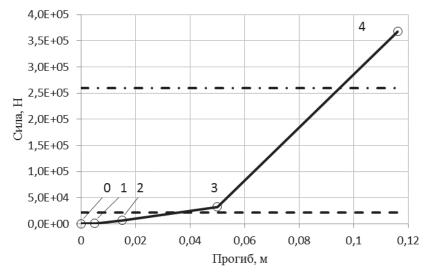
этому при выборе характеристик рессорного подвешивания решалась задача по снижению жесткости в сравнении с двухосной тележкой модели 18-9855 [11]. Было рассмотрено несколько вариантов исполнения рессорного подвешивания, отличающегося количеством, жесткостью и расположением как наружных, так и внутренних пружин [12].

Коэффициент относительного трения определялся по формуле

$$\phi = \frac{P_{\text{вни3}} - P_{\text{вверх}}}{P_{\text{вни3}} + P_{\text{вверх}}},$$

в которой  $P_{_{\mathrm{BHИ3}}}$  и  $P_{_{\mathrm{BBepx}}}$  — сила при движении клина соответственно вниз и вверх:

$$\begin{split} P_{\text{вни3}} &= P + 2P_{\text{кл}} \cdot f_T \times \\ &\times \frac{\sin \alpha - f_N \cdot \cos \alpha}{(1 + f_T \cdot f_N) \cdot \cos \alpha + (f_N - f_T) \cdot \sin \alpha}, \\ P_{\text{вверх}} &= P - 2P_{\text{кл}} \cdot f_T \times \\ &\times \frac{\sin \alpha + f_N \cdot \cos \alpha}{(1 + f_T \cdot f_N) \cdot \cos \alpha - (f_N - f_T) \cdot \sin \alpha}, \end{split}$$



- —⊖ Вертикальная силовая характеристика рессорного комплекта
- Нагрузка на рессорный комплект при массе тары
- Нагрузка на рессорный комплект при массе брутто

Рис. 6. Вертикальная силовая характеристика рекомендуемого варианта рессорного комплекта трехосной тележки

где  $P_{_{\rm KJ}}$  – нагрузка, действующая на двухрядную пружину, расположенную под клином, для порожнего и груженого вагона:

$$P_{\scriptscriptstyle \rm KJI} = c_{\scriptscriptstyle \rm KJI}^{\scriptscriptstyle \rm BH} \cdot \Delta^{\scriptscriptstyle \rm BH} + c_{\scriptscriptstyle \rm KJI}^{\scriptscriptstyle \rm Hap} \cdot \Delta^{\scriptscriptstyle \rm Hap} \, ;$$

 $\Delta^{\text{вн}}$ ,  $\Delta^{\text{нар}}$  — прогиб внутренней и наружной подклиновых пружин под весом порожнего или груженого вагона;  $f_T$  — коэффициент трения между вертикальной поверхностью клина и фрикционной планкой боковой рамы,  $f_T=0,38;\ f_N$  — коэффициент трения между наклонной поверхностью клина и карманом надрессорной балки,  $f_N=0,15;\ P$ — нагрузка, действующая на рессорный комплект под весом порожнего или груженого вагона.

В результате были установлены основные параметры рессорного комплекта четырех вариантов центрального подвешивания, рассчитаны величины рамной силы и коэффициента вертикальной динамики, определено сопротивление трехосной тележки относительному продольному перемещению между боковыми рамами при перемещении, равном 10 мм. Из рассматриваемых вариантов рекомендуется

использовать вариант, для которого получены наилучшие результаты расчетов (рис. 6).

Итогом проделанной работы является создание новой схемы трехосной тележки, на основании которой на данный момент разрабатывается эскизный проект трехосной тележки с осевой нагрузкой 25 тс с радиальной установкой колесных пар.

## Библиографический список

- 1. The Car and Locomotive Cyclopedia / Red. William W. Kratville. Omaha: Simmons-Boardman Books Inc., 1997. 1136 p.
- 2. Альбом-справочник тележки грузовых вагонов колеи 1520 мм № 745–2011. М. : ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», 2011. 226 с.
- 3. Бороненко Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. -2013. № 5. С. 68–73.
- 4. Мордвинкин Н. А. Трехосные тележки грузовых вагонов большой грузоподъемности / Н. А. Мордвинкин. М.: ЦИНТИАМ, 1964. 58 с.

- 5. International heavy haul association STS-conference "Wheel/rail interface" = Международная конференция Ассоциации тяжеловесного движения «Проблемы взаимодействия колеса и рельса». М.: Интекст, 1999. 440 с.
- 6. Комарова А. Н. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов / А. Н. Комарова, Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. 2014. N 5. С. 69—72.
- 7. Михальченко Г.С. Оценка износа колес грузового тепловоза с радиальной установкой колесных пар / Г.С. Михальченко, А.С. Юршин // Вестн. БГТУ. -2007. № 2. -C. 13–18.
- 8. Грачева Л.О. Конструктивные особенности и динамические качества трехосной тележки типа УВЗ-9м / Л.О. Грачева, П.С. Анисимов. М. : Транспорт, 1966.-33 с.
- 9. Орлова А. М. Влияние параметров, характеризующих состояние тележек грузовых вагонов, на боковой износ гребней колес / А. М. Орлова, Е. И. Артамонов // Транспорт Урала. 2008.— № 3. С. 36—40.
- 11. Орлова А.М. Тележка модели 18-9810 по технологии Barber S-2 // VI Междунар. науч.-технич. конференция «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» / А.М. Орлова, Е.А. Щербаков. СПб.: ПГУПС, 2009. С. 48—52.
- 10. Манашкин Л. А. Моделирование и особенности работы клиновых фрикционных гасителей колебаний четырехосных грузовых вагонов / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин // Транспорт Российской Федерации. 2016. № 3. С. 20—24.
- 12. Гарбузов В. Н. Расчет поперечной жесткости винтовых цилиндрических пружин рессорного подвешивания вагона / В. Н. Гарбузов, В. И. Фльченко. М.: Транспорт, 1966. 255 с.

# References

- 1. *The Car and Locomotive Cyclopedia*. Ed. William W. Kratville. Omaha, Simmons-Boardman Books Inc. Publ., 1997, 1136 p.
- 2. Albom-spravochnik telezhky gruzovykh vagonov kolei 1520 mm no. 745–2011 [Manual and reference

- book on freight-car trucks of 1520 mm gage no. 745–2011]. Moscow, PKB TsV OAO "RZhD" [Design bureau of OAO "RZhD" rolling stock] Publ., 2011, 226 p. (In Russian)
- 3. Boronenko Y. P. Strategycheskiye zadachy vagonostroiteley v razvitii tyazhelovesnogo dvyzheniya [Strategic objectives of car constructors in heavy haul traffic development]. *Transport of the Russian Federation*, 2013, no. 5, pp. 68–73. (In Russian)
- 4. Mordvynkyn N.A. *Trekhosniye telezhky gru-zovykh vagonov bolshoy gruzopodyemnosty* [*Three axle bogies of high capacity freight cars*]. Moscow, Central institute of scientific and technical information on automation and mechanical engineering Publ., 1964, 58 p. (In Russian)
- 5. Mezhdunarodnaya konferentsiya Assotsiatsii tyazhelovesnogo dvyzheniya "Problemy vzaimodeystviya kolesa i relsa" [*International heavy haul association STS-conference "Wheel/rail interface"*]. Moscow, Intekst Publ., 1999, 440 p.
- 6. Komarova A. N. & Boronenko Y. P. Sravnytelnaya otsenka soprotyvleniya dvyzheniyu gruzovykh vagonov na telezhkakh razlychnykh typov [Comparative valuation of resistance to freight cars operation on different types of bogies]. *Transport of the Russian Federation*, 2014, no. 5, pp. 69–72. (In Russian)
- 7. Mykhalchenko G. S. & Yurshyn A. S. Otsenka iznosa koles gruzovogo teplovoza s radialnoy ustanovkoy kolesnykh par [Wheel wear assessment of a diesel freight locomotive with radial wheel pair installation]. *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2007, no. 2, pp. 13–18. (In Russian)
- 8. Gracheva L.O. & Anysymov P.S. Konstruktyvniye osobennosty i dynamycheskiye kachestva trekhosnoy telezhky typa UVZ-9m [Design features and dynamic qualities of an UVZ-9m type three axle bogie]. Moscow, Transport Publ., 1966, 33 p. (In Russian)
- 9. Orlova A. M. & Artamonov Y. I. Vliyaniye parametrov, kharakteryzuyushykh sostoyaniye telezhek gruzovykh vagonov, na bokovoy iznos grebney koles [The influence of parameters, characterizing the state of freight bogies]. *Transport of the Urals*, 2008, no. 3, pp. 36–40. (In Russian)
- 11. Orlova A. M. & Sherbakov Y. A. Telezhka modely 18–9810 po tekhnologii Barber S-2 [Model 18–

9810 bogie constructed on the basis of Barber S-2 technology]. VI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Podvyzhnoy sostav XXI veka: idey, trebovaniya, proyekty" [The 6<sup>th</sup> International scientific and technical conference "Rolling stock of the 21<sup>st</sup> century: ideas, requirements, projects"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2009, pp. 48–52. (In Russian)

10. Manashkyn L.A. & Myamlyn S.V. Modelyrovaniye i osobennosty raboty klynovykh friktsionnykh gasyteley kolebaniy chetyrekhosnykh gru-

zovykh vagonov [Modeling and peculiarities of a wedge-type friction shock absorbers operation of four axle bogies]. *Transport of the Russian Federation*, 2016, no. 3, pp. 20–24. (In Russian)

12. Garbuzov V. N. & Phylchenko V. I. Raschet poperechnoy zhestkosty vyntovykh tsylyndrycheskykh pruzhyn ressornogo podveshyvaniya vagona [Lateral stiffness calculation of coiled springs of bogie suspension of a car]. Moscow, Transport Publ., 1966, 255 p. (In Russian)

ЦЫГАНСКАЯ Людмила Валериевна – канд. техн. наук, доцент, tcyganskaya@gmail.com; \*КОР-ШУНОВ Владимир Сергеевич – аспирант, kormir91@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4

# Ю.В. Чернышева

# ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА С ДВИГАТЕЛЯМИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ВАГОНОВ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

Цель: Исследование влияния колебаний вагонов в вертикальной плоскости при движении по неровностям пути на скорость и ускорение поезда с локомотивом, имеющим двигатели ограниченной мощности. Методы: Применены законы теоретической механики, правила тяговых расчетов. Результаты: Составлены уравнения динамики колебаний вагонов при взаимодействии их с локомотивом. Представлена расчетная схема состава, совершающего горизонтальные и вертикальные перемещения. Построены графические зависимости вертикальных перемещений центра масс вагона в вертикальной плоскости от времени движения, продольного ускорения поезда от времени движения, зависимость скорости поезда от времени движения при различных длинах неровностей пути. Практическая значимость: На основе полученных зависимостей возможно установить скорость движения вагона, при которой возникает резонанс, а следовательно, увеличение расхода энергии локомотива. Уменьшение влияния колебаний вагонов в вертикальной плоскости при движении по неровностям пути на скорость и ускорение поезда облегчит ведение длинносоставных поездов, а также проблему ведения поезда локомотивом с ограниченной мощностью. Результаты аналитических исследований могут быть применены при разработке рекомендаций по работе с дорезонансной или послерезонансной скоростью, а также при проектировании новых вагонов с высокими динамическими показателями.

**Ключевые слова:** Вертикальные колебания, динамика вагона, ограниченная мощность, резонансная скорость, скорость и ускорение поезда.

\*Julia V. Chernysheva, senior lecturer, juliachernysheva@bk.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) THE SPECIFICITIES OF FREIGHT TRAIN OPERATION WITH RESTRICTED POWER ENGINES IN CASE OF RESONANT OSCILLATIONS OF CARS

## **Summary**

**Objective:** To study the influence of oscillations of cars in the vertical plane when moving along the track with a rough shape surface on the speed and acceleration of a train with a locomotive having restricted power engines. **Methods:** The laws of engineering mechanics and the rules of grade computations were applied. **Results:** The equations of dynamics of oscillations of cars were composed in the process of their interaction with a locomotive. A design model of a train, performing horizontal and vertical movement, was presented. Characteristic curves of center of mass of car vertical movements in a vertical plane were constructed, as well as forward acceleration of a train and train speed curves depending on travel time, in case of track irregularity of different length. **Practical importance:** On the basis of the obtained graphs, it was possible to determine the train speed at which the resonance occurs and, therefore, the increase in locomotive energy consumption. Minimization of car oscillations influence in the vertical

plane on the speed and train acceleration when moving along the track with a rough shape surface will simplify the process of driving long trains, as well as the problem of driving the train with a restricted power locomotive. The results of the analytical study may be applied in the development of instructions for use in the sphere of the speed before and after the resonance, as well as the design of new cars with high dynamic indices.

**Keywords:** Heaving oscillations, dynamics of a car, restricted power, resonant speed, train speed and the rate of acceleration.

#### Введение

Железнодорожный транспорт – один из крупнейших потребителей энергоресурсов, поэтому снижение количества используемого топлива и электроэнергии является важнейшей задачей для повышения его конкурентоспособности и дальнейшего развития. В последнее время в России ведутся работы, направленные на понижение энергозатрат, но они в основном касаются совершенствования конструкции локомотивов и рекуперации энергии. Вопросам уменьшения сопротивления движения грузовых вагонов после перехода на подшипники качения уделяется недостаточно внимания. В то же время в работах [1,2] показано, что рассеивание энергии при колебаниях вагонов вносит существенный вклад в сопротивление движению и энергозатраты на тягу поездов. В настоящее время разрабатываются так называемые энергооптимальные тяговые расчеты [3], которые должны минимизировать расходы энергии на тягу поездов за счет учета плана и профиля пути, длины состава, загруженности вагонов, ограничений скорости движения. Однако, на наш взгляд, в энергооптимальном расчете из условия минимума работы необходимо учитывать и энергию, расходуемую на колебания вагонов и зависящую от соотношения частот собственных и вынужденных колебаний. При резонансных колебаниях вагонов существенно увеличивается рассеивание энергии в гасителях колебаний вагонов. Кроме того, известны возможности проявления нелинейных эффектов взаимодействия колеблющихся вагонов с источником энергии [4]. В данной статье ставится задача оценить влияние резонансных колебаний на движение поезда.

# Обзор выполненных работ

Модели динамики поезда обычно делят на три типа: продольной, поперечной и вертикальной динамики. Первые две модели наиболее часто используются для изучения вопросов формирования составов, пропуска поездов, разработки тормозов. Модели вертикальной динамики предназначены для исследования условий саморасцепа. Однако во всех этих моделях основное сопротивление движению определяется эмпирическими формулами и не учитывает возможность взаимодействия между колебаниями вагонов и источником энергии. С увеличением весов поездов вероятность такого взаимодействия возрастает.

В работах [1, 2, 5] исследовалось влияние характеристик тележек на сопротивление движению грузовых вагонов. Дана оценка влияния вертикальных и горизонтальных колебаний вагона на сопротивление движению поезда и расход энергии на тягу поездов. Однако в данных работах не учитывалось влияние колебаний вагонов на движение поезда и не рассматривалось их взаимодействие с тяговыми двигателями локомотивов.

В работе [6] изучались линейные и нелинейные колебательные системы, взаимодействующие с неидеальными источниками энергии – электродвигателями. В условиях, когда запас мощности источника энергии невелик, ход процесса очень сильно зависит от характеристики источника энергии. Изменения частоты колебаний связаны с изменением амплитуды колебаний. В зоне больших амплитуд скорость прохождения системы через резонанс резко замедляется; с уменьшением амплитуды она возрастает.

В работах [4, 7] получены уравнения, описывающие движение экипажа по пути с неровностями и с учетом взаимодействия между источником энергии и колебаниями этого экипажа. Приведена амплитудно-частотная характеристика такой нелинейной системы и показана возможность возникновения эффекта Зоммерфельда, т.е. при недостаточной мощности двигателя амплитудно-частотная характеристика имеет вид, типичный для «жесткой» нелинейной системы [8].

В настоящее время большое внимание уделяется экономии электроэнергии путем энергооптимизации режимов вождения поездов. С этой целью производится энергооптимальный тяговый расчет для определения режимов управления движением поезда, который обеспечит минимальный расход энергии на тягу с учетом плана, профиля пути, длины состава, типа и загруженности вагонов, тяговых и тормозных характеристик локомотива, ограничений скорости движения. Однако, чтобы гарантировать минимальный расход энергии на тягу поезда, на наш взгляд, необходимо ввести уточненный расход энергии на преодоление резонансных колебаний при движении состава по неровностям пути.

# Математическая модель поезда

При исследовании было принято: локомотив тянет за собой состав из n вагонов, которые обладают только одной степенью свободы — подпрыгиванием. Все вагоны груженые, имеют одинаковые массу и жесткость. Соединение между вагонами осуществляется автосцепками с шарнирами по концам, так что влиянием продольных сил на вертикальные перемещения можно пренебречь, и колебания каждого вагона являются независимыми, а продольные перемещения всех вагонов равны. Поезд, состоящий из n вагонов, может быть описан с помощью модели, имеющей n+1 степеней свободы (рис. 1).

На рис. 1 приведены следующие параметры: h/2 – амплитуда неровности пути (м), L –

расстояние между центрами масс вагонов (м),  $L_{_{\rm II}}$  – длина неровности пути (м).

Для составления дифференциального уравнения движения состава с учетом неровности пути были использованы уравнения Лагранжа второго рода [9]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \qquad (1)$$

где кинетическая энергия

$$T = \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{m_i \vec{V}_i^2}{2} + \frac{J_i \dot{\phi}_i^2}{2} \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \left( \frac{m_i (\dot{z}_i^2 + \dot{x}_i^2)}{2} + \frac{J_i \dot{\phi}_i^2}{2} \right);$$

потенциальная энергия

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i(\Delta_i)^2}{2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{c_i(z_i - z_{Ki} + f_{CT})^2}{2};$$

энергия рассеивания

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n} \frac{\beta(\dot{z}_{i} - \dot{z}_{\kappa i})^{2}}{2};$$

 $Q_i = L(\dot{x})$  — обобщенная внешняя сила;  $z_i$  и  $\dot{z}_i$  — перемещение и скорость перемещения центра масс і-го вагона в вертикальном направлении;  $x_i$  и  $\dot{x}_i$  – перемещение и скорость перемещения центра масс і-го вагона в продольном направлении;  $f_{\rm cr}$  – статический прогиб рессорного подвешивания;  $m_i$  – масса i-го вагона;  $J_i$  – суммарный момент инерции колесных пар вагонов; c,  $\beta$  – коэффициенты жесткости и вязкого сопротивления эквивалентной ступени подвешивания (на вагон) при ее деформации вдоль вертикальной оси;  $z_{\kappa i}$  функция, представляющая суммарное кинематическое возмущающее воздействие на вагон при движении его по рельсовым неровностям; i = 1, 2, ..., n — порядковый номер вагона;  $L(\dot{x})$  – равнодействующая силы тяги P и силы сопротивления движению  $R(\dot{x})$  вдоль пути  $L(\dot{x}) = P - R(\dot{x})$ .

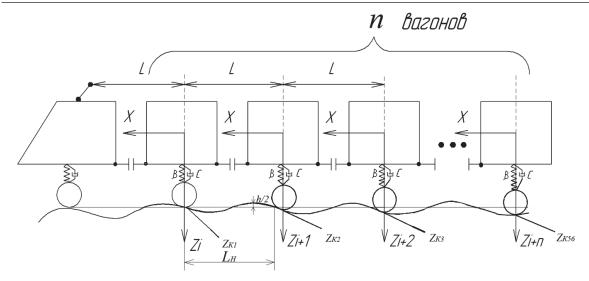


Рис. 1. Расчетная схема состава, состоящего из n вагонов

При описании рельсовых неровностей функцией  $\eta = \frac{h}{2}\sin\frac{2\pi x}{L_{\rm H}}$  возмущение, вызывающее колебания подпрыгивания 4-осного вагона, можно представить суммой четырех гармонических функций с одинаковой частотой, но с различными начальными фазами [10]. Тогда функция  $z_{\rm K}i$  описывается уравнением

$$z_{\kappa i} = \frac{1}{4} \sum_{j=4i-3}^{4i} z_j =$$

$$= \frac{1}{4} \sum_{j=4i-3}^{4i} \frac{h}{2} \sin(\omega x - \alpha_j) =$$

$$= \frac{h}{2} D_i \sin(\omega x - \alpha_i),$$

$$i = 1, 2, ..., n,$$
(2)

где  $\frac{h}{2}$ ,  $L_{_{\rm H}}$  – их амплитуда и длина; x – координата вдоль оси пути;  $\omega$  – частота вертикальных колебаний колесных пар относительно оси неровности ( $\omega = \frac{2\pi V}{L_{_{\rm H}}}$ ); V – скорость движения;  $\alpha_j = \frac{2\pi l_j}{L_{_{\rm H}}}$  – начальная фаза движения j-й колесной пары;  $l_j$  – расстояние между 1-й и j-й колесными парами поезда

вдоль оси х, в нашем случае расстояния между

колесными парами первой и второй  $l_T=l_{12}$ , первой и третьей  $l_B=l_{13}$ , первой и четвертой  $l_B+l_T=l_{14}$ ;  $l_{15}=l_{\rm cq}$  – расстояние между первой и пятой колесными парами (равное расстоянию между автосцепками вагонов);  $D_i=\frac{1}{4}\times$ 

$$imes \sqrt{E_{i1}^2 + E_{i2}^2}$$
;  $lpha_i = rctg rac{E_{i2}}{E_{i1}}$ ;  $E_{i2} = \sum_{j=4i-3}^{4i} \cos lpha_j$ ;  $E_{i1} = \sum_{j=4i-3}^{4i} \sin lpha_j$ ;  $j$  — порядковый номер колесной пары в поезде.

На рис. 2 изображен четырехосный вагон, для которого произведен расчет функции  $z_{\kappa i}$  .

После подстановки в уравнение (1) выражения (2) и формул

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_i} \right) = m \ddot{z}_i,$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) = \sum_{i=1}^n \left( m_i + \frac{J_i}{r^2} \right) \ddot{x} = M \ddot{x},$$

$$M \ddot{x} = \sum_{i=1}^n \left( m_{vi} + \frac{J_i}{r^2} \right),$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial z_i} = c(z_i - z_{\kappa i}),$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = c(z_i - z_{\kappa i} + f_{\rm ct}) \frac{\partial y}{\partial x},$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{z}} = \beta(\dot{z}_i - \dot{z}_{\kappa i}),$$

$$\frac{\partial z_{\kappa i}}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h}{2} \omega \dot{x} D_i \cos(\omega x - \alpha_i) \right) =$$

$$= \frac{h}{2} \omega D_i \cos(\omega x - \alpha_i).$$

Система дифференциальных уравнений движения состава в окончательном виде примет вид

$$\begin{cases}
M\ddot{x} - \sum_{i=1}^{n} [c(z_{i} - \frac{h}{2}D_{i}\sin(\omega x - \alpha_{i}) + \\
+ f_{ct}) \frac{h}{2}D_{i}\omega\cos(\omega x - \alpha_{i}) + \\
+ \beta(\dot{z}_{i} - \frac{h}{2}D_{i}\omega\dot{x}\cos(\omega x - \alpha_{i})) \frac{h}{2} \times \\
\times D_{i}\omega\cos(\omega x - \alpha_{i})] = L(\dot{x}), \\
m_{i}\ddot{z}_{i} + cz_{i} + \beta\dot{z}_{i} = c\frac{h}{2}D_{i}\sin(\omega x - \alpha_{i}) + \\
+ \beta\frac{h}{2}D_{i}\dot{x}\omega\cos(w x - \alpha_{i}), \\
\dots \\
m_{n}\ddot{z}_{n} + cz_{n} + \beta\dot{z}_{n} = c\frac{h}{2}D_{n}\sin(\omega x - \alpha_{n}) + \\
+ \beta\frac{h}{2}D_{n}\dot{x}\omega\cos(w x - \alpha_{n}).
\end{cases}$$
(3)

Описание компьютерной динамической модели поезда, учитывающей влияние вертикальных колебаний вагонов при движении по неровностям пути на скорость и ускорение локомотива, имеющего двигатели ограниченной мощности

Математическая модель поезда реализована в среде MatLab — Simulink [11] на основе системы уравнений (3). Она включает модуль электровоза (I); блоки (2–4), задающие сопротивление движению состава, электровоза и дополнительное сопротивление движению от уклона; модуль (5), учитывающий влияние

вертикальных колебаний вагонов от неровностей пути на движение поезда (рис. 2). Параметры электровоза и вагонов приведены в таблине.

На рис. 3 изображен модуль 1, задающий силу тяги электровоза в зависимости от тока уставки и скорости движения поезда. Модуль 2ЭС5К реализован согласно расчетной схеме силовой цепи и функциональной схеме системы автоматического управления электровоза 2ЭС5К [11], при идеально сглаженном выпрямленном токе. До скорости  $V_{on1}$  по обмотке возбуждения тягового электродвигателя (блок СF) проходит 98% тока якоря; от скорости  $V_{\scriptscriptstyle on1}$  до  $V_{\scriptscriptstyle on2}$  по обмотке возбуждения тягового электродвигателя (1-я ступень ослабления возбуждения) проходит 70% тока якоря; от скорости  $V_{on2}$  до  $V_{on3}$  по обмотке возбуждения тягового электродвигателя (2-я ступень ослабления возбуждения) проходит 52% тока якоря; от скорости  $V_{on4}$  по обмотке возбуждения тягового электродвигателя (3-я ступень ослабления возбуждения) проходит 43 % тока якоря. Значения скоростей определяют границы диапазона стабилизации тока якорей на заданной уставке. Диапазон регулирования тока тяговых электродвигателей в зависимости от тока уставки определен по осциллограмме выпрямленного напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя, полученной на компьютерной модели силовой цепи и микропроцессорной системы автоматического управления тяговыми электродвигателями электровоза переменного тока с зонно-фазовым регулированием напряжения в тяговом режиме [11].

Модуль 1 (рис. 3) задает силу тяги локомотива по выражению

$$P = \eta \cdot 3,6 C_{\mathbf{v}} \Phi(\beta_0 I_{\mathbf{VCT}}) I_{\mathbf{VCT}} n_{\mathbf{CEKII}} n_{\mathbf{BИ\Pi}} n_{\mathbf{ДB}},$$

где P — сила тяги электровоза, H;  $C_v \phi(\beta_0 I_{VCT})$  — характеристика намагничивания тяговых электродвигателей электровоза 2ЭС5К [11], (В/км/ч);  $\beta_0$  — коэффициент, учитывающий, что 98, 70, 52 и 43% тока якоря проходит по обмотке возбуждения тягового электродвигате-

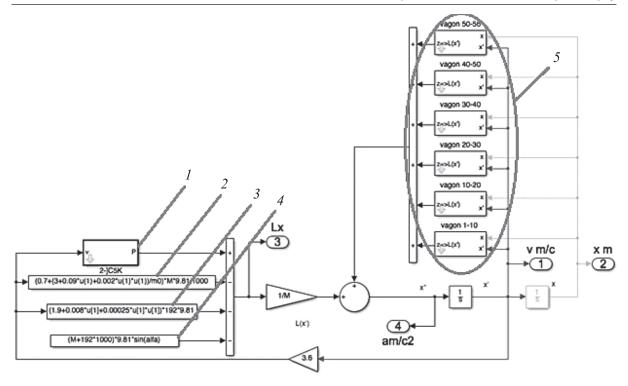


Рис. 2. Компьютерная динамическая модель поезда, учитывающая влияние вертикальных колебаний вагонов при движении по неровностям пути на скорость и ускорение локомотива, имеющего двигатели ограниченной мощности

# Параметры электровоза и вагонов [14, 15]

Параметры	Условное обозначение	Принятое значение	Единица измерения
Масса обрессоренных частей с грузом <i>i</i> -го вагона	$m_{i}$	85,7	Т
Приведенная масса поезда	M	$(94 + 1,3 / 0,475^2) \cdot 56$	Т
Жесткость рессорного комплекта	С	16000	кН/м
Параметр сопротивления	β	$\beta = 0.1\beta_{\rm kp} , \ \beta_{\rm kp} = \sqrt{cm}$	(кН·с)/м
Амплитуда неровности пути	h/2	0,005	M
Статический прогиб рессорного комплекта	$f_{ m cr}$	0,05	M
Длина неровности пути	$L_{_{ m H}}$	12,5; 6,25	M
Расстояние между центрами масс вагонов	L	13,920	M
База тележки вагона = расстояние между 1-й и 2-й колесными парами	$l_T = l_{12}$	1,850	M
База вагона	$l_B = l_{23}$	8,650	M
Средняя нагрузка на ось	$q_{_0}$	23,5	Т
Масса электровоза	$m_{_{9}}$	192	Т
Количество вагонов в составе	n	56	ШТ.

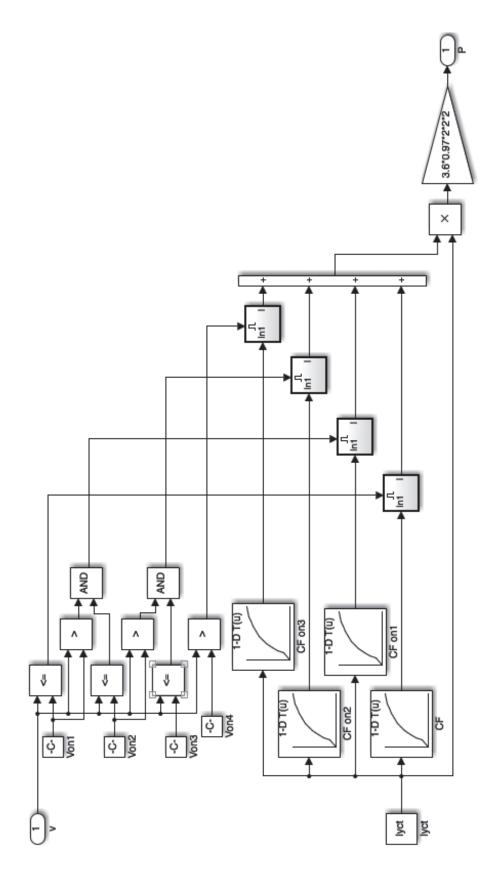


Рис. 3. Модуль I, задающий силу тяги локомотива

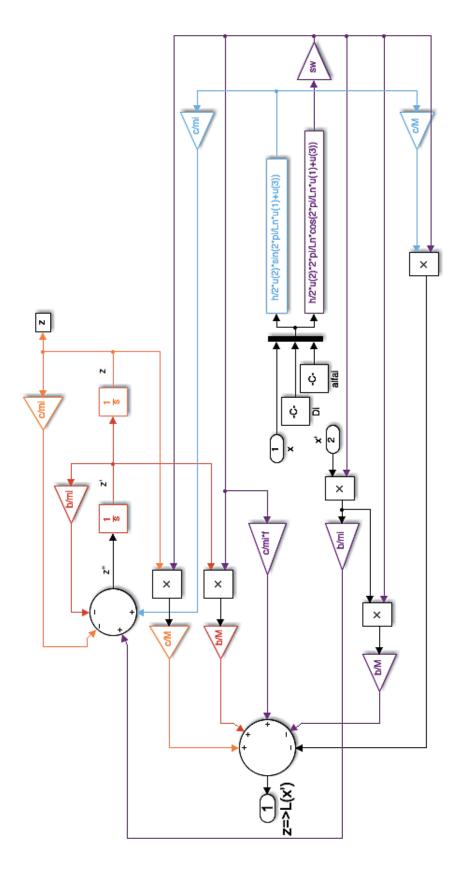


Рис. 4. Модуль 5, учитывающий вертикальное перемещение центра масс вагона

ля;  $\eta$  — коэффициент полезного действия тягового электродвигателя ( $\eta$  = 0,97);  $n_{\text{СЕКЦ}}$  — количество секций электровоза;  $n_{\text{ВИП}}$  — количество выпрямительно-инверторных преобразователей 1-й секции электровоза;  $n_{\text{ДВ}}$  — количество параллельно включенных тяговых двигателей 1-й секции электровоза.

Блоки 2–4 задают сопротивление движению состава  $W_0$  (H), электровоза  $W_{09}$  (H) и дополнительное сопротивление движению от уклона  $W_i$  (H) [12, 13]:

$$W_0 = 0.7 + \frac{3 + 0.09v + 0.002v^2}{q_0} M \cdot 9.81,$$

$$W_{0.9} = (1.9 + 0.008v + 0.00025v^2)m_9,81,$$

$$W_i = 1000(m + m_3) \cdot 9.81 \sin \alpha$$
,

где v – скорость (км/ч);  $\alpha$  – угол наклона профиля пути к горизонту [12, 16].

Модуль 5 состоит из 56 подмодулей, составленных на основании системы уравнений (3) для каждого вагона (рис. 4).

Аналогично сформированы и остальные блоки для всех 56 вагонов.

## Результаты

На рис. 5–7 представлены результаты моделирования движения поезда с учетом и без влияния вертикальных колебаний на его скорость и ускорение. Какиз них следует, вертикальные колебания z влияют на продольное ускорение поезда a. Это оказывает негативное воздействие на увеличение скорости при достижении ее 49 км/ч ( $L_{\rm H}$  = 6,25 м) или 98 км/ч ( $L_{\rm H}$  = 12,5 м). Увеличить скорость в данном случае невозможно из-за ограниченной мощности электрических двигателей. Скоростям 49 и 98 км/ч соответствуют резонансные скорости, определенные по статье [4].

Результаты моделирования согласуются с известными случаями, когда машинисту локомотива не удавалось увеличить скорость движения поезда до желаемого значения, несмотря на соответствующее передвижение ручки контролера. Стоит отметить, что причину задержек в разгоне поезда линейные модели, используемые в тяговых расчетах, не описывают.

В результате изучения влияния колебаний вагонов в вертикальной плоскости при движении по неровностям пути на скорость и ускорение поезда с локомотивом, имею-

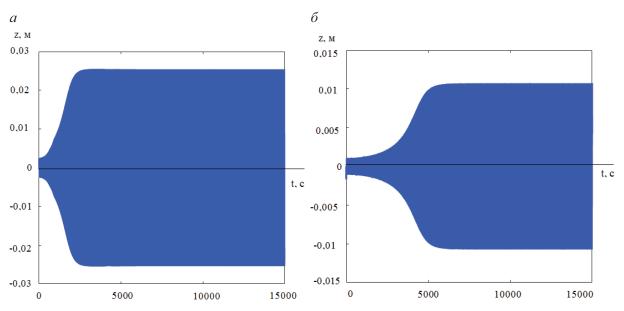
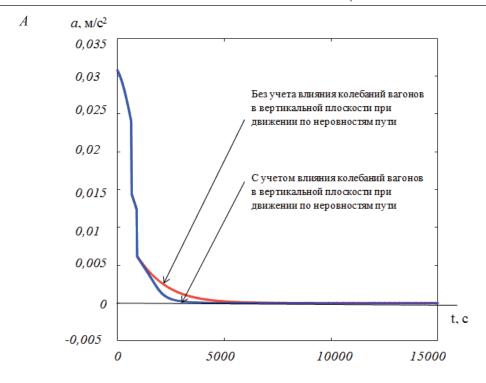


Рис. 5. Зависимость перемещения центра масс первого вагона в вертикальной плоскости от времени движения при  $L_{_{\rm H}}$  =12,5 м (a),  $L_{_{\rm H}}$  = 6,25 м ( $\delta$ )



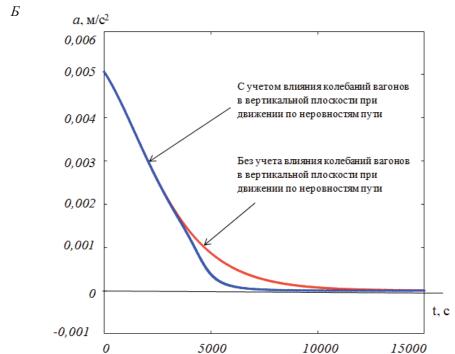


Рис. 6. Зависимость продольного ускорения поезда от времени движения при  $L_{_{\rm H}}$  = 12,5 м (A),  $L_{_{\rm H}}$  = 6,25 м (B)

щим двигатели ограниченной мощности, были установлены скорость движения, при которой возникает резонанс, и, следовательно, бросок/увеличение расхода энергии

локомотива, работающего в тяговом режиме, при совпадении собственных частот колебаний вагонов и частоты неровности пути.

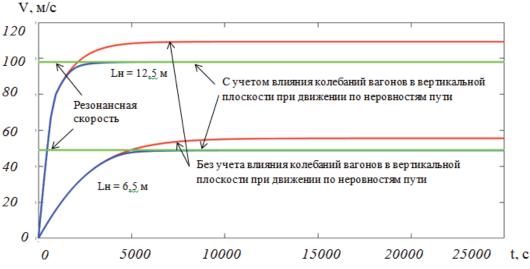


Рис. 7. Зависимость скорости поезда от времени движения

#### Заключение

Вертикальные резонансные колебания вагонов оказывают существенное влияние на движение поезда при скоростях 90–100 км/ч.

Уменьшение (или преодоление) влияния колебаний вагонов в вертикальной плоскости при движении по неровностям пути на скорость и ускорение поезда облегчит ведение длинносоставных поездов, а также ведение поезда локомотивом с ограниченной мощностью.

Для полной оценки влияния колебаний вагонов на динамику поезда планируется рассмотреть [14, 15]: 1) влияние боковых колебаний (в том числе автоколебаний); 2) различия в загрузке вагонов; 3) движение по случайным неровностям пути.

#### Библиографический список

- 1. Комарова А. Н. Влияние типа и параметров гасителей колебаний вагона на сопротивление движению / А. Н. Комарова, Ю. П. Бороненко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2014. Вып. 2 (39). С. 35—41.
- 2. Комарова А. Н. Сравнительная оценка сопротивления движению грузовых вагонов на тележках различных типов / А. Н. Комарова, Ю. П. Боронен-

- ко // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 2 (23). С. 69—72.
- 3. Гапанович В. А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник; под ред. В. А. Гапановича, В. Д. Авилова, Б. И. Иванова. М.: [б.и.], 2012. 619 с.
- 4. Вольфсон С. А. Энергетический баланс при движении железнодорожного экипажа по пути с неровностями / С. А. Вольфсон, Ю. Г. Минкин // Материалы сетевой науч.-технич. конференции 10–14 октября 1972 г. Омск, 1972. С. 139–145.
- 5. Komarova A. Calculating rolling resistance of freight wagons using multibody simulation / A. Komarova, Y. Boronenko, A. Orlova, Y. Romen // Program and abstracts of 23<sup>th</sup> Intern. Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (19.08–23.08.2013). Qingdao, 2013. Paper 15.3. (Расчет сопротивления движению вагонов с использованием многотельного моделирования // Программа и тезисы 23-го Междунар. симпозиума по динамике железнодорожного и автомобильного подвижного состава (19.08–23.08.2013). Чиньдао, 2013. Тезис 15.3.)
- 6. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением / В.О. Кононенко. М.: Наука, 1964. 254 с.
- 7. Доев В. С. Теория колебаний в транспортной механике / В. С. Доев, Ф. А. Доронин, А. В. Индейкин. М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2011.-352 с.

- 8. Пановко Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. 4-е изд., перераб. / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. М., 1987. 352 с. (Проблемы науки и технического прогресса.)
- 9. Кошелев В. А. Динамические свойства и колебания вагонов: учеб. пособие / В. А. Кошелев, Д. А. Василенко, А. В. Саидова. СПб.: ПГУПС, 2013. 134 с.
- 10. Кошелев В. А. Колебания вагонов в составе поезда : методические указания для самостоятельной работы / В. А. Кошелев, Л. И. Челнокова. Л. : ЛИИЖТ, 1989.-24 с.
- 11. Якушев А. Я. Исследование системы автоматического управления тяговыми электродвигателями электровоза переменного тока: учеб. пособие: в 2 ч. / А. Я. Якушев, И. П. Викулов. СПб.: ПГУПС, 2010. 41 с.
- 12. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М. : Транспорт, 1985. 287 с.
- 13. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. М. : Транспорт, 1983. -328 с.
- 14. Мазнев А. С. Динамика электрического подвижного состава / А. С. Мазнев, И. М. Попов, А. М. Евстафьев. СПб. : ПГУПС, 2007. 213 с.
- 15. Вершинский С. В. Динамика вагона / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, И. И. Челноков. М.: Транспорт, 1979. 352 с.
- 16. Нордлинг К. Справочник по физике для ученого и инженера / К. Нордлинг, Д. Остерман; пер. с англ. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 522 с.

#### References

- 1. Komarova A. N. & Boronenko Y. P. Vliyaniye typa i parametrov gasyteley kolebaniy vagona na soprotyvleniye dvyzheniyu [The influence of the type and parameters of shock absorbers of a car on resistance to motion]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2014, issue 2 (39), pp. 35–41. (In Russian)
- 2. Komarova A. N. & Boronenko Y. P. Sravnytelnaya otsenka soprotyvleniya dvyzheniyu gruzovykh vagonov na telezhkakh razlychnykh typov [Comparative assessment of freight cars rolling resistance on cars of different types]. *Transport of the Russian Federation*, 2014, no. 2 (23), pp. 69–72. (In Russian)

- 3. Gapanovich V.A. Energosberezheniye na zheleznodorozhnom transporte [Energy saving on railroad transport]. Ed. by V.A. Gapanovich, V.D. Avylov, B.I. Ivanov. Moscow, 2012, 619 p. (In Russian)
- 4. Volfson S.A. & Mynykyn Y.G. Energetycheskiy balans pry dvyzhenii zheleznodorozhnogo ekypazha po puty s nerovnostyamy [Power balance of a railway vehicle when moving along the track with rough shape surface]. *Materialy setevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii 10–14 oktyabrya 1972* [*Proceedings of an online science and technical conference dated October, 10–14<sup>th</sup> 1972*]. Omsk, 1972, pp.139–145 (In Russian)
- 5. Komarova A., Boronenko Y., Orlova A. & Romen Y. Calculating rolling resistance of freight wagons using multibody simulation. *Program and abstracts of 23th Intern. Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (19.08–23.08.2013)*. Qingdao, 2013, paper 15.3.
- 6. Kononenko V. O. *Kolebatelniye systemy s ogranychennym vozbuzhdeniyem [Oscillating systems with terminated actuation*]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 254 p. (In Russian)
- 7. Doyev V. S., Doronyn F. A. & Indeykyn A. V. *Teoriya kolebaniy v transportnoy mekhanyke* [*The theory of oscillations in transport mechanics*]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational center of railway transport] Publ., 2011, 352 p. (In Russian)
- 8. Panovko Y. G. & Gubanova I. I. *Ustoychyvost i kolebaniya uprugykh system: Sovremenniye kontseptsii, paradoksy i oshybky [Stability and oscillations of elastic systems: Modern strategies, paradoxes and errors*]. 4<sup>th</sup> revised ed. Moscow, 1987, 352 p. (In Russian)
- 9. Koshelev V.A., Vasylenko D.A. & Saidova A. V. *Dynamycheskiye svoystva i kolebaniya vagonov* [*Dynamic properties and oscillations of cars*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 134 p. (In Russian)
- 10. Koshelev V.A. & Chelnokova L.I. Kolebaniya vagonov v sostave poyezda. Metodycheskiye ukazaniya dlya samostoyatelnoy raboty [Oscillations of cars being a part of a train. Learning package]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1989, 24 p. (In Russian)
- 11. Yakushev A. Y. & Vykulov I. P. *Issledovaniye* systemy avtomatycheskogo upravleniya tyagovymy

- elektrodvygatelyamy elektrovoza peremennogo toka [The study of an automatic control system of an AC locomotive motor]. In 2 parts. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, 41p. (In Russian)
- 12. Pravyla tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty [The rules of grade computations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985, 287 p. (In Russian)
- 13. Rozenfeld V. Y., Isayev I. P. & Sydorov N. N. *Teoriya elektrycheskoy tyagy* [*Electric traction theory*]. Moscow, Transport Publ., 1983, 328 p. (In Russian)
- 14. Maznev A. S., Popov I. M. & Yevstafiyev A. M. *Dynamyka elektrycheskogo podvyzhnogo sostava* [*Dynamics of electric vehicles*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, 213 p. (In Russian)
- 15. Vershynskiy S. V., Danylov V. N. & Chelnokov I. I. *Dynamyka vagona* [*Dynamics of a car*]. Moscow, Transport Publ., 1979, 352 p. (In Russian)
- 16. Nordling C. & Osterman J. *Spravochnyk po phyzyke dlya uchenogo i inzhenera* [*Physics handbook for science and engineering*]; tr. from Eng. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011, 522 p. (In Russian)

\*ЧЕРНЫШЕВА Юлия Владимировна – старший преподаватель, juliachernysheva@bk.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.2

# А.В. Якушев, Д.В. Расщепкина, А.Н. Баранов

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В УГЛУ БУКСОВОГО ПРОЕМА БОКОВОЙ РАМЫ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Определение предельной длины усталостной трещины в углу буксового проема от эксплуатационных нагрузок на примере литой боковой рамы тележки модели 18-100, отражающей ее живучесть. **Методы:** Применены законы теоретической механики и методы математического моделирования. **Результаты:** Рассмотрены усталостные изломы литых боковых рам тележек грузовых вагонов, полученные в эксплуатации, методика определения живучести в испытаниях. Отмечено, что на стадии проектирования боковых рам прогнозирование скорости роста усталостных трещин в опасных сечениях, а в целом живучесть конструкции подлежат определению. Рассчитана предельная длина усталостной трещины в углу буксового проема литой боковой рамы тележки модели 18-100 при первом и третьем расчетных режимах по ГОСТ 33211—2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», результаты сопоставлены с серийным изломом боковой рамы в сети. **Практическая значимость:** Рассчитанные значения предельных длин трещин в углу буксового проема боковой рамы тележки модели 18-100 могут служить основой для сопоставления с предельными длинами трещин в других боковых рамах. Полученные оценки необходимы при разработке методики расчета надежности новых конструкционных решений после появления усталостных трещин до очередного планового ремонта.

**Ключевые слова:** Излом, боковая рама, трещина, расчетный режим, нагружение, живучесть, надежность, тележка грузового вагона.

**Alexey V. Yakushev**, Cand. Sci. Eng., associate professor, av-yakushev@yandex.ru; \***Daria V. Rasshepkyna**, postgraduate student, Rasschepkinadaria7742@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Aleksandr N. Baranov**, general director, 51@ukbv.ru (LLC "Ural Railcar-building design office") DETERMINATION OF FATIGUE CRACK CRITICAL LENGTH NI THE CORNER OF PEDESTAL JAW OPENING OF A FREIGHT-CAR TRUCK SIDE FRAME

#### Summary

**Objective:** To determine the critical length of a fatigue crack in the corner of pedestal jaw opening caused by working load, by the example of a molded side frame of an 18-100 model truck, thus, reflecting its vitality. **Methods:** The laws of theoretical mechanics and mathematical simulation methods were applied. **Results:** The fatigue cracks of molded side frame of freight-car trucks, obtained in the process of operation, were considered, as well as the method of vitality determination during tests. It was observed, that at the design stage of side frame, prediction of the fatigue crack rate of growth in critical sections and construction vitality in general is to be determined. The critical length of a fatigue crack in the corner of pedestal jaw opening of a molded side frame of an 18-100 model truck was calculated in the first and third design modes defined in GOST 33211–2014 "Freight cars. Regulations on bearing capacity and dynamic qualities". The results were compared online with the serial fracture of a side frame. **Practical importance:** The calculated values of critical lengths of cracks in the corner of pedestal jaw opening of a side frame of an 18-100 model truck may provide the basis for the correlation

with critical lengths of cracks in other types of side frames. The obtained evaluations are essential for the reliability design procedure of the new design concepts after the appearance of fatigue cracks until the next scheduled repair.

**Keywords:** Fracture, side frame, crack, design mode, loading, vitality, reliability, freight-car truck.

#### Введение

В период с 2004 по 2013 г. проведена масштабная реконструкция формовочных участков на заводах-изготовителях литых боковых рам, открыты новые предприятия-изготовители, внедрены автоматизированные методы расчета прочности в конструкторских бюро, ужесточены нормативные требования, создано более десятка новых конструкций боковых рам [1], расширено применение методов диагностики качества и т. д. С 2014 г. ведется работа над введением в действие ГОСТ по ресурсным испытаниям боковых рам в трехмерном пространстве, что приведет к масштабному переустройству испытательных центров.

Однако, несмотря на достигнутые результаты, происходят крушения грузовых вагонов по причине отказа литой боковой рамы. Изломы связаны с нарушением технологии изготовления и наличием внутренних литейных дефектов. Можно сделать выводы о том, что существующие конструкции боковых рам не обладают конструктивной стойкостью к вероятным нарушениям производственных процессов, приводят к отказу единицы подвижного состава в случае наличия усталостных трещин в углах буксовых проемов.

На рис. 1 приведен типовой излом боковой рамы в эксплуатации. Длина усталостной трещины, измеренная посередине стенок, составляет приблизительно 340 мм. Зарождение трещины наступило по радиусу внутреннего угла в буксовом проеме от наружной поверхности с последующим концентричным развитием в глубину и в стороны стенки. Продвижение усталостной трещины в боковых стенках отливки и достижение своей предельной длины привело к долому боковой рамы за короткий

промежуток времени с последующим крушением вагона. Боковая рама не обеспечила работоспособность после возникновения опасного отказа и перешла в предельное состояние до планового ремонта, проводимого при 500 тыс. км пробега.

Относительную живучесть боковых рам с естественной усталостной трещиной можно установить в ходе натурных испытаний на стендах по действующей отраслевой методике соотношением  $\Delta N/N$ , где  $\Delta N$  — количество вертикальных циклов нагружений детали с трещиной, N — общая долговечность. Данный показатель является факультативным, критерии относительной живучести боковых рам в каждом опасном сечении отсутствуют.

Разработчики боковых рам не прогнозируют стадию развития усталостных трещин с момента зарождения до наступления предельного состояния детали. Однако ГОСТ 32400-2013 «Рама боковая и балка надрессорная литых тележек железнодорожных грузовых вагонов» устанавливает требование надежности по обеспечению работоспособности боковых рам после появления усталостных трещин до очередного планового ремонта. Утвержденные единые методики расчетов надежности боковых рам отсутствуют. Определение живучести литых боковых рам на стадии проектирования с целью изучения соответствия требованиям ГОСТ 32400-2013 подлежит изучению. Поэтому расчеты предельных длин усталостных трещин в опасных сечениях, вновь создаваемых и модернизируемых боковых рам тележек грузовых вагонов, скоростей их развития, в том числе с учетом внутренних литейных дефектов [2], являются актуальными. Они позволят дополнить стандартные методики расчета запаса сопротивления усталости боковых рам, установить критерии живучести в эксплуата-

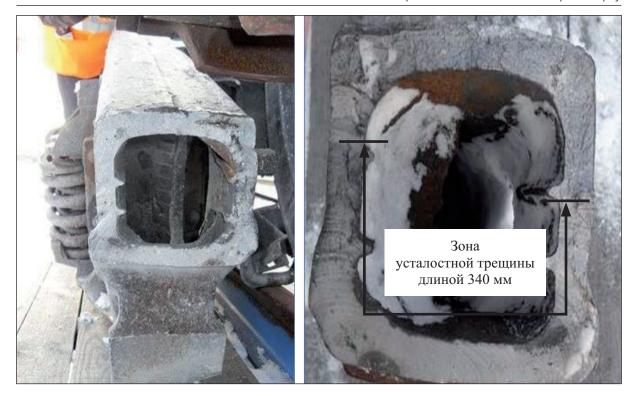


Рис. 1. Излом боковой рамы в углу буксового проема на перегоне Гудачи–Гонжа Забайкальской железной дороги при скорости 62 км/ч, пробеге 302,637 тыс. км

ции и повысить безопасность курсирования вагонов.

отделе предприятия, занятого расчетом прочности элементов ходовых частей вагонов.

# Постановка задачи

В настоящей работе поставлена задача: определить предельную длину усталостной трещины во внутреннем углу буксового проема боковой рамы тележки модели 18-100 грузового вагона при расчетных режимах I и III по ГОСТ 33211–2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» и сопоставить полученный результат с серийным изломом боковой рамы в сети.

Объект исследований выбран как базовый для всех эксплуатируемых литых боковых рам, широко изученных многими учеными, а также из-за наличия большого числа публикаций о прохождении этапов жизненного цикла.

Используемые ресурсы для выполнения поставленной задачи должны быть сопоставимы с ресурсами инженера в конструкторском

# Объект исследований

В качестве объекта использовалась литая боковая рама тележки грузового вагона модели 18-100 с максимальной расчетной статической осевой нагрузкой 230,5 кН (23,5 тс).

Марка конструкционной стали — 20 ГЛ в нормализованном состоянии по ГОСТ 32400—2013. Уровень механических свойств стали принят постоянным, не меняющимся на протяжении жизненного цикла, выбран по ГОСТ 32400—2013 для первой категории как наихудший: предел прочности  $\sigma_B^0 = 500$  МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2}^0 = 300$  МПа. Модуль упругости первого рода  $E_0 = 2,1\cdot10^5$  МПа, коэффициент поперечной деформации  $\mu_0 = 0,3$ . Допускаемые по ГОСТ 32400—2013 понижения  $\sigma_B^0$  на 100 МПа и  $\sigma_{0,2}^0$  на 60 МПа, вероятность которых появляется в случае их опреде-

ления на образцах, вырезанных из натурной боковой рамы, не учитывались. Механические свойства однородно распределены по сечению и поверхности боковой рамы.

Объемная твердотельная модель боковой рамы разработана в программе SolidWorks с номинальными размерами по чертежу, без учета нижних и верхних предельных отклонений, разнотолщинности стенок в одном поперечном сечении, вероятных внутренних литейных дефектов.

Влияние технологических факторов: литой поверхности, расположение отливки в форме, мест установки прибылей, механической обработки, наличия неметаллических включений, остаточных напряжений и т. д., не учитывалось.

# Граничные условия

Значения прикладываемых к объекту исследований нагрузок по расчетным режимам I и III представлены в таблице. Схемы, места приложения сил и закрепления приведены согласно ГОСТ 33211–2014.

# Критерий прочности и разрушения

Текущие эквивалентные напряжения  $\sigma_9^i$  в детали сравнивались с пределом текучести  $\sigma_{0,2}^0$  стали 20 ГЛ, умноженного на понижающие коэффициенты 0,85 и 0,65 режимов I и III соответственно. Прочность детали обеспечивалась, если эквивалентные напряжения  $\sigma_9^i$  в детали не превышали соответствующих пониженных пределов текучести  $\sigma_{0,2}^I$  и  $\sigma_{0,2}^{III}$ . Критерий прочности применяется только для установления зон концентрации максимальных напряжений на первом шаге расчета.

Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) при отрыве, полученные в ходе расчета боковой рамы с трещиной, сопоставляли с циклической вязкостью разрушения  $K_{fc} = 70~\mathrm{M}\Pi\mathrm{a}\sqrt{\mathrm{m}}$  стали 20 ГЛ после 30 лет эксплуатации [3, 4]. В случае равенства  $K_{\mathrm{I}}^i = K_{fc}$  [5–7] фиксировалась предельная длина трещины в боковой раме. Предложенный критерий является основным в расчетах, предполагает появление и развитие усталостной трещины на конечной стадии эксплуатации боковой рамы.

Величины прикладываемых сил к объекту исследований, рассчитанных согласно ГОСТ 33211–2014

Наученарачна анти	Значения сил, кН, для режимов				
Наименование силы	Ia	Іб	Ів	III	
Тяжести	210,3	210,3	210,3	210,3	
Динамическая	286,5	_	143,3	100,0	
Распора клиньев	70,9	30	50,5	_	
Инерции тележки	179,9	_	_	51,5	
Инерции колесной пары	28,5	_	28,5	_	
Вагонного замедлителя	_	120	_	_	
Тормозных колодок	_	_	32,5	_	
Боковая	_	_	201,1		
Рамная	_	_	_	55,9	

# Алгоритм расчета и полученные результаты

В программе ANSYS версии 18.0 твердотельная модель боковой рамы без трещины подвергалась разбиению на конечные элементы типа SOLID87, с характерным размером не более 20 мм.

После задания граничных условий и механических свойств стали 20 ГЛ определялось напряженное состояние боковой рамы. Соблюдение критерия прочности позволило выявить место концентрации максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_9^{\text{max}}$  — по внутреннему радиусу буксового проема боковой рамы.

На следующем шаге с помощью функционала ANSYS в очаг концентрации  $\sigma_9^{\max}$  вводилась исходная поверхностная трещина длиной  $L_0=10\,$  мм, глубиной  $a_0=3,5\,$  мм, ориентированная вдоль поперечного сечения. Таким

образом, стадия зарождения трещины и ее развитие до размеров исходной трещины в работе не рассматривались.

Затем на полученной модели боковой рамы с исходной трещиной в программе ANSYS вновь генерировалась конечно-элементная (КЭ) сетка из элементов: типа SOLID87 — для тела модели, типа SOLID90 — для фронта исходной трещины, и окрестности радиуса  $r_i = 0,1L_i$  [5], где  $i = \overline{0,n}$ . Наибольший размер элементов SOLID90 не превышал 1 мм, что позволило получить сетку регулярного вида. На рис. 2 показана реализация такого приема на заключительной стадии продвижения усталостной трещины в исследуемом сечении боковой рамы.

В тех же граничных условиях с помощью модуля Fracture программы ANSYS [6] вычислялись КИН  $K_{\rm I}^i$  в окрестностях вершины исходной трещины, проверялось соблюдение критерия:  $K_{\rm I}^i = K_{fc}$ . Несоблюдение данного

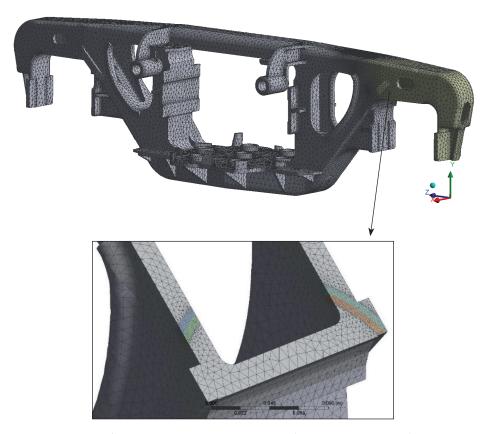


Рис. 2. КЭ модель фрагмента внутреннего угла буксового проема боковой рамы, имитирующая фронт трещины, и его окрестность

критерия позволило увеличить исходную трещину на величину шага  $\Delta L = 10\,$  мм [8, 9]. Соотношение  $a = 0,7b\,$  [7] половины длины трещины b и ее глубины a сохранялось на протяжении всего расчета.

Далее снова перестраивалась сетка с измененной длиной трещины  $L_i = L_0 + \Delta L$ , рассчитывался  $K_1^i$ , проверялось выполнение критерия  $K_1^i = K_{fc}$ . Расчет останавливался при соблюдении критерия, фиксировалась предельная длина усталостной трещины в сечении боковой рамы. Итого проведены 24 итерации по режиму I в каждом сочетании и 30 итераций по режиму III.

В результате расчетов значения предельных длин усталостных трещин в углу буксового проема боковой рамы составили: 240 мм по режиму I в сочетаниях а и в; 300 мм по режиму III. Соблюдение критерия  $K_1^i = K_{fc}$  по режиму Iб не достигнуто с длиной усталостной трещины 240 мм, выполнение итераций остановлено.

Сравнение излома натурной боковой рамы по внутреннему углу буксового проема с модельными представлениями показывает сходство (рис. 3). Условные отпечатки фронта усталостной трещины на каждом шаге  $\Delta L$ 

его продвижения в модели согласуются с расположением усталостных бороздок в реальном изломе (рис. 3). Это подтверждает корректность предложенного метода определения предельных длин трещин в отливках коробчатого сечения.

На рис. 4 приведены зависимости  $K_{\rm I}^i$  от длины усталостной трещины во всех исследуемых сочетаниях и режимах. Установлено, что фронт трещины делится на две части, когда трещина переходит в сквозную. Это согласуется с опытными наблюдениями за ходом развития усталостных трещин в литых боковых рамах [10, 11].

#### Заключение

В результате проведенных исследований установлено следующее.

Предельная длина усталостной трещины во внутреннем углу буксового проема боковой рамы тележки модели 18-100 при расчете по режиму III меньше на 40 мм, чем в рассмотренном изломе натурной боковой рамы. Это можно объяснить тем, что в расчетах не учтена деградация механических свойств стали

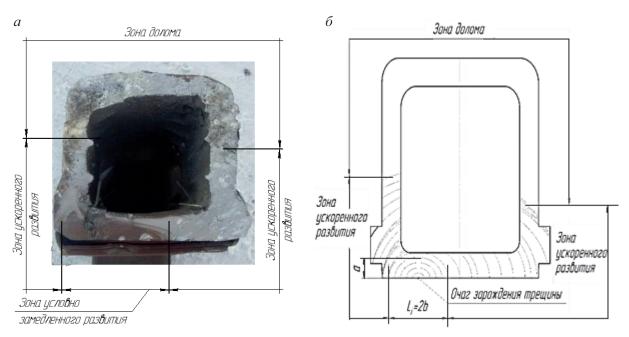


Рис. 3. Изломы в углу буксового проема боковой рамы: a – из эксплуатации,  $\delta$  – из модели

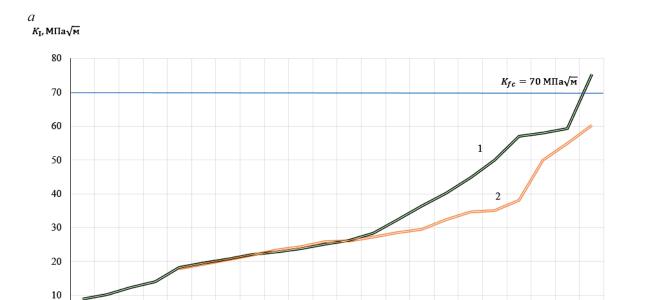
 $K_{th} = 5.3 \text{ M}\Pi \text{a}\sqrt{\text{m}}$ 

 $L_i$ , mm

20 ГЛ за 30 лет эксплуатации [3, 12–15]. Таким образом, получена консервативная оценка.

Характер продвижения усталостной трещины, выявленный по результатам моделирования, идентичен натурному излому.

Полученные значения предельных длин трещин в углу буксового проема боковой рамы тележки модели 18-100 могут служить основой для сопоставления с предельными длинами трещин в других боковых рамах.



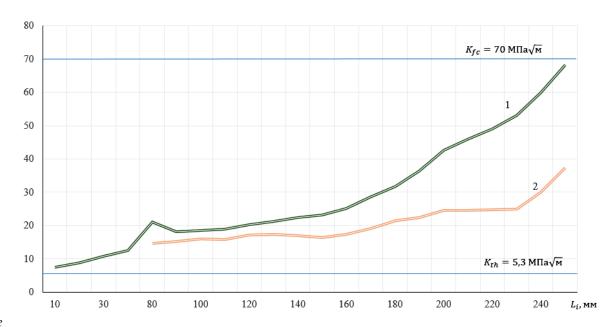
б  $K_{\rm I}$ , МПа $\sqrt{\rm M}$  $K_{fc} = 70 \, M\Pi a \sqrt{M}$  $K_{th} = 5,3 \, M \Pi a \sqrt{M}$  $L_i$ , mm

Рис. 4. Зависимость КИН от длины трещины: a – в сочетании Іа;  $\delta$  – в сочетании Іб. Фронт трещины: 1 – левый, 2 – правый

0 \_\_\_\_

в





K<sub>I</sub>, MПа√м

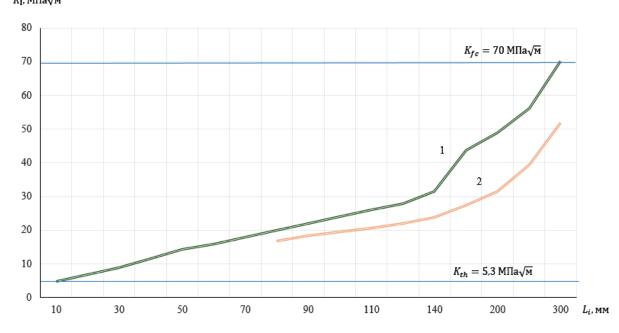


Рис. 4. Зависимость КИН от длины трещины (окончание):  $\epsilon$  – в сочетании Ів;  $\epsilon$  – для режима ІІІ. Фронт трещины: 1 – левый, 2 – правый

Учет числа циклов нагружений боковой рамы на каждом шаге приращения усталостной трещины, рассмотрение стадии зарождения усталостной трещины, совместно с предлагаемым способом определения предельной

длины усталостной трещины позволит создать методику расчета надежности работоспособности боковых рам после появления усталостных трещин до очередного планового ремонта.

# Библиографический список

- 1. Харыбин И. А. Совершенствовать ходовую часть грузовых вагонов / И. А. Харыбин, А. М. Орлова, А. В. Додонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2009. N 1 (17). С. 26—29.
- 2. Рузметов Я. О. Анализ конструкций и методов расчета боковых рам тележек грузовых вагонов / Я. О. Рузметов, А. В. Якушев // Вестн. ТашИИТ. -2013.- N 2 3/4.-C.35-39.
- 3. Северинова Т.П. Исследование трещиностойкости сталей литых деталей тележек грузовых вагонов после длительного периода эксплуатации / Т.П. Северинова // Вестн. ВНИИЖТ. — 1999. — № 5. — С. 35—40.
- 4. Змеева В. Н. Статистические закономерности развития усталостных трещин в литых сталях деталей грузовых вагонов / В. Н. Змеева, С. Г. Лебединский // Вестн. ВНИИЖТ. 1999. № 3. С. 26—31.
- 5. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- 6. Морозов Е.М. Ansys в руках инженера : Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. М. : ЛЕНАНД, 2010. 456 с.
- 7. Партон В. 3. Механика упругопластического разрушения / В. 3. Партон, Е. М. Морозов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Наука, Гл. ред. физ.-матем. лит., 1985.-504 с.
- 8. Якушев А. В. Методика моделирования роста трещины в буксовом проеме боковой рамы и определения ее предельной длины / А. В. Якушев, Д. В. Расщепкина // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. Материалы X Междунар. науч.-технич. конференции. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. С. 22—25.
- 9. Скворцов Ю. В. Моделирование несквозных поверхностных трещин в тонкостенных конструкциях / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков // Вестн. Самарск. гос. аэрокосмич. ун-та им. академика С.П. Королева (Национ. исслед. ун-та). 2011.- № 3-4.- С. 187-191.
- 10. Рузметов Я.О. Методика расчета прочности литых боковых рам тележек грузовых вагонов с учетом внутренних литейных дефектов / Я.О. Рузметов, А.В. Якушев, С.О. Комиченко // Интернетжурн. «Науковедение». 2014. Вып. 3, май—июнь. С. 1–14.
- 11. Миронов В.И. Усталостный ресурс элементов подвижного состава / В.И. Миронов, Н.С. Бачурин, А.В. Якушев // Безопасность движения, совершенствование конструкции вагонов и ресур-

- сосберегающие технологии в вагонном хозяйстве : сб. науч. тр. ; под науч. ред. А.В. Смольянинова. Екатеринбург : УрГУПС, 2008. Вып. 61 (144). С. 19–25.
- 12. Миронов В.И. Циклическая деградация материала в элементах конструкций транспортных машин / В.И. Миронов, А.В. Якушев, О.А. Лукашук, Г.Г. Кожушко // Вестн. машиностроения. 2012.- № 5.- C. 3-9.
- 13. Якушев А.В. Оценка механических свойств вагонных сталей методом полных диаграмм / А.В. Якушев, В.И. Миронов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2011. Вып. 3 (28). С. 202—211.
- 14. Миронов В. И. Метод полных диаграмм в расчете ресурса элементов подвижного состава / В. И. Миронов, А. В. Якушев // Транспорт Урала. 2007. № 2 (13). С. 57—61.
- 15. Якушев А.В. Учет циклической деградации свойств материала в расчете долговечности элементов конструкций / А.В. Якушев, В.И. Миронов, О.А. Лукашук // Современные проблемы проектирования и эксплуатации транспортных и технологических систем: Тр. Междунар. науч. технич. конференции. СПб.: Политех. ун-т, 2006. С. 217–219.

# References

- 1. Kharybyn I. A., Orlova A. M. & Dodonov A. V. Sovershenstvovat khodovuyu chast gruzovykh vagonov [To improve freight car trucks]. *Vagony i vagonnoye khozyaistvo* [*Cars and rolling stock*], 2009, no. 1 (17), pp. 26–29. (In Russian)
- 2. Ruzmetov Y.O. & Yakushev A.V. Analyz konstruktsiy i metodov rascheta bokovykh ram telezhek gruzovykh vagonov [Design analysis and calculation methods of side frames of freight-car trucks].] *TashIIT bulletin*, 2013, no. 3/4, pp. 35–39. (In Russian)
- 3. Severynova T.P. Issledovaniye treshynostoykosty staley lytykh detaley telezhek gruzovykh vagonov posle dlytelnogo perioda ekspluatatsii [The study of steel crack resistance of molded pieces of freight cars after extended operating period]. *VNIIZhT bulletin*, 1999, no. 5, pp. 35–40. (In Russian)
- 4. Zmeyeva V. N. & Lebedynskiy S. G. Statystycheskiye zakonomernosty razvitiya ustalostnykh treshyn v lytykh stalyakh detaley gruzovykh vagonov [Statistic regularities of fatigue crack growth in cast steel of freight car pieces]. *VNIIZhT bulletin*, 1999, no. 3, pp. 26–31. (In Russian)

- 5. Broyek D. Osnovy mekhanyky razrusheniya [The basics of fracture mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 1980, 368 p. (In Russian)
- 6. Morozov Y. M., Mujzemnek A. Y. & Shadskiy A. S. *Ansys v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya* [*Ansys in engineer's hands: Fracture mechanics*]. Moscow, LENAND URSS Publ., 2010, 456 p. (In Russian)
- 7. Parton V. Z. & Morozov Y. M. *Mekhanika uprugoplastycheskogo razrusheniya* [*Elastic-plastic fracture mechanics*]. 2<sup>nd</sup> ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1985, 504 p. (In Russian)
- 8. Yakushev A. V. & Rasshepkyna D. V. Metodyka modelyrovaniya rosta treshyny v buksovom proyeme bokovoy ramy i opredelenia yeye predelnoy dlyny. Podvyzhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty [The method of crack growth simulation in pedestal jaw opening of a side frame and determination of its critical length. Rolling stock of the 21<sup>st</sup> century: ideas, requirements, projects]. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the 10<sup>th</sup> scientific and technical conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 22–25. (In Russian)
- 9. Skvortsov Y.V. & Glushkov S.V. Modelyrovaniye neskvoznykh poverkhnostnykh treshyn v tonkostennykh konstruktsiyakh [The simulation of non-through surface cracks in thin-walled structures]. *Vestnyk Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmycheskogo universyteta im. akademyka S.P. Koroleva (Natsionalnogo issledovatelskogo universyteta)* [Bulletin of Samara National Research University (National research university)], 2011, no. 3–4, pp. 187–191. (In Russian)
- 10. Ruzmetov Y. O., Yakushev A. V. & Komychenko S. O. Metodyka rascheta prochnosty lytykh bokovykh ram telezhek gruzovykh vagonov s uchetom vnutrennykh lyteynykh defektov [Strength calculation method of molded side frames of freight-car trucks with allowance for inner casting defects]. *Naukovedeniye* [Science studies], 2014, issue 3, pp. 1–14. (In Russian)

- 11. Mironov V.I., Bachuryn N.S. & Yakushev A.V. Ustalostniy resurs elementov podvyzhnogo sostava. Bezopasnost dvyzheniya, sovershenstvovaniye konstruktsii vagonov i resursosberegayushiye tekhnologii v vagonnom khozyajstve [Fatigue life of elements of a rolling stock. Safety of operation, car design development and alternative technologies in a rolling stock]. *Collection of research papers*. Ed. by A.V. Smolyanynov. Yekaterinburg, UrGUPS (Ural State University of Railway Transport) Publ., 2008, issue 61 (144), pp. 19–25. (In Russian)
- 12. Mironov V.I., Yakushev A. V., Lukashuk O.A. & Kozhushko G. G. Tsyklycheskaya degradatsiya materiala v elementakh konstruktsiy transportnykh mashyn [Cycle degradation of materials in the construction units of a vehicle]. *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2012, no. 5, pp. 3–9. (In Russian)
- 13. Yakushev A. V. & Myronov V. I. Otsenka mekhanycheskykh svoistv vagonnykh stakey metodom polnykh diagram [The assessment of mechanical properties of truck steel using the method of complete diagrams]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2011, issue 3 (28), pp. 202–211. (In Russian)
- 14. Mironov V.I. & Yakushev A. V. Metod polnykh diagram v raschete resursa elementov podvyzhnogo sostava [The method of complete diagrams in life prediction of rolling-stock elements]. *Transport of the Urals*, 2007, no. 2 (13), pp. 57–61. (In Russian)
- 15. Yakushev A. V., Myronov V. I. & Lukashuk O. A. Uchet tsyklycheskoy degradatsii svoistv materiala v raschete dolgovechnosty elementov konstruktsiy. Sovremenniye problemy proyektyrovaniya i ekspluatatsii transportnykh i tekhnologycheskykh system [Cycle degradation of material properties accounting when calculating construction units longevity. Modern problems of design and maintenance of transport and manufacturing systems]. Trudy Mezdunarodnoy nauchnoy tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the International scientific and technical conference]. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2006, pp. 217–219. (In Russian)

ЯКУШЕВ Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, av-yakushev@yandex.ru; \*РАСЩЕП-КИНА Дарья Владимировна – аспирант, Rasschepkinadaria7742@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); БАРАНОВ Александр Николаевич – генеральный директор, 51@ukbv.ru (ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения»).

# ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 629.4.015:531.19

А.П. Болдырев, П.Д. Жиров, В.В. Ионов

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

Дата поступления: 08.11.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Получение количественных оценок параметрической надежности поглощающего аппарата автосцепки ПМКП-110 в виде вероятности безотказной работы, с учетом влияния температурного фактора и срока наработки с помощью разработанной методики оценки. **Методы:** Применены статистическое моделирование и теория экстремальных значений. **Результаты:** Проведена апробация методики оценки параметрической надежности с учетом эксплуатационных факторов. Установлено понижение вероятности безотказной работы при отрицательных температурах. Определено, что на начальном этапе работы поглощающего аппарата ПМКП-110 вероятность безотказной работы несколько повышается. Дальнейшая эксплуатация приводит к снижению вероятности безотказной работы. Построены графические зависимости вероятности безотказной работы поглощающего аппарата ПМКП-110 от температуры окружающей среды и наработки. **Практическая значимость:** На основе разработанной методики возможны расчеты вероятности безотказной работы при проектировании новых поглощающих аппаратов автосцепки с более высокими показателями надежности.

**Ключевые слова:** Параметрическая надежность, безотказность, грузовые вагоны, поглощающий аппарат, автосцепка, маневровые соударения, нагруженность, продольные силы, теория экстремальных значений, статистическое моделирование, условия эксплуатации, температурный фактор, фактор износа.

\*Alexey P. Boldyrev, D. Sci. Eng., associate professor, apb.tubryansk@gmail.com; \*Pavel D. Zhyrov, Cand. Sci. Eng., head of a chair, pashadsm@ya.ru (Bryansk State Technical University); Vladimir V. Ionov, Cand. Sci. Eng., general director, vvionov@mail.ru (OOO "Diprom") PARAMETRIC RELIABILITY ASSESSMENT OF A DRAFT GEAR ALLOWING FOR OPERATIONAL FACTORS

# **Summary**

**Objective:** To get quantitative assessment of parametric reliability of PMKP-110 center-coupler draft gear in the form of probability of no-failure operation, taking into account the influence of a temperature factor and operation time period by means of the developed evaluation method. **Methods:** Statistical modeling and the theory of extreme values was applied. **Results:** Parametric reliability evaluation method testing was carried out with allowance for operational factors. The reduction of

probability of no-failure operation under negative temperature was established. It was determined, that at the initial stage of PMKP-110 draft gear operation probability of no-failure operation slightly increases. Further operation leads to the reduction in probability of no-failure operation. Probability of no-failure operation of PMKP-110 draft gear -vs- environmental temperature and operation time curves were built. **Practical importance:** On the basis of the developed technique, it is possible to perform calculations of probability of no-failure operation when designing new center-coupler draft gears having higher reliability indices.

**Keywords:** Parametric reliability, failure-free performance, freight cars, draft gear, automatic coupler, shunting collisions, loading, axial forces, extreme value theory, statistical modeling, service conditions, temperature factor, wear factor.

В настоящее время для оценки эффективности работы поглощающих аппаратов используются различные критерии, основными из них являются номинальная и максимальная энергоемкость, полнота силовой характеристики и обобщенный показатель эффективности, которые косвенно указывают, как будет работать конкретный поглощающий аппарат в эксплуатации.

В данной работе в качестве критерия эффективности работы поглощающего аппарата предлагается использовать параметрическую надежность.

Исходя из того, что большая доля ущерба обусловлена повреждениями вагонов и грузов, связанными с действием однократных, но значительных перегрузок, возникающих при соударениях на сортировочных горках, под параметрическим отказом поглощающего аппарата будем понимать превышение продольной силы некоторого нормированного уровня.

В качестве основных причин появления параметрических отказов примем:

- 1) значительные диапазоны изменения скорости соударения при маневровых операциях на сортировочных горках;
- 2) большие диапазоны изменения масс вагонов;
- 3) широкие диапазоны изменения температуры окружающей среды при работе поглощающих аппаратов;
- 4) износ элементов поглощающих аппаратов.

В качестве показателя параметрической надежности принято использовать вероятность

безотказной работы. До недавнего времени параметрическая надежность оценивалась в квазистатической постановке, вероятность безотказной работы определялась при однократном соударении вагонов, при этом фактор времени эксплуатации не учитывался [1].

Предлагаемая методика расчета параметрической надежности отличается более полным учетом эксплуатационных факторов и в связи вероятности безотказной работы со временем эксплуатации. Методика основана на использовании статистического моделирования и теории экстремальных значений [2].

К основным положениям предлагаемой методики можно отнести:

- 1) изучение соударений вагонов только при маневровых операциях, так как именно в них возникают наибольшие продольные силы [3];
- 2) представление поглощающего аппарата как восстанавливаемого объекта;
- 3) рассмотрение параметрических отказов как перемежающихся;
- 4) выполнение расчета в форме вычислительного эксперимента;
- 5) использование для оценки надежности теории экстремальных значений [3];

Алгоритм расчета параметрической надежности реализуется следующим образом:

- формирование расчетных ситуаций, определяющих условия вычислительных опытов, и оценка их вероятностей;
- оценка максимальных продольных сил, возникающих в расчетных ситуациях;
- моделирование расчетных ситуаций и продольных сил с учетом их рассеяния;

- формирование выборок (реализаций) максимальных продольных сил за заданный период эксплуатации;
- оценка абсолютных максимумов сил в выборках;
- теоретическое описание распределения абсолютных максимумов сил;
- оценка параметрической надежности поглощающего аппарата для заданного нормированного уровня силы и периода эксплуатации [4].

В качестве оценки работоспособности предлагаемой методики была рассчитана вероятность безотказной работы серийного поглощающего аппарата ПМКП-110 [5] для различных срока и условий эксплуатации.

Общий вид аппарата представлен на рис. 1. Аппарат ПМКП-110 (рис. 1) состоит из корпуса I, двух неподвижных пластин 2 с металлокерамическими элементами, двух подвижных пластин 3, двух клиньев 4, нажимного конуса 5, пластины опорной 6, комплекта из пяти полимерных элементов 7, четырех пластин 8 и стяжного болта 9 с гайкой. Аппарат имеет максимальный ход  $x_{max} = 0,11$  м [6].

Математическая модель, описывающая силовую характеристику поглощающего аппарата ПМКП-110, имеет вид [7, 8]

$$S(x,v) = \begin{cases} \psi_1(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x < a, \quad v > 0; \\ \psi_2(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x \geq a, \quad v > 0; \\ c(x-x_{\max}) + \psi_2(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x \geq x_{\max}, \quad v > 0; \\ \psi_{1p}(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x_{\max2} - a < x < x_{\max2}, \quad v < 0; \\ \psi_{2p}(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x \leq x_{\max2} - a, \quad v < 0; \\ c(x-x_{\max}) + \psi_{2p}(v)i_1F(x,v) \\ \text{при } x \geq x_{\max}, \quad v < 0, \end{cases}$$

где x — ход аппарата; v — скорость аппарата; a — ход первой ступени;  $\psi_j$  — коэффициенты передачи; c — жесткость корпуса аппарата;  $i_1$  — коэффициент передачи при отсутствии трения;  $x_{\max}$  — максимально возможный ход аппарата;  $x_{\max}$  — максимальный ход аппарата, достигнутый в данной ситуации; F(x,v) — динамическая характеристика комплекта полимерных элементов аппарата.

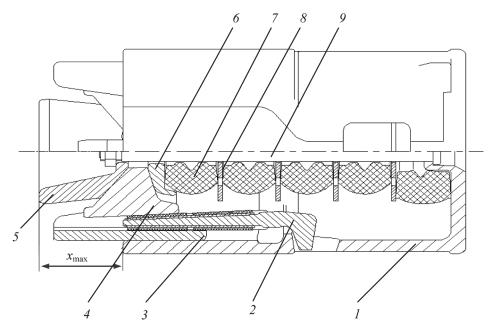


Рис. 1. Общий вид аппарата ПМКП-110

Запишем динамическую силовую характеристику комплекта полимерных элементов следующим образом:

$$F(x,v) = S(x) \cdot \left[1 + \frac{\eta_{CT}}{2} \cdot (\text{sign } v - 1)\right] + \mu \cdot v,$$

здесь  $\eta_{\rm CT}$  — коэффициент необратимого поглощения энергии;  $\mu$  — коэффициент вязкого сопротивления; S(x) — статическая силовая характеристика комплекта полимерных элементов, параметры которой зависят от температуры окружающей среды T.

Характеристика S(x) описывалась неполным полиномом 5-й степени, ее параметры определялись по данным натурных испытаний комплекта полимерных элементов в диапазоне температур от -60 до +51 °C [9].

На основе статистических распределений масс вагонов [10], скоростей соударений при маневровых операциях на сортировочных горках [11], вероятностей попадания вагонов в определенные температурные условия и износа деталей поглощающих аппаратов [3] формировались различные расчетные ситуации. С учетом представленных статистических распределений масс, скоростей, температур и износа рассматривалось 5760 расчетных ситуаций.

Оценку динамических продольных сил для каждой расчетной ситуации осуществляли в программной комплексе «Train» с использо-

ванием расчетной схемы соударения вагона с неподвижным упором [12. 13].

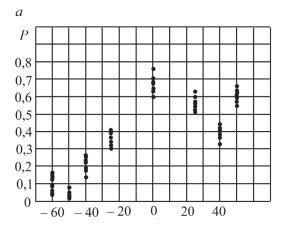
Расчеты выполняли для различных нормированных значений продольной силы и разных наработок, выраженных в числе маневровых операций. Всего было реализовано 16 вычислительных экспериментов с разными уровнями температуры окружающей среды и 5 вычислительных экспериментов с разной степенью изношенности аппарата.

Для описания рассеяния абсолютного максимума силы использовали распределение Гумбеля [14]. Проверка по  $\chi^2$  — критерию Пирсона [15] подтвердила адекватность распределения Гумбеля с доверительной вероятностью 0,9.

Для примера на рис. 2 представлены зависимости вероятности безотказной работы поглощающего аппарата ПМКП-110 от температуры окружающей среды при наработках 1 и 3 года эксплуатации для нормированного уровня силы 3,5 МН.

В результате проделанной работы пришли к следующим выводам:

- 1) при отрицательных температурах вероятность безотказной работы аппарата ниже, чем при положительных;
- 2) с увеличением наработки вероятность безотказной работы снижается;
- 3) на начальном этапе за счет износа его элементов вероятность безотказной работы



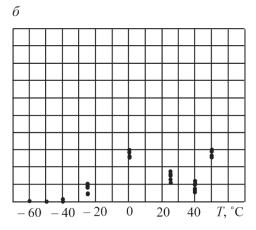


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы поглощающего аппарата ПМКП-110 от температуры и наработки:

a-1 год эксплуатации; 6-3 года эксплуатации

несколько повышается. Дальнейшая эксплуатация приводит к понижению вероятности безотказной работы.

# Библиографический список

- 1. Гореленков А. И. Разработка метода оценки нагруженности грузового вагона продольными силами в условиях его эксплуатации : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / А. И. Гореленков. Брянск : БГТУ, 1996. 145 с.
- 2. Тихонов В. И. Выбросы траекторий случайных процессов / В. И. Тихонов, В. И. Хименко. М. : Наука, 1987.-304 с.
- 3. Болдырев А.П. Научные основы совершенствования поглощающих аппаратов автосцепки: дисс. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / А.П. Болдырев. Брянск: БГТУ, 2006. 360 с.
- 4. Жиров П. Д. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы поглощающих аппаратов автосцепки : дисс. ... канд. техн. наук ;  $05.22.07 / \Pi$ . Д. Жиров. Брянск : БГТУ, 2012.-131 с.
- 5. Кеглин Б. Г. Повышение эффективности комбинированных фрикционных поглощающих аппаратов на базе ПМК-110А / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. В. Иванов, Д. А. Ступин // Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, прочность и безопасность движения подвижного состава: тез докл. XI Междунар. конференции. Днепропетровск: ДИИТ, 2004. С. 120—126.
- 6. Патент 2128301 РФ МПК 6 F 16 F 7/08, В 61 G 9/02. Фрикционный амортизатор / Б. Г. Кеглин, А. П. Болдырев, А. Т. Харитонов, Д. А. Ступин, А. В. Иванов, О. А. Ульянов, Т. Н. Прилепо, А. М. Сухов, Я. М. Синельников. Бюл. по делам изобретений и открытий № 9. 1999. 27 марта.
- 7. Болдырев А. П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. М. : Машиностроение–1, 2004. 199 с.
- 8. Болдырев А. П. Расчетно-экспериментальная оценка рациональных параметров конструкции поглощающего аппарата ПМКП-110 с полимерным подпорным блоком / А. П. Болдырев, А. Г. Белоусов // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сб. науч. тр. Брянск: БГТУ, 2003. С. 15–27.

- 9. Жиров П. Д. Разработка математической модели и расчет характеристик поглощающего аппарата автосцепки с полимерными элементами при различных температурах окружающей среды / П. Д. Жиров, А. П. Болдырев // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. 2010. № 4. С. 55–58.
- 10. Болдырев А. П. Основные тенденции грузоперевозок железнодорожным транспортом России / А. П. Болдырев, А. М. Гуров, Э. А. Фатьков // Вестн. Брянск. гос. техн. ун-та. -2007. -№ 4 (16). -C. 47–49.
- 11. Гореленков А. И. Статистические распределения продольных нагрузок, действующих на грузовой вагон при переходных режимах движения поезда / А. И. Гореленков // Динамика, прочность и надежность транспортных машин; под ред. А. П. Шлюшенкова. Брянск: Изд-во Брянск. гос. техн. ун-та, 1997. С. 11–19.
- 12. Фатьков Э. А. Математическое моделирование работы современных поглощающих аппаратов автосцепки и разработка программного комплекса для расчета их характеристик: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Э. А. Фатьков. Брянск: БГТУ, 2009. 141 с.
- 13. Болдырев А.П. Программный комплекс для моделирования расчета динамических характерисгик транспортных экипажей / А.П. Болдырев, Э.А. Фатьков // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях: материалы Междунар. науч.-практ. конференции (16–18 ноября 2009 г., г. Брянск); под ред. В.И. Аверченкова. Брянск: БГТУ, 2009. С. 96.
- 14. Левин Б. Р. Справочник по надежности : в 3 т. / Б. Р. Левин. М. : Мир, 1969. Т. 1. 339 с.
- 15. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М. Н. Степнов. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

#### References

1. Gorelenkov A. I. Razrabotka metoda otsenky nagruzhennosty gruzovogo vagona prodolnymy sylamy v usloviyakh yego ekspluatatsii [The development of the evaluation method of freight car loading with axial forces in operating conditions]: diss... Cand.

- Sci. Eng.: 05.22.07. Bryansk, BSTU Publ., 1996, 145 p. (In Russian)
- 2. Tykhonov V.I. & Khymenko V.I. *Vybrosy trayektoriy sluchainykh protsessov* [*Path overshoot of stochastic processes*]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 304 p. (In Russian)
- 3. Boldyrev A. P. *Nauchniye osnovy sovershenstvo-vaniya pogloshayushykh apparatov avtostsepky* [Scientific foundations of center-coupler draft gear improvement]: diss... D. Sci. Eng.: 05.22.07. Bryansk, BSTU Publ., 2006, 360 p. (In Russian)
- 4. Zhyrov P. D. *Otsenka vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na effektyvnost raboty pogloshyayushykh apparatov avtostsepkky [Impact assessment of operational factors on operational efficiency of center coupler draft gears*]: diss... Cand. Sci. Eng.: 05.22.07. Bryansk, BSTU Publ., 2012, 131 p. (In Russian)
- 5. Keglyn B. G., Boldyrev A. P., Ivanov A. V. & Stupyn D. A. Povysheniye effektyvnosty kombynyrovannykh fryktsionnykh pogloshyayushykh apparatov na baze PMK-110A [Efficiency improvement of combined friction draft gears on the basis of PMK-110A]. Problemy mekhanyky zheleznodorozhnogo transporta: dynamyka, prochnost i bezopasnost dvyzheniya podvyzhnogo sostava [The issues of railroad transport mechanics: dynamics, resistance and safety of rolling stock operation]. Tezysy dokladov XI Mezhdunarodnoy konferentsii [The 11th International conference abstracts]. Dnepropetrovsk, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport Publ., 2004, pp. 120–126. (In Russian)
- 6. Keglyn B. G., Boldyrev A. P., Kharytonov A. T., Stupyn D. A., Ivanov A. V., Ulyanov O. A., Prylepo T. N., Sukhov A. M. & Synelnykov Y. M. *Patent 2128301 RF MPK 6 F 16 F 7/08, B 61 G 9/02. Frykt-sionnyi amortyzator [License 2128301 RF International Patent Classification 6 F 16 F 7/08, B 61 G 9/02. Friction shock absorber]*. Bull. no. 9, 1999, March 27th. (In Russian)
- 7. Boldyrev A.P. & Keglyn B.G. Raschet i proyektyrovaniye amortyzatorov udara podvyzhnogo sostava [Calculation and design of shock dampers of a rolling stock]. Moscow, Mashynostroyeniye [Mechanical engineering–1] Publ., 2004, 199 p. (In Russian)
- 8. Boldyrev A. P. & Belousov A. G. Raschetnoeksperimentalnaya otsenka ratsionalnykh parametrov konstruktsii pogloshayushego apparata PMKP-110 s polymernym podpornym bokom [Computational and

- experimental evaluation of rational design parameters of PMKP-110 draft gear with polymer supporting block. *Dynamyka, prochnost i nadezhnost transportnykh mashyn* [*Dynamics, resistance and reliability of transport vehicles*]. *Sbornyk nauchykh trudov* [*Proceedings*]. Bryansk, BSTU Publ., 2003, pp. 15–27. (In Russian)
- 9. Zhyrov P. D. & Boldyrev A. P. Razrabotka matematycheskoy modely i raschet kharakteristik pogloshayushego apparata avtostepky s polymernymy elementamy pry razlychnykh temperaturakh okruzhayushey sredy [Mathematical model development and performance calculation of a center-coupler draft gear with polymer elements under different environment temperature]. Vestnyk Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univesyteta [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2010, no. 4, pp. 55–58. (In Russian)
- 10. Boldyrev A. P., Gurov A. M. & Fatkov E. A. Osnovniye tendentsii gruzoperevozok zheleznodorozhnym transportom Rossii [Principal trends of Russian railroad freight activity]. *Vestnyk Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo univesyteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2007, no. 4 (16), pp. 47–49. (In Russian)
- 11. Gorelenkov A. I. Statystycheskiye raspredeleniya prodolnykh nagruzok, deystvuyushykh na gruzovoy vagon pry perekhodnykh rezhymakh dvyzheniya poyezda [Statistical distribution of axial load affecting a freight car in the process of transient motion of a train]. *Dynamyka, prochnost i nadezhnost transportnykh mashyn* [*Dynamics, resistance and reliability of transport vehicles*]. Ed. by A. P. Shlushenkova. Bryansk, Bryansk State Technical University Publ., 1997, pp. 11–19. (In Russian)
- 12. Fatkov E.A. Matematycheskoye modelyrovaniye raboty sovremennykh pogloshayushykh apparatov avtostepky i razrabotka programmnogo kopmpleksa dlya rascheta ikh kharakteristik [Mathematical modeling of modern center-coupling draft gears operation and the development of bundled software for performance calculation]: diss... Cand. Sci. Eng.: 05.13.18. Bryansk, BSTU Publ., 2009, 141 p. (In Russian)
- 13. Boldyrev A. P. & Fatkov E. A. Programmniy kompleks dlya modelyrovaniya rascheta dynamycheskykh kharakteristik transportnykh ekypazhey. Sostoyaniye, problem i perspektyvy avtomatyzatsii tekhnicheskoy podgotovky proizvodstva na promyshlennykh predpriyatiyakh [Bundled software for cal-

culation modeling of dynamic characteristics of transport vehicles. Current state, problems and trends of fitting-out automation at industrial enterprises]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsii* (16–18 noyabrya 2009 g., g. Bryansk) [Proceedings of the International research and training conference (November 16–18 2009, Bryansk)]. Ed. by V.I. Averchenkov. Bryansk, BSTU Publ., 2009, 96 p. (In Russian)

- 14. Levyn B. R. *Spravochnyk po nadezhnosty v 3 tomakh* [*Reliability guide in 3 volumes*]. Ed. by Levyn B. R. Moscow, Mir Publ., 1969, vol. 1, 339 p. (In Russian)
- 15. Stepnov M. N. Statystycheskiye metody obrabotky rezultatov mekhanicheskykh ispytaniy [Statistical methods of mechanical testing elaboration]. Moscow, Mashynostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., 1985, 232 p. (In Russian)
- \*БОЛДЫРЕВ Алексей Петрович доктор техн. наук, доцент, apb.tubryansk@gmail.com; \*ЖИРОВ Павел Дмитриевич канд. техн. наук, заведующий кафедрой, pashadsm@ya.ru (Брянский государственный технический университет); ИОНОВ Владимир Валерьевич канд. техн. наук, генеральный директор, vvionov@mail.ru (ООО «Дипром»).

УДК 519.2

В.П. Герасименко, В. А. Ходаковский, Р.С. Кударов, В.П. Бубнов, А. А. Хватцев

# ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ

Дата поступления: 17.10.2017 Решение о публикации: 10.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Определить возможности формирования у студентов технических вузов способности решать на базе владения современными информационными технологиями задачи системного анализа и осуществлять прогноз в определенной практической области. **Методы:** Использован анализ современного математического образования в технических вузах РФ. **Результаты:** Обосновываются с помощью статистических данных существующие тенденции в обучении математике в школе и вузе. Показано, что сегодня в системе математической подготовки сохраняются тенденции, направленные на снижение формирования у школьников и студентов абстрактного мышления и пространственного воображения. **Практическая значимость:** Подтверждена гипотеза о невозможности подготовки в перспективе инженеров-творцов без изменения парадигмы математического образования в школе и вузе.

**Ключевые слова:** Элементарная математика, ЕГЭ, школьная подготовка, высшая математика, методика обучения.

\*Petr V. Gerasymenko, D. Sci. Eng., professor, pv39@mail.ru; Valentyn A. Khodakovskiy, D. Sci. Eng., professor, head of chair; Ruslan S. Kudarov, Cand. Sci. Eng., associate professor; Valdimir P. Bubnov, D. Sci. Eng., professor (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); Alexander A. Khvattsev, Cand. Eng., associate professor, head of chair (Pskov State University) TRENDS AND PROSPECTS OF MATHEMATICAL EDUCATION IN TECHNICAL UNIVERSITIES

#### **Summary**

**Objective:** To determine the means for skills development of working system analysis problems and doing forecast in certain areas of practical use on the basis of state-of-the-art IT solutions application among students of technical universities. **Methods:** The analysis of modern mathematical education in technical universities of the Russian Federation was applied. **Results:** The existing trends of mathematical education in schools and universities were validated by means of statistical data. It was shown that the trends, aimed at the decrease in the formation of abstract abilities and spatial perception among pupils and students, are preserved in the current system of mathematical education. **Practical importance:** The hypothesis, stating of the inability to train engineers-creators in the long term without changing the paradigm of mathematical education in schools and universities, was confirmed.

**Keywords:** Elementary mathematics, Unified State Exam, school training, higher mathematics, teaching methods.

Качественная профессиональная подготовка студентов в вузе должна формировать у выпускника твердые знания и способность

быстро осваивать часто изменяемые его функциональные обязанности. Для этого базовые дисциплины инженера должны опираться на

фундаментальные дисциплины первых курсов, к числу которых относятся прежде всего математика и физика. Однако математическая подготовка студентов вузов на первых курсах приобрела за последние годы особую сложность [1]. Об этом свидетельствуют содержание и объем часов по математике, которые изучались в технических вузах России по электротехническим специальностямв 1969 и 2016 гг. (табл. 1).

Даже беглый сравнительный анализ качественных и количественных показателей двух программ свидетельствует, что математическая подготовка в настоящее время не может обеспечить тот уровень инженерной подготовки, который существовал в СССР. Потому

большое число студентов на старших курсах университетов стран СНГ сегодня демонстрирует «математическую серость». В противоположность этому еще в начале XXI в. студентами технических вузов продолжали выполняться серьезные научные исследования (см., например, [2]).

Следует добавить, что при подготовке инженеров в настоящее время выявляется немалая проблема, связанная с внутренними противоречиями вузовского образовательного процесса, которая обусловлена возрастающим с огромной скоростью объемом информации, предлагаемой для усвоения, и ограниченными у студента возможностями осуществить это в сокращенные сроки изучения математики.

ТАБЛИЦА 1. Объемы часов по высшей математике

11	2016 г.		1969 г.				
Наименование раздела дисциплины		ПЗ	Всего	Л	ПЗ	Всего	
Линейная алгебра	6	8	14	10	6	16	
Аналитическая геометрия	6	6	12	50	48	98	
Введение в математический анализ	8	8	16	12	12	24	
Дифференциальное исчисление функции одной переменной	8	8	16	28	28	52	
Дифференциальное исчисление функций нескольких переменных	8	6	14	10	10	20	
Интегральное исчисление функции одной переменной	20	20	40	26	28	54	
Кратные, криволинейные и поверхностные интегралы. Элементы теории поля	16	16	32	20	14	34	
Комплексные числа. Теория функций комплексной переменной				34	22	56	
Ряды. Гармонический анализ	8	8	16	28	24	52	
Дифференциальные уравнения	18	18	36	22	22	44	
Операционное исчисление, уравнения математической физики	10	10	20	8	8	16	
Векторный анализ				6	8	10	
ИТОГО, ч	108	108	216	254	226	480	
ВСЕГО, ч	216				480		

 $\Pi$  р и м е ч а н и е.  $\Pi$  – лекции,  $\Pi$ 3 – практические занятия.

Вместе с тем нужно заметить, что математической подготовке будущих инженеров, которые должны в перспективе владеть современными информационными технологиями и быть способны осуществлять системный анализ и прогноз в определенной практической области, уделять сейчас достаточное внимание даже при желании невозможно.

Обоснования данного утверждения легко следуют из сравнения объема часов, выделяемых на высшую математику в советское и настоящее время (табл. 1). Дело, вероятно, заключается в том, что большинство разделов математики не обеспечено должным объемом времени в существующем курсе. Более того, даже если сохранить разделы и объемы учебных часов, которые были в 1960—1990 годы, то вряд ли их можно усвоить, зная ту математическую подготовку, которую получают в современной школе.

Еще до введения ЕГЭ уровень школьной математической подготовки абитуриентов,

поступающих в вуз, существенно уменьшился по сравнению с советским периодом. В табл. 2 приведены объемы решенных задач в процентах по каждой теме вступительных экзаменов в вуз, что позволяет оценить уровень знаний абитуриентами элементарной математики. Для статистических исследований в выборку вошли результаты вступительных экзаменов более 3 тыс. кандидатов, поступавших в ПГУПС.

Результаты вступительных экзаменов и опрос абитуриентов, поступавших в различные вузы, свидетельствуют, что на рассмотрение в средних школах отдельных наиболее сложных и важных вопросов школьной математики было выделено либо недостаточно времени, либо их совсем не изучали.

Изучения динамики изменения успеваемости студентов [3–6] показали необходимость совершенствования учебных программ [7] с целью разрешения противоречий, возникших в методиках преподавания элементарной

ТАБЛИЦА 2. Процент решенных задач на экзаменах до введения ЕГЭ

Наименование темы	Количество решенных задач, %
Тождественные преобразования алгебраических выражений	45
Алгебраические уравнения и системы уравнений	65
Иррациональные уравнения и неравенства	57
Неравенства и системы неравенств	48
Свойства степеней и логарифмов	46
Показательные уравнения	52
Показательные неравенства	46
Логарифмические уравнения	48
Логарифмические неравенства	44
Прогрессии	50
Вычисление значений тригонометрических функций	37
Тождественные преобразования тригонометрических функций	42
Тригонометрические уравнения	34
Планиметрия	35
Вычисление и применение производной	47
Среднее количество решенных задач	46

и высшей математик [8]. С этой целью для обеспечения качества обучения математике в вузе разрабатываются методические системы организации уровневой дифференциации обучения, где учитываются начальный уровень довузовской подготовки и соответствующая ему программа вузовской математической подготовки [9]. Поэтому одним из показателей критерия качественного математического обучения в вузе может выступать программа по элементарной математике, освоение которой обеспечивает качество математической подготовки.

Проводимые в странах СНГ реформы школьного образования [9–13] усугубили ситуацию, поскольку потребовали введения в качестве вступительных испытаний по математике тестирования и собеседования вместо решения сложных задач на письменном экзамене и проверки основных теоретических положений на устных вступительных экзаменах.

Исследования, которые проводились во многих университетах по оцениванию влияния ЕГЭ на результаты изучения студентами математических дисциплин [14, 15], показы-

вают, что после тестирования с помощью ЕГЭ, уровень математической подготовки студентов существенно снизился, а следовательно, понизился уровень знания математических дисциплин в технических вузах. Проблема возникает потому, что преподаватель в школе подготовку проводит, ориентируясь на тесты ЕГЭ, и, соответственно, качество знаний школьной математики обеспечивается ниже, чем было до ЕГЭ. Существующие подходы и методики обучения высшей математике будущих специалистов, бакалавров и магистров [16–18] не могут решить проблему, поскольку подавляющее большинство студентов в потоках и группах имеют число баллов ЕГЭ по элементарной математике от 27 до 60. Повсеместное внедрение в инженерных вузах подготовки бакалавров и набор студентов посредством ЕГЭ порождают огромную проблему фундаментальной подготовки выпускников, которые должны эксплуатировать сложные технические устройства. Это подтверждает сегодняшний уровень знаний школьной математики (табл. 3). В табл. 3 приведены результаты сдачи ЕГЭ 2479 тестируемыми учениками.

ТАБЛИЦА 3. Результаты сдачи ЕГЭ

<b>№</b> зада- ния	Содержание задания	Проверяемые элементы умения	Уровень слож- ности задания	Про- цент выпол- нения
1	Алгебраические действия с числами, записанными в виде конечных десятичных дробей, %	Использование приобретенных знаний и умений в практической деятельности и повседневной жизни	Базо- вый	86,42
2	Анализ диаграмм, гистограмм	Использование приобретенных знаний и умений в практической деятельности и повседневной жизни	"	97,67
3	Нахождение биссектрисы треугольни- ка, изображенного на клетчатой бума- ге. Свойства медианы, проведенной из вершины равнобедренного треуголь- ника	Выполнение действия с геометрическими фигурами, координатами и векторами	"	93,66

# Продолжение табл. 3

<b>№</b> зада- ния	Содержание задания	Проверяемые элементы умения	Уровень слож- ности задания	Про- цент выпол- нения
4	Классическое определение вероятности	Построение и исследование простейших математических моделей	Базо- вый	85,90
5	Простейшие показательные уравнения	Решение уравнений и неравенств	"	92,95
6	Свойства сторон четырехугольника, вписанного в окружность. Углы, вписанные в окружность	Выполнение действия с геометрическими фигурами, координатами и векторами	,,	64,88
7	Возрастание (убывание) функции. Механическая интерпретация производной	Выполнение действий с функциями	"	70,96
8	Взаимное расположение «круглых» тел. Боковая поверхность конуса и цилиндра	Выполнение действий с геометрическими фигурами, координатами и векторами	"	43,60
9	Вычисление численного значения выражения по заданной формуле. Таблица основных значений тригонометрических функций. Синус двойного угла	Выполнение вычислений и преобразований	Повы-	40,75
10	Нахождение величины из заданного выражения	Использование приобретенных знаний и умений в практической деятельности и повседневной жизни	"	50,26
11	Задача на движение. Составление и решение алгебраических уравнений	Построение и исследование простейших математических моделей	22	30,34
12	Исследование экстремумов (минимума) функций	Дифференцирование функций, решение квадратных уравнений.	"	47,87
13	Метод замены переменных при решении уравнений. Решение простейших показательных уравнений. Решение простейших тригонометрических уравнений. Таблица основных значений тригонометрических функций. Отбор корней.	Решение уравнений и неравенств	"	32,08
14	Треугольная пирамида. Построение сечений. Основные аксиомы стереометрии. Объем многогранника.	Выполнение действий с геометрическими фигурами, координатами и векторами	"	0,06

Окончание табл. 3

<u>№</u> зада- ния	Содержание задания	Проверяемые элементы умения	Уровень слож- ности задания	Про- цент выпол- нения
15	Метод замены переменных при решении неравенств. Метод интервалов для решения алгебраического неравенства. Решение простейших логарифмических неравенств. Область допустимых значений	Решение уравнений и неравенств	Базо- вый	6,86
16	Трапеция. Пропорциональные отрезки. Признаки подобия треугольников	Выполнение действий с геометрическими фигурами, координатами и векторами	22	0,13
17	Составление математической модели движения средств на банковском счете. Решение алгебраического неравенства. Отбор нужных решений неравенства	Использование приобретенных знаний и умений в практической деятельности и повседневной жизни	22	4,98
18	Решение иррационального уравнения с параметром сведения этого уравнения к алгебраическому уравнению. Исследование корней алгебраического уравнения. Исследование допустимых значений параметра. Свойства логарифмов	Решение уравнений и неравенств	,,	0,13
19	Составление логической модели исследуемой задачи. Обоснование полученных решений	Построение и исследование простейшие математических моделей	"	0.00

Из табл. 3 следует, что только отдельные из 2479 учеников довели до конца выполнение заланий за № 14–19:

№ задания 14	15	16	17	18	19
Количество					
выполнивших					
задание 2	170	3	123	3	0

Анализ выполненных заданий № 14–19 показал огромное число слабых сторон системы обучения математике в школе. Чтобы оценить их, в качестве примера можно привести по одному недостатку из каждого задания. 1. Слабые знания стереометрии и отсутствие пространственного воображения не позволяют ученикам проводить доказательства утверждений, следующих в условии задания. Так, в задании № 14 необходимо было доказать, что четыре точки сечения треугольной пирамиды лежат в одной плоскости. Для этого надо было заметить, что сечение является трапецией, и сослаться на известный факт, что через две параллельные прямые проходит только одна плоскость. Вместо этого многие из участников ЕГЭ доказывали, что любые три точки сечения лежат в одной плоскости, что не обязательно в одной и той же. Из чего делали

неверный вывод. Результат – выполнили задание 2 из 2479 учеников.

- 2. Неумение решать неравенства и системы неравенств. В задании № 15 нужно было с помощью введения новой неизвестной свести сначала исходное логарифмическое неравенство к рациональному неравенству, а затем решить его или методом интервалов, или рассмотрением двух систем. Значительная часть школьников справилась с первой частью этого плана и совершенно не справилась со второй. Самая серьезная ошибка заключалась в следующем. Получив рациональное неравенство, многие ученики умножали обе части неравенства на знаменатель, что допустимо, если последний принимает только положительные значения и, таким образом, теряли часть решения. Другие не учитывали, что логарифмическая функция определена только для положительных значений аргумента, и тем самым включали в ответ только те значения аргумента, при которых исходное неравенство не имеет смысла. И то, и другое является грубейшими ошибками. Результат – выполнили задание 170 из 2479 учеников.
- 3. В школе не уделяют должного внимания на глубину понимания условий заданий и недопустимость упрощения заданий. Например, в задании № 16 для доказательства равенства отрезков прямых требовалось установить подобие треугольников, содержащих отрезки этих прямых. Определенная часть участников ЕГЭ упростили задание, посчитав, что точка, которая упоминается в условии, является серединой стороны трапеции. Это было бы справедливо, если бы трапеция была равнобедренной. А по условию это не так. Результат выполнили задание 3 из 2479 учеников.
- 4. Большая сложность возникает при выполнении заданий, которые требуют не только математических знаний, но и специальных. В задаче № 17 требовалось определить значение процента, под который берется кредит в банке, если известны две схемы возврата данного кредита. С математической точки, задача сводилась к системе двух алгебраических уравнений относительно суммы кредита и

- процента, под который он был получен. Некоторые участники ЕГЭ вместо того, чтобы составлять соответствующую математическую модель, пытались воспользоваться уже известными формулами, к сожалению, не имеющими к такой задаче никакого отношения. Еще одна достаточно часто встречающаяся ошибка заключается в том, что многие школьники забывают (или не знают), что процент это сотая часть числа. Результат выполнили задание 123 из 2479 учеников.
- 5. Незнание свойств логарифмов и неумение решать иррациональные уравнения с параметром характеризуют большинство учеников. В задаче № 18 уравнение содержало иррациональное и логарифмическое выражения. С помощью разложения на два множителя решение сводится к нахождению корней иррационального уравнения при условии, что логарифмические выражения, входящие во второй множитель, существуют и второй множитель не обращается в нуль. Затем аналогично следует рассмотреть зеркальную ситуацию. Некоторые участники ЕГЭ свели уравнение к произведению двух сомножителей, но забыли провести вторую часть описанного исследования. Результат – выполнили задание 3 из 2479 учеников.
- 6. Недостаточно уделяется в школе развитию логического мышления.В задании № 19, чтобы дать правильный ответ на первый пункт, надо было заметить, что чисел записано поровну, а следовательно, их сумма всегда оканчивается нулем. Многим это удалось подметить, за что и был выставлен один балл. Во втором пункте этого анализа уже недостаточно. Надо было еще установить, что сумма всех записанных чисел превосходит предложенное число. К сожалению, многие это обстоятельство не принимают во внимание. Потому подавляющее большинство учеников, приступивших к решению задачи, набрали только по одному баллу. Результат – никто из 2479 учеников не выполнили задание.

В настоящее время путь исправления всех недостатков, возникающих при изучении математики, ориентируясь на ЕГЭ, достаточно

сложный и не дает должного эффекта для многих студентов. Поэтому возникает необходимость введения в вузе для студентов I курса индивидуально ориентированной подготовки по элементарной математике. Только тогда можно будет совершенствовать математическую подготовку в вузе.

#### Выволы

Учитывая вышеизложенное, а именно уровень математической подготовки в школе и вузе, сегодня в системе математической подготовки существуют тенденции, направленные на снижение формирования у школьников и студентов абстрактного мышления и пространственного воображения. Как известно, данные качества обязательны для инженера-творца. Следовательно, перспектива подготовки выпускников технических вузов направлена на формирование практиков-ремесленников, но не инженеров.

### Библиографический список

- 1. Герасименко П. В. Основные причины снижения качества инженерного образования / П. В. Герасименко // Сб. докл. участников XVII Академ. чтений Междунар. академии наук высшей школы «Инженерное образование в России и государствах участников СНГ: проблемы и перспективы решения». Звенигород Московской обл. 21–23 сентября 2011 г. Звенигород, 2011. С. 27–32.
- 2. Герасименко П. В. Мониторинг пассажиропотоков, формирующих входной пассажиропоток на станции «Пушкинская» в часы «пик» / П. В. Герасименко, Р. С. Кударов // Шаг в будущее, Неделя науки-2006. Материалы науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / ред. В. В. Сапожников. — СПб. : ПГУПС, 2006. — С. 189—191.
- 3. Герасименко П. В. Исследование динамики изменения успеваемости по математическим дисциплинам студентов экономических специальностей ПГУПС / П. В. Герасименко, Р. С. Кударов //

- Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2013. Вып. № 1 (34). С. 215–221.
- 4. Герасименко П. В. Математическое моделирование процесса изучения учебных многосеместровых дисциплин в технических вузах / П. В. Герасименко, Е. А. Благовещенская, В. А. Ходаковский // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2017. Вып. № 3 (14). С. 513–522.
- 5. Герасименко П.В. Алгоритм и программа построения корреляционной матрицы оценок по многосеместровым дисциплинам / П.В. Герасименко, В.А. Ходаковский // Проблемы математической и естественно-научной подготовки в инженерном образовании: сб. тр. Междунар. науч.-метод. конференции. СПб.: ПГУПС, 2014. С. 84–88.
- 6. Герасименко П. В. Об одном подходе к оценке качества успеваемости учебных групп студентов / П. В. Герасименко // Учен. зап. Междунар. банковск. ин-та. СПб. : МБИ, 2013. № 6. С. 179—186.
- 7. Герасименко П. В. О совершенствовании учебных программ экономико-математических дисциплин / П. В. Герасименко // Университетское образование: опыт, проблемы, перспективы развития: тез. докл. VII Междунар. конгресса: в 2 ч. Минск, 2013. С. 118–119.
- 8. Герасименко П. В. О целесообразности разрешения в вузе сформировавшегося на современном этапе противоречия методик преподавания элементарной и высшей математик / П. В. Герасименко // Совершенствование математического образования в общеобразовательных школах, начальных средних и высших профессиональных учебных заведениях: материалы VI Междунар. науч.-метод. конференции, 29–30 сентября 2010 г. Тирасполь: ПФ «Литера», 2010. С. 26–31.
- 9. Болонский процесс. Европейские и национальные структуры квалификаций (Книга-приложение 2) / под науч. ред. проф. В.И. Байденко. М.: Исслед. центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. 220 с.
- 10. Николаев Д. Россия в Болонском процессе / Д. Николаев, Д. Суслова // Вопросы образования. 2010. № 1. С. 1—17.
- 11. Баранников А.В. Компетентностный подход и качество образования / А.В. Баранников. М.: Моск. центр качества образования, 2008. 144 с.

- 12. Коротков Э. М. Управление качеством образования : учеб. пособие для вузов / Э. М. Коротков. М. : Мир, 2006. 278 с.
- 13. Мартишина Н. И. Базовый уровень знаний как объект нормирования в системе образования / Н. И. Мартишина // Высшее образование в России.—  $2015.- N \ge 3.- C. 98-104.$
- 14. Герасименко П.В. Результаты ЕГЭ по математике и успеваемость: цели, статистика, анализ, предложения / П.В. Герасименко, В.А. Ходаковский // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании. Исторический опыт, современные вызовы: сб. тр. Междунар. научно-метод. конференции, 11–12 ноября 2010 г. / под общ.ред. В.А. Ходаковского. СПб.: ПГУПС, 2011. С. 38–51.
- 15. Герасименко П.В. О негативном влиянии результатов ЕГЭ по математике на подготовку специалистов в вузе и пути их устранения / П.В. Герасименко // Проблемы математической и естественнонаучной подготовки в инженерном образовании : тез. докл. 2-й Междунар. науч.-метод. конференции. СПб. : ПГУПС, 2012. С. 172–173.
- 16. Герасименко П. В. О необходимости введения в вузе для студентов первого курса индивидуально ориентированной подготовки по элементарной математике / П. В. Герасименко // Материалы Междунар. науч. конференции «Образование, наука и экономика в вузах. Интеграция в международное образовательное пространство». Плоцк, Польша: Plock, Poland, 2010. С. 74–80.
- 17. Герасименко П. В. О возможности дообучения школьной математике студентов первого курса / П. В. Герасименко // Математика в вузе: тр. XXII Междунар. науч.-метод. конференции. СПб.: ПГУПС, 2010. С. 38—42.
- 18. Воронов М. В. Разработка виртуальной среды самостоятельной подготовки студентов / М. В. Воронов, П. В. Герасименко, Г. И. Письменский // Инновации в образовании. 2017.- N = 9.- C. 31-44.

#### References

1. Gerasymenko P. V. Osnovniye prychyny snyzheniya kachestva inzhenernogo obrazovaniya [The basic causes for quality deviation of engineering edu-

- cation]. Sbornyk dokladov uchastnykov XVII Akademycheskykh chteniy Mezhdunarodnoy kademii nauk vysshey shkoly "Inzhenernoye obrazovaniye v Rossii i gosudarstvakh – uchastnykov SNG: problemy i perspektyvy resheniya" [Collection of papers of the participants of the 17<sup>th</sup> Academic readings of the International Higher Education Academy of Sciences "Engineering education in Russia and member states of the CIS: problems and opportunities for solutions"]. Zvenigorod, 2011, pp. 27–32. (In Russian)
- 2. Gerasymenko P. V. & Kudarov R. S. Monitoring passazhyropotokov, formyruyushykh vkhodnoy passazhyropotok na stantsii "Pushkynskaya" v chasy "pyk" [Monitoring of traffic flow, forming an input traffic flow at "Pushkinskaya" station in rush hours]. Shag v budusheye, Nedelya nauky-2006 [Collection of papers: A step in the future, A week of science-2006]. Materyaly nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspyrantov i molodykh uchenykh [Proceedings of the research conference for students, postgraduates and young scholars]. Ed. by V. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2006, pp. 189–191. (In Russian)
- 3. Gerasymenko P.V. & Kudarov R.S. Issledovaniye dynamyky izmeneniya uspevayemosty po matematycheskym dystsyplynam studentov ekonomycheskykh spetsyalnostey PGUPS [The study of the dynamic pattern of students' performance in mathematical disciplines at PGUPS economic departments]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2013, issue 1 (34), pp. 215–221. (In Russian)
- 4. Gerasymenko P. V., Blagoveshenskaya Y. A. & Khodakovskiy V. A. Matematycheskoye modelyrovaniye protsessa izucheniya uchebnykh mnogosemestrovykh dystyplyn v tekhnicheskykh vuzakh [Mathematical simulation of the process of studying academic multi semester disciplines in technical universities]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2017, vol. 14, issue 3 (14), pp. 513–522. (In Russian)
- 5. Gerasymenko P. V. & Khodakovskiy V.A. Algorytm i programma postroyeniya korrelyatsionnoy matrytsy otsenok po mnogosemestrovym distsiplynam [An algorithm and program of building a correlation matrix of grades in multi semester disciplines]. Problemy matematycheskoy i yestestvennonauchnoy podgotovky v inzhenernom obrazovanii [The problems of mathematical and scientific training in engineering education]. Sbornyk trudov Mezhdunarodnoy nauchno-

metodycheskoy konferentsii [Collected papers of the International research conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 84–88. (In Russian)

- 6. Gerasymenko P. V. Ob odnom podkhode k otsenke kachestva uspevayemosty uchebnykh grupp studentov [On an approach to quality assessment of students' progress in classes]. *Ucheniye zapysky Mezhdunarodnogo bankovskogo instytuta* [*Proceedings of the International banking institute*]. Saint Petersburg, IBI Publ, 2013, no. 6, pp. 179–186. (In Russian)
- 7. Gerasymenko P. V. O sovershenstvovanii uchebnykh program ekonomyko-matematycheskykh distsiplin [On improvement of education programs in economic and mathematical disciplines]. *Universytetskoye obrazovaniye: opyt, problem, perspektyvy razvitiya: tezysy dokladov VII Mezhdunarodnogo kongressa* [*University education: experience, problems, development prospects: abstracts of the 7th International congress*]: in 2 pt. Minsk, 2013, pp. 118–119. (In Russian)
- 8. Gerasymenko P. V. O tselesoobraznosty razresheniya v vuze sformyrovavshegosya na sovremennom etape protyvorechiya metodyk prepodavaniya elementarnoy i vysshey matematyk [On reasonability of resolving the conflict of elementary and higher mathematics teaching methodologies]. Sovershenstvovaniye matematycheskogo obrazovaniya v obsheobrazovatelnykh shkolakh, nachalnykh srednykh i vysshykh professionalnykh uchebnykh zavedeniyakh [The improvement of mathematical education in general education schools, basic-level schools, secondary education institutions and higher education establishments]. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii [Proceedings of the 6th International research conference]. Tiraspol, PF (Manufacturing Company) "Litera" Publ., 2010, pp. 26–31. (In Russian)
- 9. Bolonskiy protsess. Yevropeyskiye i natsionalniye struktury kvalyfykatsiy (Kniga-prylozheniye 2) [Bologna process. European and national qualification framework (Supplement volume 2))]. Ed. by V. I. Baydenko. Moscow, Research center of specialists training quality issues Publ., 2009, 220 p. (In Russian)
- 10. Nilolayev D. & Suslova D. Rossiya v Bolonskom protsesse [Russia in Bologna process] *Voprosy obrazovaniya* [*The issues of education*], 2010, no. 1, pp. 1–17. (In Russian)
- 11. Barannikov A. V. Kompetentnostniy podkhod i kachestvo obrazovaniya [Competency-based approach

- and the quality of education]. Moscow, Moscow center for quality of education Publ., 2008, 144 p. (In Russian)
- 12. Korotkov E. M. *Upravleniye kachestvom obrazovaniya* [*Education quality control*]. Moscow, Mir Publ., 2006, 278 p. (In Russian)
- 13. Martyshyna N. I. Bazoviy uroven znaniy kak obyekt normyrovaniya v systeme obrazovaniya [The basic level of knowledge as an object of rating in the system of education]. *Vyssheye obrazovaniye v Rossii* [*Higher education in Russia*], 2015, no. 3, pp. 98–104. (In Russian)
- 14. Gerasymenko P. V. & Khodakovskiy V.A. Resultaty YGE po matematyke i uspevayemost: tsely, statystyka, analyz, predlozheniya [The results of the USE in mathematics and progress: goals, statistics, analysis, suggestions]. *Problemy matematycheskoy i yestestvennonauchnoy podgotovky v inzhenernom obrazovanii. Istorycheskiy opyt, sovremenniye vyzovy* [Problems of mathematical and scientific training in engineering education. Historical experience, contemporary challenges]. Sbornyk trudov Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii [Collected papers of the International research conference], November, 11–12<sup>th</sup> 2010; under the general editorship of V.A. Khodakovskiy. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, pp. 38–51. (In Russian)
- 15. Gerasymenko P. V. O negatyvnom vliyanii rezultatov YGE po matematyke na podgotovku spetsialystov v vuze i puty ikh ustraneniya [On the negative influence of the USE results in mathematics on specialist training in the universities and corrective measures]. Problemy matematycheskoy i yestestvennonauchnoy podgotovky v inzhenernom obrazovanii [Problems of mathematical and scientific training in engineering education]. Tezysy dokladov 20y Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii [The 2<sup>nd</sup> International research conference abstracts]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, pp. 172–173. (In Russian)
- 16. Gerasymenko P. V. O neobkhodymosty vvedeniya v vuze dlya studentov pervogo kursa individualno oriyentyrovannoy podgotovky po elementarnoy matematyke [On the necessity of introducing individually oriented training on elementary mathematics in thuniversity for the first year students]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Obrazovaniye, nauka i ekonomyka v vuzakh. Integratsiya v mezhdun-

arodnoye obrazovatelnoye prostranstvo" [Proceedings of the International research conference "Education, science and economics in universities. Integration into the international educational system"]. Poland, Plotsk, 2010, pp. 74–80. (In Russian)

17. Gerasymenko P. V. O vozmozhnosty doobucheniya shkolnoy matematyke studentov pervogo kursa [On the opportunity for the first year students to complete the course of school mathematics]. *Matematyka v vuze* [*Mathematics in the university*].

Trudy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-metodycheskoy konferentsii [Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International research conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 38–42. (In Russian)

18. Voronov M. V., Gerasymenko P. V. & Pysmenskiy G. I. Razrabotka vyrtualnoy sredy samostoyatelnoy podgotovky studentov [The development of students' self-training virtual environment]. *Innovatsii v obrazovanii* [*Innovations in education*], 2017, no. 9, pp. 31–44. (In Russian)

ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич – доктор техн. наук, профессор, pv39@mail.ru; ХОДАКОВ-СКИЙ Валентин Аветикович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; КУДАРОВ Руслан Серикович – канд. техн. наук, доцент; БУБНОВ Владимир Петрович – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ХВАТЦЕВ Александр Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой (Псковский государственный университет).

УДК 004.056.2

# С.В. Клименко, В.В. Яковлев, С.Е. Ададуров

# МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CRC КОДА

Дата поступления: 25.10.2017 Решение о публикации: 08.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Дать сравнительную оценку производительности способов получения содержимого и CRC кода дорожки CKD диска, выявить временную эффективность рассматриваемых способов. **Методы:** Для сравнения применялись математические методы. **Результаты:** Подробно описаны способы получения содержимого и CRC кода дорожки диска – принцип работы канальных команд и их формат. Приведены результаты сравнения анализируемых способов, выявлена временная эффективность каждого из них в одиночных и множественных запросах. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют определить сравнительную временную эффективность способов получения содержимого и CRC кода дорожки.

**Ключевые слова:** Системы хранения данных, CRC, CKD, производительность, эффективность, дорожка, том.

**Sergey V. Klimenko**, postgraduate student, s.klimenko@live.ru; **Valentin V. Yakovlev**, D. Eng. Sci., professor, jakovlev@pgups.ru (Petersburg State Transport University); **Sergey E. Adadurov**, D. Eng. Sci., professor, Adadurov.Sergey@niizht.ru (Research Institute of Railway Transport) METHOD FOR MONITORING DATA INTEGRITY USING CRC CODE

#### **Summary**

**Objective:** To give a comparative assessment of the performance of the ways of obtaining content and CRC code of the CKD track, to reveal the time efficiency of the methods in question. **Methods:** The methods in question were compared by means of mathematical methods. **Results:** The methods of obtaining the contents and CRC of the track code are described in detail – the principle of operation of the channel commands and their format. The results of comparison of the considered methods are given, the temporal efficiency of each method in single and multiple queries is revealed. **Practical importance:** The results of the analysis allow us to determine the relative temporal efficiency of the methods for obtaining the contents and CRC of the track code.

**Keywords:** Storage systems, CRC, CKD, performance, efficiency, track, volume.

В области обеспечения непрерывности бизнеса существует много различных проблем, связанных с быстрым ростом данных в современных ІТ инфраструктурах, среди которых особое значение приобретают задачи поддержания адекватного уровня отказоустойчивости и актуальности баз данных. Значительная роль при этом отводится внедрению новых технологий управления данными, в

частности по направлениям резервного копирования, архивирования, репликации и дедупликации в системах хранения данных (СХД), работающих под управлением мейнфреймов. Названные технологии отчасти методически сходны, но имеют принципиально разное назначение. Резервное копирование (Backup) служит для гарантированного восстановления данных, утраченных по какой-либо причине

в продуктиве (системе, в которой непосредственно работают с файлами). Архивирование используется для освобождения места в рабочей нагрузке путем сжатия утрачивающих актуальность данных и их перемещения на более медленные носители с низкой стоимостью хранения файлов. Репликация – это постоянное дублирование всех данных из продуктива на параллельно работающую систему (локальную или облачную платформу) в режиме синхронизации; дедупликация – это технология, при помощи которой обнаруживаются и исключаются избыточные данные в дисковом хранилище. В результате это позволяет сократить объемы физических носителей для хранения тех же объемов данных.

Одной из наиболее распространенных операционных систем на мейнфреймах является операционная система z/OS, основной объект системы организации данных в ней — набор данных [1], который размещается на СКD (Count Key Data) томах (рис. 1). СКD — это модель дисковой организации данных, в которой предполагается, что диск состоит из фиксированного числа дорожек, каждая из которых обладает максимальной вместимостью данных. Название архитектуры СКD происходит от формата записи, который состоит из полей, счетчика (Count), необязательного поля ключа (Key) и самих данных (Data).

Запись является наименьшей адресуемой единицей данных, хранящаяся на диске. Она одна или более могут быть записаны на дорожку. Дорожка — это наименьшая единица

дискового пространства, которая может быть независимо отформатирована или защищена от неавторизованного доступа. Каждый СКD диск (том) состоит из определенного числа цилиндров, а каждый цилиндр, в свою очередь, содержит 15 дорожек. Механизм, перемещающий головки чтения/записи в заданное место магнитной поверхности, называется актуатором.

Размер каждой дорожки равен 47 476 байт для тома модели 3380 и 56 664 байт для тома модели 3390 [2]. Далее будет рассматриваться модель тома 3390.

Для защиты данных от потери, реализации аварийного восстановления, а также для переноса данных в новые местоположения используется репликация данных — процесс их копирования в массиве в другое пространство в пределах этого же массива в другой отдельный или удаленный массив [3]. Целью может быть перемещение данных, их защита в другом местоположении или передача в резервный центр обработки.

После создания реплики часто возникает потребность в проверке целостности (идентичности) данных между дисковыми массивами.

Осуществить контроль целостности исходного и целевого томов для заданных дорожек и цилиндров после процесса репликации можно следующими способами:

1) воспользоваться стандартными средствами операционной системы z/OS и составить канальную программу, которая будет считы-

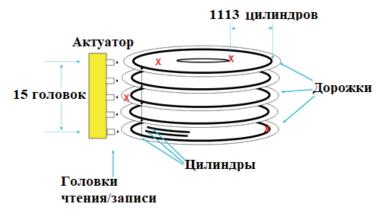


Рис. 1. Структура СКD тома 3390

вать содержимое в выделенные заранее буферы и проверять непосредственно сами данные между собой;

2) воспользоваться возможностями СХД и запрашивать контрольную сумму (CRC код) содержимого и проверять контрольные суммы между собой.

Под контрольной суммой понимается некоторое значение, рассчитанное по набору данных путем применения математических алгоритмов, обеспечивающих устойчивость к хэш-коллизиям, например CRC-32 или MD5 [4].

Главное отличие между двумя вышеуказанными способами состоит в том, что в первом речь идет о сравнении содержимого исходного и целевого томов, а во втором – контрольных сумм содержимого.

Второй способ осуществим благодаря тому, что современные СХД обладают расширенными функциональными возможностями и могут производить подсчет контрольных сумм (Cyclic Redundancy Check (CRC) кодов) по запросу, в частности, контрольной суммы всей дорожки. Например, такой возможностью пользуется программный продукт для проверки целостности данных на томах Disk-Compare [5].

Данные способы были исследованы с помощью СХД Symmetrix VMAX 40K, подключенной по FICON каналу к мейнфрейму, работающему под управлением операционной системы z/OS1.12.

Рассматриваемые способы отличаются друг от друга и количеством требуемой памяти для временного хранения полученного содержимых дорожек или их СRС кодов. При этом размер одной дорожки составляет 56 Кбайт, а так как в проверке целостности участвуют два тома, то необходимо иметь два буфера

(2.56 Кбайт) для хранения содержимых дорожек томов. В то же время размер CRC кода одной дорожки составляет 4 байта, соответственно размер буферов будет существенно меньше.

#### Канальная подсистема

Канальная подсистема (Channel Subsystem) позволяет направлять поток информации между устройствами ввода/вывода и основным хранилищем (рис. 2).

Основными компонентами канальной подсистемы являются:

- 1) периферийные устройства (Input/Output device), к которым относятся внешние запоминающие устройства;
  - 2) устройства ввода/вывода информации.

Номер устройства задается 16-разрядным кодом, что допускает применение до 65 536 устройств.

Канальная подсистема освобождает процессоры от непосредственной связи с устройствами ввода/вывода и позволяет обрабатывать данные одновременно с обработкой ввода/вывода. Она использует один или несколько каналов в качестве канала связи при управлении потоком информации на устройства ввода/вывода или с них. Также канальная подсистема выполняет функцию управления трассировкой для проверки доступности канала, выбора доступного пути канала и начала выполнения операции с устройством ввода/вывода.

Устройства ввода/вывода подключаются через устройства управления к канальной подсистеме через каналы. Один канал предусмотрен и предназначен для каждого устройства ввода/вывода, доступного для канальной подсистемы (рис. 3).



Рис. 2. Связь канальной подсистемы с устройством ввода/вывода

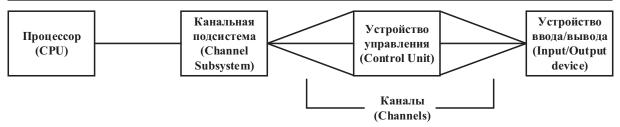


Рис. 3. Связь канальной подсистемы с устройством ввода/вывода через устройство управления

Операция ввода/вывода устройства регулируется устройством управления, который обеспечивает логические и буферные возможности, необходимые для работы соответствующего устройства ввода/вывода. Функция устройства управления может быть размещена с устройством ввода/вывода или в СРU, или может использоваться отдельное устройство управления. Устройства управления могут быть подключены к канальной подсистеме через несколько каналов, а устройство ввода/вывода — к нескольким устройствам управления.

### Канальные команды DE и A6

Для получения содержимого дорожки заданного цилиндра существуют канальные

команды Channel Command Word (канальное слово канальной программы, далее CCW). Канальная программа состоит из набора CCW команд. Ее исполнение происходит путем последовательного считывания команд CCW и выполнения задаваемых в CCW командах операций с периферийным устройством [6]. Одними из таких команд являются следующие:

- 1) Read Track, канальная команда DE;
- 2) Read Track Data, канальная команда A6. На рис. 4 представлена схема взаимодействия СХД и мейнфрейма для сравнения содержимых треков.

Команда Read Track передает несколько записей в канал. Она предназначена главным образом для служебных программ дампа или восстановления. Эта команда отправляет все записи с логического тома без предварительного определения количества записей на до-

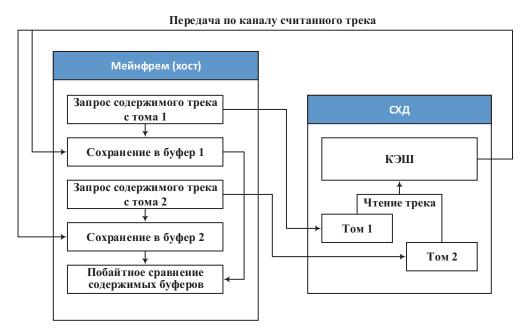


Рис. 4. Взаимодействие СХД и мейнфрейма для сравнения содержимых треков

рожке и их форматов. После прочтения последней записи на дорожке содержимое передается на канал.

Команда Read Track Data передает несколько записей с дорожки на канал. Чтение данных дорожки является действительным только в домене команды «Локальная запись», в которой указан код операции «Чтение дорожки», или команды «Найти запись», указывающей «Прочитать дорожку» или код операции «Чтение дорожки» [7].

# Структура ССW команды

ССW – это операция ввода/вывода, используемая для связи с канальной подсистемой. ССW содержит команду канала, такую как чтение, запись или управление, а также адрес данных области данных. Данные передаются в подсистему каналов. Канальная подсистема передает состояние ввода/вывода обратно в выдающее приложение.

Результат выполнения канальной программы приведен в сокращенном виде (так как результат выполнения команды составляет 56 Кбайт) на рис. 5.

Под кодировкой EBCDIC (Extended Binary Coded Decimal Interchange Code – расширенный двоично-десятичный код обмена информацией) понимается стандартный 8-битный код, разработанный корпорацией IBM для использования на мейнфреймах собственного

производства и совместимых с ними. К примеру код «С1» в кодировке EBCDIC соответствует латинской букве «А».

Из результата можно увидеть поле RESP-TIME (далее время отклика), которое дает представление о времени получения данных с дорожки.

#### Получение CRC кода

Программное обеспечение компании ЕМС для управления дисковым массивом на низком уровне использует протокол связи, называемый системным вызовом (syscall). Под ним понимается набор специальных канальных команд, которые могут быть понятны СХД Symmetrix.

Системные вызовы могут объединяться в Symmetrix Application Programming Interface (SymmAPI) и представлять собой Application Programming Interface (API) к операционной системе хранения данных.

Программные модули SymmAPI находятся на хост-системе (мейнфрейме) и позволяют системным интеграторам и независимым поставщикам программного обеспечения получать доступ к системе хранения данных. SymmAPI взаимодействует с системой хранения данных путем использования канальных команд. Хост-система и система Symmetrix связаны через один или несколько физических интерфейсов.

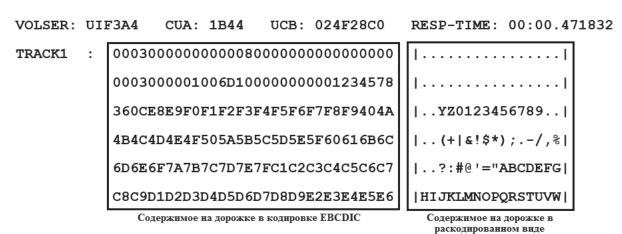


Рис. 5. Результат выполнения ССW команды

В ответ на запрос от приложения, работающего на хосте, SymmAPI отправляет системный вызов к СХД Symmetrix и получает в ответ данные от СХД.

На рис. 6 представлена схема взаимодействия СХД и мейнфрейма для сравнения СКС кодов содержимых треков.

Для того чтобы получить контрольные суммы (CRC коды) дорожек, необходимо сформировать корректный запрос посредством

>>> Syscall Successful

системного вызова к СХД. В запрос входит следующая информация:

- 1) номер системного вызова, отвечающий за подсчет контрольной суммы;
  - 2) номер диска (Symmetrix device number);
  - 3) номер цилиндра;
- 4) число дорожек, для которых необходимо вернуть CRC код (от 1 до 15).

Результат выполнения системного вызова к СХД приведен на рис. 7.



Рис. 6. Взаимодействие СХД и мейнфрейма для сравнения CRC кодов содержимых треков



Рис. 7. Результат выполнения системного вызова

# Оценка временной эффективности

Для оценки временной эффективности был разработан одинаковый набор тестов, позволяющий собрать статистику по каждому из ранее описанных способов.

Под временной эффективностью понимается отношение времени отклика на получение CRC кода ко времени отклика получения содержимого дорожек.

Статистика отражает время отклика на исполнение запросов в зависимости от числа дорожек. Время отклика получено для i-дорожек, где i=1,5,10,15.

Блок-схема алгоритма проведенных тестов для сбора статистики представлена на рис. 8.

Для вычисления среднеарифметического значения времени отклика на исполнение запроса использовалась формула

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} t_i, \tag{1}$$

в которой  $t_i$  — время отклика i-го содержимого/CRC; N — общее количество обращений к дорожке.

Среднеквадратичное отклонение рассчитывалось следующим образом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} (t_i - \bar{t})^2}, \qquad (2)$$

где  $\overline{t}$  — среднеарифметическое значение. Временная эффективность

$$\delta = 100 - \frac{\overline{t_{CRC}} + \sigma_{CRC}}{\overline{t_R} + \sigma_R} \cdot 100, \tag{3}$$

здесь  $\overline{t_R}$  и  $t_{CRC}$  — время получения содержимого и CRC кода соответственно,  $\sigma_R$  и  $\sigma_{CRC}$  — их среднеквадратичные отклонения соответственно.

Результаты вычислений по формулам (1) – (3) представлены в табл. 1, 2.

Среднее время получения запроса – величина непостоянная, так как зависит от степени загрузки канала между хостом и СХД, а также от степени загруженности самого хоста



Рис. 8. Блок-схема – структура теста

и СХД. Стоит также отметить, что главное преимущество способа контроля целостности по СКС коду в меньшей нагрузке на канал между СХД и мейнфреймом, поскольку количество передаваемой информации в разы сокращается. Однако при таком способе идет дополнительная нагрузка на кэш, потому что в нем происходит подсчет СКС кода содержимого дорожки.

Рассмотрим том размерностью  $65\,520$  цилиндров. Его размер составляет:  $65\,520\times15\times56\,664=55\,689\,379\,200$  байт  $\approx52$  Гбайт (где 15 – количество дорожек,  $56\,664$  – размер в байтах каждой дорожки). Соответственно 52 Гбайт придется передать по каналу только для одного тома. Способ получения СRC кода требует пересылки меньшего количества информации по каналу:  $65\,520\times15\times4=3\,931\,200$  байт  $\approx4$  Мбайт (где 15 – количество дорожек, а 4 – размер в байтах каждого CRC кода дорожки).

Таким образом, нагрузка на канал умень-

шится в 
$$\frac{65\ 520 \cdot 15 \cdot 56\ 664}{65\ 520 \cdot 15 \times 4} = 14\ 116$$
 раз.

Отметим, что систематическое изложение вопросов, касающихся проблематики настоящей статьи, содержится в [9, 10].

Тип запроса	Количество	Количество	Среднее время	Среднеквадратичное
к дорожке	дорожек	запросов	отклика, с	отклонение
	1	100	0,001	0,0007
Получение	5		0,0038	0,0017
содержимого	10	50	0,0063	0,0013
	15		0,0094	0,0015
	1	100	0,0011	0,0001
Получение	5		0,004	0,0011
CRC кода	10	50	0,0068	0,0015
	15		0,0092	0,0008

ТАБЛИЦА 1. Результаты выполнения запросов к группам дорожек

ТАБЛИЦА 2. Эффективность получения СРС кодов по сравнению с содержимым

Тип запроса к дорожке	Количество дорожек	Эффективность,%
Получение CRC кода	1	29,41
	5	7,27
	10	-9,21
	15	8,26

#### Заключение

В статье описаны способы получения содержимого дорожки тома при помощи стандартных средств операционной системы z/OS и способ получения CRC кода, который генерируется программно на стороне СХД по запросу пользователя. Была собрана статистика, позволяющая оценить производительность рассматриваемых способов.

Анализ результатов показал, что способ генерации CRC кода дорожки на стороне СХД для контроля целостности данных обладает преимуществами, такими как снижение времени отклика и нагрузки в канале передачи данных между СХД и мейнфреймом.

# Библиографический список

- 1. Бартеньев О. В. Особенности тестирования наборов данных в операционной системе z/OS / О. В. Бартеньев, С. В. Клюев // Программные продукты и системы. -2014. № 107. -C. 53–58.
- 2. Kuzler C. IBM Enterprise Storage Server / C. Kuzler, P. Norman, A. Pate, R. Wolf. San Jose,

California: IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1999. – 250 p.

- 3. Глоссарий EMC.— URL: https://russia.emc.com/corporate/glossary/replication.htm (дата обращения: 20.09.2017).
- 4. Мыцко Е. А. Особенности программной реализации вычисления контрольной суммы CRC32 на примере PKZIP, WINZIP, ETHERNET / Е. А. Мыцко, А. Н. Мальчуков // Вестн. науки Сибири. 2011. № 1(1). С. 279—282.
- 5. New Features in EMC Enginuity 5876 for Mainframe Environments. 2012. 19 p.
- 6. Варфоломеев В. А. Архитектура платформ IBM eServer zSeries / В. А. Варфоломеев, Э. К. Лецкий, М. И. Шамров, В. В. Яковлев. М.: Интуит, 2016. 640. с.
- 7. Internal Disk Subsystem: Reference Guide. International Business Machines Corporation. First ed. Armonk, New York, 1999. 264 p.
- 8. High Level Assembler for z/OS & z/VM & z/VSE Language Reference Version 1 Release 6. International Business Machines Corporation. Sixth ed. San Jose, California, 2008. 484 p.
- 9. Hennessy J. L. Computer Architecture a Quantitative Approach / J. L. Hennessy, D. A. Patterson. –

Fifth ed., 225 Wyman Street, Waltham, MA: Elsevier Inc., 2012. – 851 p.

- 10. Jacob B. Memory Systems Cache, Dram, Disk / B. Jacob, W. Ng Spencer, D. T. Wang. 30 Corporate Drive, Suite 400. Burlington, MA: Morgan Kaufmann Publ., 2008. 982 p.
- 11. Яковлев В.В. Оценка влияния помех на производительность протоколов канального уровня / В.В. Яковлев, Ф.И. Кушназаров // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. — СПб. : ПГУПС, 2015. — N 1 (42). — С. 133—138.
- 12. Яковлев В. В. Обеспечение информационной безопасности с помощью сервера защиты z/OS Security Server / В. В. Яковлев, А. Д. Хомоненко // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2008.—№ 3 (16).—С. 99—111.
- 13. Kaplan M. Test Machine Scheduling and Optimization for z/OS / M. Kaplan T. Kimbrel, K. Mckenzie, R. Prewitt, M. Sviridenko, C. William, C. Yilmaz. Honolulu, Hawaii: In the Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling April 1–5, 2007. P. 24–27.

#### References

- 1. Bartenyev O. V. & Klyuyev S. V. Osobennosti testirovaniya naborov dannykh v operatsionnoy systeme z/OS [Peculiarities of data sets testing in the z/OS operating system]. *Programmniye produkty i sistemy* [*Software and Systems*], 2014, no.107 (3), pp. 53–58. (In Russian)
- 2. Kuzler C., Norman P., Pate A. & Wolf R. *IBM Enterprise Storage Server*. San Jose, California, IBM Corporation, International Technical Support Organization Publ., 1999, 250 p.
- 3. *EMC Glossary*. URL: https://russia.emc.com/corporate/glossary/replication.htm (accessed: 20.09. 2017).
- 4. Mytsko E.A. & Malchukov A.N. Osobennosty programmnoy realizatsii vychisleniya kontrolnoy summy CRC32 na primere PKZIP, WINZIP, ETH-ERNET [Features of the software implementation of

- CRC32 checksum calculation using the example of PKZIP, WINZIP, ETHERNET]. *Vestnyk nauky Sibiry* [*Newsletter of Siberian Science*], 2011, no. 1 (1), pp. 279–282. (In Russian)
- 5. New Features in EMC Enginuity 5876 for Mainframe Environments, 2012, 19 p.
- 6. Varfolomeev V.A., Letskiy E.K., Shamrov M.I. & Jakovlev V.V. *Architektura platform IBM eServer zSeries* [*Architecture of IBM platforms eServer zSeries*]. Moscow, Intuit Publ., 2016, 640 p. (In Russian)
- 7. *Internal Disk Subsystem: Reference Guide*. International Business Machines Corporation Publ., First ed. Armonk, New York, 1999, 264 p.
- 8. High Level Assembler for z/OS & z/VM & z/VSE Language Reference Version 1 Release 6. International Business Machines Corporation Publ., Sixth ed. San Jose, California: 2008, 84 p.
- 9. Hennessy J. L. & Patterson D. A. *Computer Architecture a Quantitative Approach*. Fifth ed., 225 Wyman Street, Waltham, MA: Elsevier Inc., 2012, 851 p.
- 10. Bruce Ja., Spencer W. Ng. & D. T. Wang. *Memory Systems Cache, Dram, Disk.* 30 Corporate Drive, Suite 400. Burlington, MA, Morgan Kaufmann Publ., 2008, 982 p.
- 11. Jakovlev V.V., Kushnazarov F.I. Otsenka vlijanija pomekh na proizvoditelnost protokolov kanalnogo urovnya [Estimating the impact of interference on the performance of link layer protocols]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2015, issue 1 (42), pp. 133–138. (In Russian)
- 12. Jakovlev V.V. & Khomonenko A.D. Obespechenie informatsionnoy bezopasnosty s pomoshju servera zashity z/OS Security Server [Ensuring Information Security with the z/OS Security Server]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2008, no. 3 (16), pp. 99–111. (In Russian)
- 13. Kaplan M., Kimbrel T., Mckenzie K., Prewitt R., Sviridenko M., William C. & Yilmaz C. Test Machine Scheduling and Optimization for z/OS. *Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling* April 1–5. Honolulu, Hawaii, 2007, pp. 24–27.

КЛИМЕНКО Сергей Витальевич — аспирант, s.klimenko@live.ru; ЯКОВЛЕВ Валентин Васильевич — доктор техн. наук, профессор, jakovlev@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); АДАДУРОВ Сергей Евгеньевич — доктор техн. наук, профессор, Adadurov.Sergey@niizht.ru (АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва).

УДК 681.3

# С.В. Микони, В.Г. Дегтярев, В.А. Ходаковский, Р.С. Кударов

# СОПОСТАВЛЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИЙ МОДЕЛЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА ДВУХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДАХ\*

Дата поступления: 10.10.2017 Решение о публикации:10.11.2017

#### Аннотация

Цель: Моделирование – универсальный инструмент решения любых задач, начиная с изучения существующих объектов и кончая проектированием искусственных объектов. Возможность применения различных моделей для решения поставленной задачи приводит к необходимости оценивания их качества. Эта проблема особенно актуальна для сложных объектов, моделирование которых осуществляется с помощью моделей разных типов. Первичной задачей при оценивании их качества является выявление свойств моделей. Она решается разработкой классификаций. В работе рассматривается классификация, основанная на разделении моделей на жесткие (формализованные) и мягкие, нацеленные на формализацию различных видов неопределенности. Для устранения выявленных недостатков предлагается альтернативный вариант классификации моделей. Методы: Для анализа классификаций моделей применяются методы системного анализа. Результаты: Выявлены недостатки существующей классификации моделей и предложена классификация моделей в многомерном пространстве признаков, лишенная этих недостатков. Практическая значимость: Предлагаемая классификация моделей в многомерном пространстве признаков позволяет охарактеризовать любую модель присущим ей набором свойств. Наряду с познавательной ценностью классификация облегчает выбор наиболее приемлемой модели на основе ее сопоставления с другими моделями, обладающими аналогичными свойствами.

**Ключевые слова:** Классификация, модель – аналитическая, имитационная, жесткая, мягкая, однородная, неоднородная, детерминированная, недетерминированная.

Stanislav V. Mikoni, D. Sci. Eng., professor, senior researcher at The Federal State Institution for Informatics and automation of RAN, professor at The First Electrotechnical University, smikoni@mail. ru. Valentyn G. Degtyarev, D. Sci. Eng., professor, vdegt@list.ru; \*Valentyn A. Khodakovskiy, D. Sci. Eng., professor, head of chair, hva1104@mail.ru; Ruslan S. Kudarov, Cand. Sci. Eng., associate professor, r. s.kudarov@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) CORRELATION OF MODEL CLASSIFICATIONS, BASED ON TWO ALTERNATIVE APPROACHES

#### **Summary**

**Objective:** Modeling is a universal instrument for the solution of any tasks, ranging from the study of the existing objects to artificial objects design. Applicability of different models for the solution of the task leads to the necessity of quality assessment of the models in question. The given problem is particularly topical for complex objects, modeling of which is carried out by means of models of different types. The detection of model properties is the primary task when evaluating the quality of the former. The task is solved through the development of classifications. The classification, based on the division of models on rigid (formalized) and soft, aimed at characterization of uncertainties of different types, is considered in the given study. In order to eliminate the identified drawbacks an alternative classification was suggested.

 $<sup>^*</sup>$  Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00139) Министерства образования и науки РФ (госзадание № 2.3135.2017/K), в рамках бюджетных тем № 0073-2014-0009, 0073-2015-0007.

**Methods:** The methods of systems analysis were applied in the analysis of model classifications. **Results:** The deficiencies of the existing classification of models were revealed as well as the classification of models in multidimensional space of features was suggested, being free from the above-mentioned drawbacks. **Practical relevance:** The given classification of models in multidimensional space of features makes it possible to give the description of any model with the set of features typical for each particular model. Alongside with educational value, the classification simplifies the choice of the most acceptable model by comparing the latter with other models having similar properties.

**Keywords:** Classification, model – analytical, simulation, rigid, soft, homogeneous, heterogeneous, deterministic, non-deterministic.

#### Введение

Любая классификация решает две задачи: характеризует объекты наиболее существенными признаками и объединяет по ним индивиды в группы, уменьшая их многообразие. Этот научный прием позволяет упорядочить знание, что упрощает его восприятие и применение. Актуальность классификации в полной мере касается моделей, разнообразие которых растет по мере проникновения моделирования во все сферы человеческой деятельности.

Классификации моделей предлагаются во многих работах [1–5]. Ф. П. Тарасенко предположил, что все многообразие моделей можно свести к трем типам, различающимся по составу, структуре и функциям системы [3]. Однако, на наш взгляд, такая классификация является слишком упрощенной, поскольку не охватывает многообразие свойств моделей.

В основу более подробных классификаций положен один из двух принципов: объединение группируемых объектов относительно некоторого общего свойства либо построение многомерного пространства признаков, в котором выявляются свойства, присущие анализируемому объекту. К недостатку первого способа относится обладание членами группировки назначенным свойством в разной степени, что приводит к поверхностности классификаций; недостатком второго способа является необходимость обеспечения полноты системообразующих признаков и формирования их шкал. При этом качество классификаций, получаемых обоими способами, зависит от качества определений используемых в них понятий, поскольку в них в явной или неявной форме содержатся характеризующие их существенные признаки.

В статье рассматриваются оба подхода с указанием их достоинств и недостатков.

# Классификация моделей относительно общего свойства

Наиболее подробно и аргументировано классификации моделей и методов моделирования описаны в работе [1]. Ее авторы, учитывая разные мнения ученых на принадлежность формализованных моделей к классу математических, предпочитают не использовать этот термин, разделяя модели на формальные и формализованные. Все модели формализованного представления систем разделены на два класса: модели формализованного представления систем (МФПС) и модели, направленные на активизацию использования интуиции и опыта специалистов (МАИС). К последним авторы [1] относят так называемые мягкие модели, нацеленные на формализацию различных видов неопределенности.

По мнению авторов [1], строгого разделения методов на формальные и неформальные не существует — «можно говорить только о большей или меньшей степени формализованности модели или, напротив, о большей или меньшей опоре на интуицию и здравый смысл». В [2] предложены модели формализованного представления систем (МФПС), которые образуют следующие обобщенные группы (классы):

- 1) аналитические (методы классической математики);
  - 2) статистические;
  - 3) теоретико-множественные;
  - 4) логические;
  - 5) лингвистические;
  - 6) графические.

Под аналитическими авторы [1] понимают «модели, которые ряд свойств многомерной, многосвязной системы (или какойлибо ее части) отображают в единственную точку п-мерного пространства, совершающую какое-то движение». По их мнению, эти модели применяются в тех случаях, когда свойства системы можно отобразить с помощью детерминированных величин или зависимостей, т.е. когда знания о процессах и событиях в некотором интервале времени позволяют полностью определить поведение их вне этого интервала. Заметим, что использование аналитических моделей только для представления детерминированных зависимостей фактически уравнивает их с детерминированными моделями.

В тех случаях, когда не удается получить систему с помощью детерминированных категорий, применяются модели случайных процессов, представляемые вероятностными характеристиками и статистическими закономерностями. Последние в общем случае (по аналогии с аналитическими) можно считать «размытой» точкой (областью) в n-мерном пространстве, в которую отображает свойства системы некоторый оператор F [Sx]. «Размытую» точку следует понимать как некоторую область, описывающую движение системы (ее поведение).

Физический смысл проекции области на ось анализируемого параметра отражает статистическое распределение вероятности воздействия этого параметра на поведение системы. По сравнению с аналитической моделью процесс ее создания частично заменяется статистическими исследованиями, позволяющими, не выявляя все детерминированные связи между изучаемыми событиями или учитываемыми компонентами сложной системы, на основе исследования предста-

вительной выборки получать статистические закономерности и распространять их на поведение системы в целом.

Теоретико-множественные модели являются основой математической теории систем М. Месаровича [6]. Однако свобода введения любых отношений приводит к тому, что в создаваемых языках моделирования трудно ввести правила, закономерности, используя которые формально можно прийти к результатам, адекватным реальным моделируемым объектам и процессам, как это позволяют делать аналитические и статистические модели.

Логические модели применяются при изучении новых структур систем разнообразной природы (технических объектов, текстов и др.), в которых характер взаимодействия между элементами еще не настолько ясен, чтобы представить их аналитическими методами, а статистические исследования либо затруднены, либо не дают возможность выявить устойчивые закономерности.

Лингвистические и семиотические модели возникли и развиваются в связи с потребностями анализа текстов и языков и при построении онтологий предметных областей. В последнее время эти модели начинают применяться для отображения процессов в сложных системах в тех случаях, когда не удается использовать предыдущие методы.

Графические модели (сетевые модели, графики Ганта, диаграммы, гистограммы и т. п.) являются удобным средством исследования структур и процессов в сложных системах и решения различного рода организационных вопросов в информационно-управляющих комплексах, в которых необходимо взаимодействие человека и технических устройств.

Согласно рассмотренным группировкам моделей предлагается выбирать модель по результатам предварительного анализа проблемной ситуации. Если анализ показывает, что она может быть дана как хорошо организованная система, то следует начать с классов аналитических и графических моделей. Если специалисты по теории систем и системному анализу рекомендуют описать ситуацию

в виде плохо организованных (диффузных) систем, то следует обратиться прежде всего к статистическому моделированию. При представлении ситуации классом самоорганизующихся систем необходимо применять методы дискретной математики, разрабатывая на их основе языки моделирования и автоматизации проектирования и формировать модель, сочетая методы из групп МАИС и МФПС.

Судя по приведенным рекомендациям, цель авторов, как специалистов по системному анализу и классификации, состоит в обеспечении решения задачи выбора типа модели на начальном этапе ее проектирования, не затрагивая проблему качества модели. Фактически предложенная классификация разделяет модели по степени принадлежности к различным разделам математики: функциональному анализу, математической статистике, теории множеств, математической логике, математической лингвистике, теории графов и в этом плане ничто не мешает называть их математическими. При этом с точки зрения классификации трудно назвать различающий их признак.

Более подробно рекомендации по выбору типа модели даются в так называемых прикладных классификациях МФПС. Выраженные в табличной форме они связывают конкретные модели с рекомендуемыми общими типами моделей.

В отличие от «жестких» моделей из группы МФПС модели группы МАИС принадлежат классу так называемых мягких моделей. Так в 1994 г. Л. Заде предложил называть модели, применяемые в интеллектуальных информационных технологиях, «мягкими вычислениями» (Soft Computing) [7]. По мнению Л. Заде, мягкие вычисления (SC) – это не какая-то отдельная методология. Скорее, это комплекс вычислительных методологий, которые коллективно обеспечивают основы для понимания, конструирования и развития интеллектуальных систем. В этом объединении главными компонентами SC являются нечеткая логика (FL), нейровычисления (NC), генетические вычисления (GC) и вероятностные вычисления (РС). Позднее в этот конгломерат были включены рассуждения на базе свидетельств (evidential reasoning), сети доверия (belief networks), хаотические системы и разделы теории машинного обучения. Очевидно, что данный список остается открытым. Подобно типам жестких моделей мягкие модели здесь также разделены на группы, основанные на бионической парадигме искусственного интеллекта.

Особенности моделей мягкого типа используются для создания прикладных классификаций МАИС. Например, нейросетевые модели нашли наибольшее применение в задачах классификации, генетические вычисления — в задачах оптимизации, вероятностные вычисления — в вероятностном выводе и т. д.

# Классификация моделей в пространстве признаков

Этот подход использовался, в частности, в работе [4]. Его преимуществом является возможность выявления различных сочетаний простейших свойств модели. Однако нахождение простейших свойств – основная проблема этого подхода. В качестве координат линейного пространства необходимо выбрать совокупность системообразующих признаков, отвечающую требованиям полноты и линейной независимости. Каждая координата такого пространства должна представлять собой шкалу с полярными значениями обладания и необладания заданным свойством. Иными словами, следует рассматривать противопоставления типа однородная/неоднородная, формальная/неформальная, детерминированная/недетерминированная модель и т. д. Здесь проблема заключается в объяснении модели, не обладающей заданным свойством. Рассмотрим проблему применительно к часто встречающимся свойствам модели.

1. Однородная/неоднородная модель. Свойство неоднородности применимо и к структуре, и к функциям модели и потому не требует дополнительных пояснений.

2. Формальная/неформальная модель. Формальная модель должна строиться по синтаксическим правилам, сформулированным для конкретной предметной области. Синтаксические правила задают ограничения на построение синтаксически правильных совокупностей — цепочек символов (формул, слов и предложений языка).

Если понимать неформальную модель как не соответствующую синтаксическим правилам языка предметной области, то для нее такая модель становится непригодной. Вместе с тем модель, сконструированная по синтаксическим правилам, может быть лишена смысла, т. е. быть неразрешимой в данной предметной области. Примером служат фразы из произведения Станислава Лема «Звездные дневники Иона Тихого» типа «Эта сипулька для какого сипулькария?». Это синтаксически правильно сконструированное предложение не имеет смысла. Исходя из этого, противопоставлением формальной модели является содержательная модель, как смысл, не облеченный в требуемую форму. Такое противопоставление отвечает диалектической взаимосвязи содержания и формы, из чего следует обоснованность деления моделей на содержательные (неформальные) и формальные.

Обратим внимание на тот факт, что, подобно тому, как в природе не существуют химические элементы в чистом виде, в реальной практике абсолютные антиподы встречаются редко. Иными словами, реальная модель, как правило, сочетает противоположные свойства в некоторой пропорции. Применительно к рассмотренному делению моделей на формальные (отвлеченные от смысла) модели и неформальные (содержательные) укажем на формализованную модель, сочетающую форму со смыслом. В программировании ей отвечают языки программирования, понятные как человеку, так и компьютеру. В исчислении предикатов слова естественного языка сочетаются с логическими символами.

3. Детерминированная/недетерминированная модель. В русском переводе этому делению соответствует противопоставление

полностью определенной и неопределенной моделей. Детерминированные (определенные) модели строятся на основе математических закономерностей, описывающих физикохимические процессы в объекте, поведение которых предсказуемо. Детерминированная модель может применяться для описания объекта, если факторы и отклик по своей природе являются неслучайными величинами, погрешностями которых можно пренебречь.

Недетерминированная модель моделирует различные виды неопределенности, которые могут порождаться неполнотой описания ситуации, вероятностным характером наблюдаемых событий, неточностью представления данных, многозначностью слов естественного языка, использованием эвристических правил вывода и др. Наиболее важные виды неопределенности [8] представлены в виде дерева на рис. 1.

На первом уровне дерева неопределенность делится на основе качественных оценок, связанных либо с неполнотой знаний, либо с их неоднозначностью. Неполнота знаний возникает, когда собрана не вся информация, необходимая для построения модели. К ней, согласно В.И. Арнольду [9], следует отнести также функциональную неопределенность, под которой понимается свобода выбора функций для вычисления коэффициентов выражения, зависящих от неизвестных факторов. Этот вид неопределенности можно распространить, например, и на подбор функций, усредняющих оценки, полученные по многим критериям [10].

Неоднозначность означает, что истинность данных и результатов не может быть установлена с абсолютной достоверностью. Она порождается либо физическими причинами (физическая неопределенность), либо лингвистическими (лингвистическая неопределенность).

Физическая неопределенность может быть вызвана случайностью событий, ситуаций, состояний объекта или неточностью (размытостью) данных.

Лингвистическая неопределенность связана с использованием естественного языка для

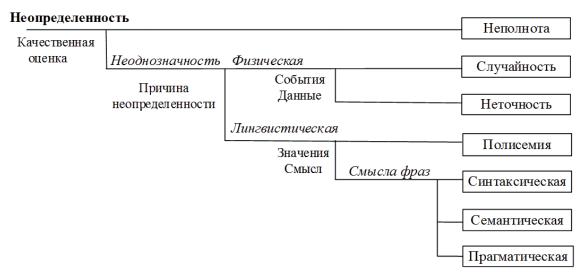


Рис. 1. Виды неопределенности

представления знаний, имеющих качественный характер, и возникает из-за множественности значений слов (полисемия) и смысла фраз. Такого рода неопределенности присутствуют в моделях, включающих человеческие суждения и оценки. При анализе неопределенности смысла фраз выделяют синтаксическую, семантическую и прагматическую неопределенности [11]. Для оценивания моделей с неопределенностью применяется понятие достоверности. Она характеризуется вероятностными оценками, коэффициентами уверенности и принадлежности классам.

В работе [12] неопределенность, присущая всем видам мягкого подхода, трактуется через ее наглядный образ — интервальность. В ней точку следует полагать предельным случаем интервала при совпадении его границ, а интервал — размытой, расплывчатой точкой [1], что дает возможность рассматривать его как наглядную трактовку неопределенности. С позиции теории множеств точка — это экземпляр класса, а отрезок прямой — бесконечное множество точек (класс). При описании интервала фиксированным набором точек мы имеем дискретное множество.

Подобно отношению точки к интервалу обычное множество следует считать предельным случаем расплывчатого (нечеткого) множества. На рис. 2 пунктирными линиями

приведена характеристическая функция множества A на отрезке [a, b], принадлежащего универсуму точек X на оси x.

Треугольную форму имеет один из вариантов функции принадлежности с единственной точкой, принадлежащей на 100% множеству A. Из бесчисленного количества вариантов функции принадлежности  $0 < \mu_A(x) \le 1$  на отрезке [a,b] характеристическая функция — единственный вариант полной принадлежности его точек множеству A и, следовательно, является частным — предельным вариантом функции принадлежности.

Что касается термина «мягкий критерий», предложенного в работе [13], он также носит обобщающий характер по отношению к «жесткому» критерию. Действительно, существует единственный вариант жесткого требования к значению x (см. рис. 2) а именно, x = c. Остальные требования к значению x мягкие:

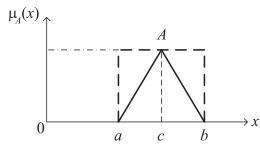


Рис. 2. Характеристическая функция и функция принадлежности множества *А* 

x > c и x < c. В первом случае допустимо нахождение x в интервале (c, b], а во втором — в интервале [a, c). Однако, поскольку в задачах оптимизации точка c принимается за целевое значение [10], она должна дополнять неравенства x > c и x < c:  $x \ge c$  и  $x \le c$ . А это означает, что критерии  $\ge (x, c)$  и  $\le (x, c)$  имеют и жесткий, и мягкий, более общий, варианты.

Классическим примером неопределенности (неоднозначности) результатов вычислений являются решения диофантовых уравнений в целых числах, поскольку в них число переменных превышает число уравнений. Для их решения необходимо проводить рассуждения, базирующиеся на понятиях теории чисел [14].

4. Аналитическая/неаналитическая модель. В работе [5] аналитическая модель отождествляется с детерминированной (определенной) моделью. Между тем аналитика воспринималась авторами этого термина как операции мысленного или реального расчленения целого (вещи, свойства, процесса или отношения между предметами) на составные части, выполняемые в процессе познания или предметно-практической деятельности человека. В этом определении отсутствует смысл определенности добываемого знания. Для примера обратимся к понятию энтропия. Как известно, информационная двоичная энтропия (средняя энтропия сообщения) для независимых случайных событий х с п возможными состояниями, имеющих вероятности р, рассчитывается по формуле

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \cdot \log_2 p_i.$$

Величина  $H_i = -\log_2 p_i$  называется частной энтропией, характеризующей только i-е состояние. Таким образом, энтропия системы является суммой с противоположным знаком всех вероятностей появления состояния (события) с номером i, умноженных на их же двоичные логарифмы.

Очевидно, что приведенная формула представляет собой недетерминированную модель

сообщения в силу вероятностной природы переменных  $p_i$ , i = 1, n. Кроме того, при  $p_{i} = 1/n$  она количественно характеризует максимальную неопределенность сообщения. Тем не менее, эта формула объединяет расчлененные элементы сообщения и, следовательно, по определению аналитики, относится к классу аналитических моделей. В качестве объединителей в данной формуле используются операции умножения и сложения. Они представлены в явной и жесткой форме в отличие от неявно заданных связей, например в виде алгоритмов, присущих имитационным моделям. Именно эта особенность является преимуществом последних, которое заключается в удобстве их перестройки.

5. Жесткая/нежесткая модель. Естественным антиподом жесткой является мягкая модель [9, 12]. Если жесткость модели сопоставить с определенностью отражаемой ею закономерности, то детерминированная модель и служит фактическим синонимом жесткой модели, а недетерминированная модель - синонимом мягкой модели. Тем не менее, и здесь не все так просто. Законы суммы вероятностей независимых случайных событий и произведения вероятностей зависимых событий являются жесткими законами, установленными для мягких данных. Налицо преобразование мягких данных жесткими операциями сложения и умножения в отличие от мягких операций min и max, используемых в многозначной и бесконечнозначной логике.

В установлении соотношения жесткого и мягкого может помочь аналогия этих понятий с действительными и комплексными числами. Действительной оси комплексного числа поставим измеренное или вычисленное значение показателя, а мнимой оси — коэффициент уверенности или коэффициент принадлежности классу. В математической статистике действительной оси соответствует математическое ожидание индивидуальных оценок, а мнимой оси — их усредненный разброс (дисперсия). Мнимой оси можно сопоставить также доверительную вероятность в математической статистике, инструменталь-

ную и методическую погрешности в теории измерений.

Так же как и комплексное число сводится к действительному при исключении мнимой части, так и мягкая оценка сводится к жесткой при игнорировании ее разброса, например, при дефазификации нечеткой оценки. В пользу общности мягких измерений и вычислений в свете предложенной аналогии свидетельствует и тот факт, что среди собственных чисел неотрицательной невырожденной неприводимой матрицы только максимальное число оказывается действительным.

Подводя итог изложенному, можно утверждать, что определенность жестких измерений и вычислений является предельным случаем их мягкого варианта. При исключении неопределенности мы имеем дело с жесткими моделями.

6. Математическая/нематематическая модель. Нередко в литературе математической модели противопоставляется имитационная модель, что приравнивает ее к нематематическим моделям. Однако из практики известно, что при моделировании сложных объектов в состав имитационной модели нередко входят математические модели. Можно ли в таком случае противопоставлять эти модели? В принципе можно, если они не находятся в отношении вложения. Но для этого надо подыскать признак, на основе которого они могут противостоять друг другу. В качестве такого признака можно предложить направленность моделирования. Направленность процесса моделирования от математической модели к моделируемому объекту означает ее интерпретацию, а направленность от объекта к модели – подражание ему, т. е. имитацию. Однако направленность больше характеризует действия субъекта моделирования, чем создаваемую им модель. Следовательно, предложенный признак нецелесообразно использовать для деления моделей на математические и имитационные. Математическая модель, вложенная в имитационную модель, это ее часть.

К математическим моделям в широком смысле относятся и логические модели (дво-

ичные и бесконечнозначные, четкие и нечеткие), основанные на моделях математической логики, в отличие от формальной логики рассуждений. В узком смысле их принято выделять из математических моделей.

К более обоснованному антиподу математической модели относительно способа ее получения относится эвристическая (опытная) модель, создаваемая на основе интуитивных умозаключений (эвристик). Под эвристическими методами понимают логические приемы и методические правила научного исследования и изобретательского творчества, которые способны приводить к цели в условиях неполноты исходной информации и отсутствия четкой программы управления процессом решения задачи [14].

В узком смысле слова под эвристикой понимают интуитивные (строго не обоснованные) методы решения задач, такие как:

- сократовские беседы с учениками;
- эвристические методы проектирования;
- методы инженерного (изобретательского) творчества;
- эвристический алгоритм, представляющий совокупность приемов поиска сокращенного перебора при решении комбинаторных задач;
- выявление условий ЕСЛИ, ТО при проектировании базы знаний и экспертной системы в конкретной предметной области.

В отличие от математических моделей эвристические не обладают общезначимостью в пределах принятой теории, отличаясь своим конкретным применением.

7. Компьютерная/некомпьютерная модель. К наиболее существенным признакам, различающим эти модели, относится язык их представления. Для компьютерной модели — это машинно-ориентированный язык высокого уровня, воспринимаемый как человеком, так и машиной через специальную программу (компилятор). Антиподом такого языка является язык символов, принятый в математике и предназначенный для восприятия человеком. Таким образом, относительно языка представления компьютерной модели

противостоит математическая модель. Конечно, математические символы применяются и в языке высокого уровня, но встраиваемые в этот язык они не первичны.

Носитель модели, как признак, различающий компьютерную и некомпьютерную модели, не существенен, поскольку все носители, в конечном счете, материальны.

- 8. Концептуальная/неконцептуальная модель. Перевод видового отличия *conceptual* на русский язык неоднозначен. Это слово можно считать производным от слов и concept (понятие), и *conception* (замысел). Если учесть смысл обоих слов, под концептуальной следует понимать модель, реализующую некоторый замысел, выраженный на языке понятий, т.е. на естественном языке. Улучшению понимания замысла способствует представление взаимосвязи понятий в виде структуры. Антиподом естественному языку является язык, характеризующий конструктивную модель. Конструктивные модели конкретизируют концептуальную модель на различных этапах проектирования объекта.
- 9. Имитационная/неимитационная модель. Имитация (латин. imitatio) означает подражание настоящему. Оно и может служить отличительным признаком имитационной модели, означая, что привлекаемые для ее создания средства (формулы или алгоритмы) вторичны. Они применяются для воспроизведения и исследования свойств изучаемого объекта. Антипод имитационной модели аналитическая модель, отражающая известную закономерность. Условием применения аналитической модели для моделирования свойств объекта является обладание объектом закономерности, отражаемой этой моделью.
- 10. Статическая/нестатическая модель. Статическая модель не показывает изменение свойств объекта во времени. В этом смысле ей противоположна динамическая модель.
- 11. Вычислительная/невычислительная модель. Из названия слова вычислительная следует оперирование с числами. Противоположностью вычислительной модели служит

- лингвистическая (естественно-языковая) модель, обрабатываемая прежде всего средствами логического анализа.
- 12. Численная/нечисленная модель. Иногда численную модель называют расчетной. Она применяется для вычисления количественных оценок. Ей логично противопоставить символьную (знаковую) модель. Численная и символьная модели более узки по смыслу по отношению к вычислительной и лингвистической моделям, поскольку нацелены на конкретный результат получение только количественной оценки, либо использование для обработки символов.
- 13. Физическая/нефизическая модель. Согласно известной триаде «вещество, энергия, информация» физической модели логично противопоставить информационную модель. Физическая модель воспроизводит внутреннее или внешнее строение объекта и предназначена для натурных испытаний. Информационные модели применяются для умозрительного или компьютерного исследования свойств объектов.
- 14. Научная/ненаучная модель. Научные модели удовлетворяют познавательные потребности человека в понимании окружающего его мира и создании искусственного мира. Относительно потребностей человека в восприятии мира научным моделям логично противопоставить художественные, удовлетворяющие эстетическим потребностям человека. Картина художника, скульптура, кинофильм, театральная постановка воздействуют на эмоциональную сферу человека. Промежуточное положение занимают прикладные модели, удовлетворяющие информационные потребности человека. В книге рассмотрению на предмет оценивания качества подлежат научные и прикладные модели.

При противопоставлении разделов математики модели именуются по используемому в них математическому аппарату: аналитические (в смысле использования теории функционального анализа), статистические, теоретико-множественные, логические, графические (модели теории графов).

#### Заключение

Преимуществом второго подхода к классификации моделей является детальное рассмотрение наиболее существенных свойств, принимаемых за базисные свойства модели. Это позволяет более полноценно охарактеризовать модель по сравнению с группированием моделей на основании обладания некоторым общим свойством. Свойства, в наибольшей степени присущие рассматриваемой модели, и участвуют в ее наименовании. При этом список свойств моделей открыт. Помимо перечисленных наиболее общих свойств моделей для их именования могут привлекаться частные свойства моделируемого объекта. Например, модель, отражающая способность объекта к предвидению, названа проактивной [15].

Отметим различную степень общности перечисленных свойств. Наибольшей общностью обладает класс информационных моделей. Он включает все виды моделей кроме физических. Такие модели, как математическая, имитационная, концептуальная, лингвистическая и пр., в широком смысле резонно отнести к классу информационных в противовес моделям физическим. В узком смысле под информационной моделью понимают, в частности, модель некоторого сообщения.

Из рассмотренных общих свойств физической модели присущи только такие свойства как имитация, статика, динамика, жесткость и мягкость (в смысле внешнего или внутреннего строения).

Обязательным свойством компьютерной модели является ее формализованный вариант, пригодный для восприятия компьютером. При наличии этого свойства любая из моделей информационного типа может быть компьютерной. Так, при существующих средствах автоматизации проектирования в компьютерную форму преобразуются концептуальная, конструктивная, аналитическая, имитационная и другие виды информационных моделей.

Помимо отношений «общее—частное» модели могут находиться между собой в отношениях «целое—часть» и «причина—следствие». Примером служат функциональная (Ф-модель) и структурная (С-модель) как части структурно-функциональной (СФ-модели) [16]. В свою очередь, СФ-модель может иметь аналитическую и компьютерную реализацию. Аналитико-имитационная модель является «целым» по отношению к своим составляющим (частям). Другой пример собирательной модели — логико-лингвистическая модель, востребованная для анализа текстов. В отношении «причина—следствие» в технологическом процессе их создания находятся, например, и концептуальная, и конструктивная модели.

Таким образом, выделение свойств, которыми могут обладать модели, позволяет соединять их в разных отношениях, порождая модели с комплексными свойствами.

#### Библиографический список

- 1. Теория систем и системный анализ в управлении организациями : справочник / под ред. В. Н. Волковой, А. А. Емельянова. М. : Финансы и статистика, 2009.-845 с.
- 2. Волкова В. Н. Методы формализованного представления систем: учеб. пособие / В. Н. Волкова, А. А. Денисов, Ф. Е. Темников. СПб.: СПбГТУ, 1993.-107 с.
- 3. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ: (Наука и искусство решения проблем): учебник / Ф. П. Тарасенко. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. 186 с.
- 4. Микони С. В. Основы системного анализа : учеб. пособие / С. В. Микони, В. А. Ходаковский. СПб. : ПГУПС, 2011. 142 с.
- 5. Волкова В. Н. Классификация методов и моделей в системном анализе / В. Н. Волкова, В. Н. Козлов, В. Е. Магер, Л. В. Черненькая // Сб. докл. XX Междунар. конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2017). 24–26.05.2017. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2017. С. 223–226.
- 6. Месарович М. Общая теория систем : математические основы / М. Месарович, Я. Такахара ; пер. с англ. О. Л Напельбаума ; под ред. С. В. Емельянова М. : Мир, 1978.-311 с.

- 7. Zadeh L.A. Fuzzy Logic, Neural Networks and Soft Computing / L.A. Zadeh // Communications of the ACM.—March 1994. Vol. 37, N 3. P. 77–84.
- 8. Ансофф И. Новая корпоративная стратегия / И. Ансофф ; пер. с англ. СПб. : Ритер Ком, 2015.-408 с.
- 9. Арнольд В. И. «Жесткие» и «мягкие» математические модели / В. И. Арнольд. 2-е изд. М. : МЦНМО, 2008.-32 с.
- 10. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений: учеб. пособие / С. В. Микони. СПб.: Лань, 2015. 448 с.
- 11. Поллак Ю. Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах / Ю. Г. Поллак. М. : Сов. радио, 1971. 400 с.
- 12. Микони С.В. Роль и место жестких и мягких вычислений / С.В. Микони // Труды VII Всерос. науч.-практ. конференции «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии». Санкт-Петербург, 3–7.07.2017. СПб.: Политехника-сервис, 2017. С. 101–109.
- 13. Прокопчина С.В. Мягкие подходы к управлению сложными системами / С.В. Прокопчина //Труды XX Междунар. конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'–2017). 24–26.05.2017. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2017. С. 7–14.
- 14. Перельман Я. И. Занимательная алгебра / Я. И. Перельман. М. : Наука, 1975. 200 с.
- 15. Охтилев М. Ю. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы / М. Ю. Охтилев, Н. Г. Мустафин, В. Е. Миллер, Б. В. Соколов // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 11. С. 7—15.
- 16. Микони С. В. Формализованное описание общих свойств модели / С. В. Микони // Труды конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017. 18-20.10.2017 г. СПб. : BBM, 2017. Т. 1. С. 132-136.

#### References

1. Teoriya system i systemniy analyz v upravlenii organizatsiyamy: spravochnik [System theory and system analysis in corporate management: reference guide]. Ed. by V.N. Volkova, A.A. Yemilyanov. Moscow, Fynansy i statystyka [Finance and statistics] Publ., 2009, 845 p. (In Russian)

- 2. Volkova V. N., Denisov A.A. & Temnykov F.Y. *Metody formalyzovannogo predstavleniya system* [*Methods of formalized system representation*]. Saint Petersburg, SPbGTU Publ., 1993, 107 p. (In Russian)
- 3. Tarasenko F. P. *Prykladnoy systemniy analyz (Nauka i iskusstvo resheniya problem)* [Applied system analysis: (The ability to solve problems)]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2004, 186 p. (In Russian)
- 4. Mikony S. V. & Khodakovskiy V.A. *Osnovy systemnogo analyza* [*The fundamentals of system analysis*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, 142 p. (In Russian)
- 5. Volkova V. N., Kozlov V. N., Mager V. Y. & Chernenkaya L. V. Klassifikatsiya metodov i modeley v systemnom analyze [Classification of methods and models in system analysis]. Sbornyk dokladov XX Mezhdunarodnoy konferentsii po myagkym vychysleniyam i izmereniyam (SCM-2017) [Book of reports of the 20<sup>th</sup> International conference on soft computing and measurements (SCM-2017)]. Saint Petersburg, SPbETU (The First Electrotechnical University) Publ., 2017, pp. 223–226. (In Russian)
- 6. Mesarovic M. & Takahara Y. *Obshaya teoriya system: matematycheskiye osnovy* [*General systems theory: mathematical foundations*]. Tr. from English by O. L. Napelbaum; ed. by S. V. Yemylianov. Moscow, Mir Publ., 1978, 311 p. (In Russian)
- 7. Zadeh L.A. Fuzzy Logic. *Neural Networks and Soft Computing, Communications of the ACM,* 1994, vol. 37, no. 3, pp. 77–84.
- 8. Ansoff I. *Novaya korporatyvnaya strategiya* [*The new corporate strategy*]. Tr. from English. Saint Petersburg, Riter Com Publ., 2015, 408 p. (In Russian)
- 9. Arnold V.I. "Zhestkiye" i "myagkiye" matematy-cheskiye modely ["Rigid" and "soft" mathematical models]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, MCNMO (Moscow Center for Continuous Mathematical Education) Publ., 2008, 32 p. (In Russian)
- 10. Mikoni S. V. *Teoriya prinyatiya upravlen-cheskykh resheniy* [*The theory of management decision making*]. Saint Petersburg, Lanbook Publ., 2015, 448 p. (In Russian)
- 11. Pollyak Y. G. Veroyatnostnoye modelyrovaniye na elektronnykh vychyslytelnykh mashynakh [Probabilistic modeling on computing machines].

Moscow, Soviet radio Publ., 1971, 400 p. (In Russian)

- 12. Mikoni S. V. Rech i mesto zhestkyh i myagkykh vychysleniy [Place and role of rigid and soft computing]. *Trudy VII Vserossiyskoy nauchno-praktycheskoy konferentsii "Nechetkiye systemy, myagkiye vychysleniya i intellektualniye tekhnologii"* [*Proceedings of* 7<sup>th</sup> *All-Russian research and practical conference "Fuzzy systems, soft computing and intelligent technologies"*]. Saint Petersburg, Polytekhnika-servys Publ., 2017, pp. 101–109. (In Russian)
- 13. Prokopchyna S. V. Myagkiye podkhody k upravleniyu slozhnymy systemamy [Soft approaches to management of complex systems]. *XX Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkym vychysleniyam i izmereniyam* [The 20<sup>th</sup> International conference on soft computing and measurements (SCM' 2017)]. Saint Petersburg, SPbETU (The First Electrotechnical University) Publ., 2017, pp. 7–14. (In Russian)

- 14. Perelman Y.I. *Zanymatelnaya algebra* [*Recreational algebra*]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 200 p. (In Russian)
- 15. Okhtylev M. Y., Mustafin N. G., Miller V. Y. & Sokolov B. V. Kontseptsiya proaktyvnogo upravleniya slozhnymy obyektamy: teoretycheskiye i tekhnologycheskiye osnovy [The concept of complex objects proactive control: theoretical foundations and techniques]. *Izvestiya vuzov. Pryborostroyeniye* [*Proceedings of Higher Educational Institutions*]. *Instrument engineering*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 7–15. (In Russian)
- 16. Mikoni S. V. Formalyzovannoye opysaniye obshykh svoistv modely [Formalized description of basic model properties]. *Trudy konferenstii "Imitatsionnoye modelyrovaniye. Teoriya i praktika" IMMOD-2017* [*Proceedings of "Simulation modeling. Theory and practice" conference IMMOD (simulation modeling)-2017*]. Saint Petersburg, VVM Publ., 2017, vol. 1, pp. 132–136. (In Russian)

МИКОНИ Станислав Витальевич – доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета им. В.И. Ульянова (Ленина), smikoni@mail.ru; ДЕГТЯРЕВ Валентин Григорьевич – доктор техн. наук, профессор, vdegt@list.ru; ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, hva1104@mail.ru; КУДАРОВ Руслан Серикович – канд. техн. наук, доцент, r. s.kudarov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.131.222-027.45:625.122

#### Г.М. Стоянович, Р.Г. Шипарев

# ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ С ПОМОЩЬЮ КРИОТРОПНОГО ГЕЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Дата поступления: 19.09.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

Цель: Изучение влияния водного раствора поливинилового спирта на прочностные характеристики глинистых грунтов. Для получения положительного результата были поставлены следующие задачи: предложить состав для закрепления грунтов, разработать методику испытаний грунтов в геотехнической лаборатории, максимально приближенной к испытаниям грунтов природного сложения, а также изучить влияние введенных в раствор добавок на конечную прочность грунтового массива. Методы: лабораторные исследования грунта по определению прочностных характеристик проводились по консолидировано-дренированной методике одноплоскостного среза при одинаковых прочих условиях в геотехнической лаборатории ДВГУПС на установке АСИС. Результаты: Получены прочностные характеристики неукрепленных и укрепленных грунтов. Эффект от закрепления грунтов водным раствором поливинилового спирта достигается за счет уникальных свойств раствора, который при инъектировании в грунтовый массив связывает грунт, а после цикла замораживания-оттаивания превращается в неподверженный влиянию воды криогель, который связывает грунт в единую эластичную систему. Варьируя концентрацией конечного раствора, методикой испытаний, а также введением добавок в раствор, удалось увеличить сцепление грунта от 4,3 до 11,6 раза. Практическая значимость: Данный метод закрепления грунтов универсален. Его можно использовать на любых объектах транспортной инфраструктуры как для закрепления грунтов основания, так и для создания удерживающих грунтовых конструкций. Также он может хорошо зарекомендовать себя в районах вечномерзлых грунтов. Грунт, укрепленный криогелем, имеет коэффициент теплопроводности меньше на 10-15%, чем у неукрепленного, что положительно скажется на надежности всего объекта.

**Ключевые слова:** Прочность грунта, криогель, удельное сцепление грунта, угол внутреннего трения, поливиниловый спирт.

**Gennady M. Stoyanovich,** D. Sci. Eng., professor; \*Ruslan G. Shiparev, postgraduate student, RusGenn@outlook.com (Far Eastern State Transport University, Khabarovsk) SOIL STABILIZATION BY USE OF CRYOTROPIC GELATION IN ROADBUILDING

#### **Summary**

**Objective:** To study the influence of polyvinyl alcohol aqueous solution on clay-pan soil strength properties. In order to achieve a positive result the following tasks were set: to suggest the formulation for soil densification, to develop a soil testing procedure in a geotechnical laboratory, brought most closely to natural soil testing, and to study the influence of additives injected in the solution on the ultimate strength of soil mass. **Methods:** Laboratory tests to determine the strength characteristics of the soil were carried out on the basis of a consolidated-drained single-plane cut method, other factors being equal, in FESTU geotechnical laboratory at ASIS installation. **Results:** Strength characteristics of natural and improved soil were obtained. The effect from soil densification with polyvinyl alcohol aqueous solution is achieved by means of the unique properties of the solution, which, when injected into the soil mass, binds the soil, and after the freeze-defrost cycle turns into water-resistant cryogel, which binds the soil into a unified elastic

system. It was possible to increase soil adhesion from 4,3 to 11,6 times by varying the concentration of the final solution, test procedure, as well as introducing additives to the solution. **Practical importance:** The method of fixing soils in question is universal. It can be used on any objects of transport infrastructure, it can be used on any objects of transport infrastructure, both for fixing the supporting subsoil of roadbed, and for creating retaining soil structures. Moreover, the method may prove effective in areas of permafrost soils. Ground, reinforced with cryogel, has a coefficient of thermal conductivity of less than 10–15% than that of unfortified, which will positively affect the reliability of the entire facility.

**Keywords:** Soil strength, cryogel, stabilization, specific cohesion, angle of internal friction, polyvinyl alcohol.

#### Введение

Криогели на основе полимерных систем — макропористые гетерофазные студни, образующиеся в результате замораживания, выдерживания в замороженном состоянии и последующего оттаивания исходных растворов. При этом обязательным условием формирования гетерогенных гелей является кристаллизация (замерзание) основной массы растворителя. После ее размораживания получаются анизотропные макропористые гелеобразные полимерные продукты, называемые криогелями или криоструктуратами [1–3].

Криогели на основе поливинилового спирта (ПВС) представляют большой интерес как в научном плане, так и в прикладном. Они широко применяются в биотехнологии, медицине, пищевой промышленности, а теперь и в дорожном строительстве. Во многом этот интерес обусловлен превосходными механическими, диффузионными и теплофизическими свойствами криогелей ПВС, доступностью самого полимера, его нетоксичностью и биосовместимостью, а также относительной несложностью методики формирования геля (раствор ПВС просто замораживают в течение некоторого времени, а затем оттаивают). Варьируя состав растворителя, природу добавок (если таковые вводятся) и режим криогенной обработки (температуру и продолжительность замораживания, скорость оттаивания, число циклов замораживания и др.), можно в широких пределах регулировать физикомеханические показатели конечных гелей, их макро- и микроструктуру [4–6].

За последние 10 лет использование водных растворов ПВС в строительстве очень сильно расширилось. Вначале криогель служил для закрепления верхних слоев почвы от ветровой и водной эрозии [7, 8]. Также он применялся для тампонации нефтяных скважин и защиты гидросооружений [9, 10]. За это время был накоплен большой опыт, разработаны различные составы с разными добавками. Предложены следующие основные варианты составов:

- 1. Криогель с цементом и борной кислотой данный состав применяется для создания гидроизоляционного экрана. В раствор ПВС добавляют необходимое количество цемента и борной кислоты, далее его инъектируют в массив грунта. ПВС при взаимодействии с борной кислотой образует нерастворимый в воде осадок, связывающий частицы грунта между собой в единый массив. С течением времени цемент становится прочнее и превращает грунт в прочный, водонепроницаемый единый массив грунта [11–13].
- 2. Разработан состав для создания водонепроницаемости низкотемпературных грунтов и пород [14]. В нем также используется борная кислота. В зависимости от количества добавленной борной кислоты в раствор модуль упругости увеличивается от 2,2 до 9,6 раз [14].

Повышение прочностных характеристик грунтов земляного полотна объектов транспортной инфраструктуры криотропным гелеобразованием – достаточно перспективный способ из-за того, что можно варьировать в широких диапазонах свойства конечного

криогеля, а следовательно, и свойства закрепленных грунтов, прочность и устойчивость грунтовых сооружений и оснований.

# Лабораторные исследования прочностных характеристик грунтов

Изучение способов повышения прочностных характеристик отобранного грунта имеет большую практическую значимость для строительства новых и эксплуатации существующих железнодорожных и автомобильных дорог, аэродромов и других объектов транспортной инфраструктуры в сложных инженерных условиях.

В ДВГУПС авторами были проведены лабораторные испытания суглинистого и супесчаного грунтов, которые были отобраны из карьеров строительства новых подъездных путей на ст. Хабаровск 2 и жилого дома в г. Хабаровск по улице Трехгорная.

Вся сложность лабораторных испытаний сводилась к обеспечению необходимого количества грунтового материала, одинакового по своим свойствам и характеристикам. Для этого было заготовлено большое количество грунтовой смеси.

Первоначальные характеристики супесчаного грунта: супесь с числом пластичности,  $I_{\rm p}=6$ , плотность грунта — 2,05 г/см³; плотность частиц грунта — 2,67 г/см³, влажность природная — 17 %; суглинистого грунта: суглинок с числом пластичности,  $I_{\rm p}=12$ ,9, плотность грунта — 2,05 г/см³, плотность частиц грунта — 2,69 г/см³; влажность природная — 26 %.

Лабораторные испытания грунта по определению прочностных характеристик проводились по консолидировано-дренированной методике одноплоскостного среза при одинаковых прочих условиях в геотехнической лаборатории ДВГУПС на установке АСИС. Принцип повышения прочности грунта заключался во введении водного раствора ПВС необходимой концентрации в грунт, его тщательном перемешивании и формировании в однородный

массив требуемой плотности. Далее из этого массива вырезались образцы для испытаний на срез. Все образцы разделялись на группы. Первая группа не подвергалась предварительному уплотнению (супесь). А вторая группа (суглинок) в срезовых кольцах подвергалась предварительному уплотнению до полной консолидации. После этого осуществлялся цикл замораживания оттаивания грунта по авторской методике. На следующем этапе проводилось повторное (для второй группы) и первичное (для первой группы) уплотнение до полной консолидации грунта. И только после этого образцы отправлялись на срез. Для определения параметров прочности производились четыре испытания однородного грунта под разной нормальной нагрузкой: 100, 150, 200, 300 и 400 кПа.

При этом решались задачи по оценке влияния количества и концентрации введенного раствора ПВС на прочность грунта. Также необходимо было изучить влияние добавок, а именно борной кислоты. Поэтому были проведены следующие серии испытаний грунта:

- Супесь:
  - без упрочнения;
  - с упрочнением:
  - ◆ концентрация раствора: 5 и 10 % ПВС;
  - ◆ влажность грунта W: 17, 18 и 20%
     при концентрации раствора 5 и 10%;
  - испытание до замораживания и после.
- Суглинок:
  - без упрочнения;
  - с упрочнением:
  - концентрация раствора: 5 и 10 % ПВС, при концентрации борной кислоты 1 % борной кислоты;
    - ◆ влажность грунта W: 23–27 %;
  - ◆ только после цикла замораживанияоттаивания.

Формирование криогеля происходит во время цикла замораживания-оттаивания водного раствора ПВС. Введенный в грунт раствор взаимодействует с частицами грунта и связывает их между собой, создаются допол-

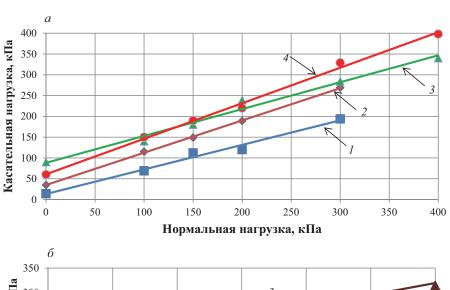
нительные силы сцепления, даже без заморозки, из-за особых свойств раствора. После замораживания и оттаивания образуются более прочные, криотропные, связи. Криогель связывает грунт в единую эластичную систему. Прочность грунта в разы увеличивается даже без замораживания (рис. 1).

Анализ прочностных характеристик грунта неукрепленного и укрепленного водными растворами ПВС, рис. 1, a дает следующие результаты:

- 1 грунт без укрепления: W = 17%, c = 14 кПа,  $\phi = 30^{\circ}$ ;
- 2 грунт, укрепленный 10 % ПВС, без заморозки: W = 18 %, c = 35 кПа,  $\phi = 38$ °;

- 3 грунт, укрепленный 10 % ПВС, после заморозки: W = 20 %, c = 90 кПа,  $\varphi = 33$ °;
- 4 грунт, укрепленный 5 % ПВС, после заморозки: W = 18 %, c = 60 кПа,  $\varphi = 41$ °.

Зависимости I и 2 (рис. 1,  $\delta$ ) — это грунты, неукрепленные, имеют c=15 кПа и  $\phi=17^\circ$  и c=35 кПа и  $\phi=14^\circ$  соответственно. Зависимость 3 — грунт, укрепленный 10%-ным раствором ПВС, имеет c=175 кПа и  $\phi=26^\circ$ . За счет изменения методики испытания получилось увеличить прочность в 11,6 раза. Зависимость 4 — суглинок, укрепленный 5%-ным раствором ПВС, имеет c=132 кПа и  $\phi=17^\circ$ , что в 8,8 раз больше, чем сцепление у неукрепленного грунта. Использование бор-



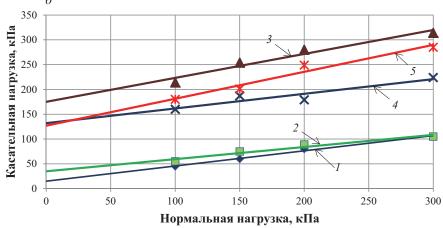


Рис. 1. Прочностные характеристики грунта, неукрепленного и укрепленного водными растворами ПВС:

a — супесчаного грунта: I — неукрепленный грунт, W = 17%; 2 — ПВС 10%, W = 18%, до замораживания; 3 — ПВС 10%, W = 20%, после замораживания; 4 — ПВС 5%, W = 18%, после замораживания; 6 — суглинистого грунта: I, 2 — без добавок ПВС, 3 — с добавкой ПВС в объеме 10%, 4 — с добавкой ПВС в объеме 5%, 5 — с добавкой ПВС в объеме 5% и 1%-ной борной кислоты

ной кислоты в качестве добавки в растворе, грунт 5, не дало видимых результатов. У данного образца c=127 кПа и  $\phi=29^\circ$ , не сильно отличается от грунта, укрепленного только водным раствором ПВС.

Но на графике сдвига во время испытания отчетливо видно влияние борной кислоты (рис. 2,  $\delta$ ). На рис. 2, a грунт неукрепленный (1), имеет большие ступени стабилизации – это говорит о небольших силах сцепления

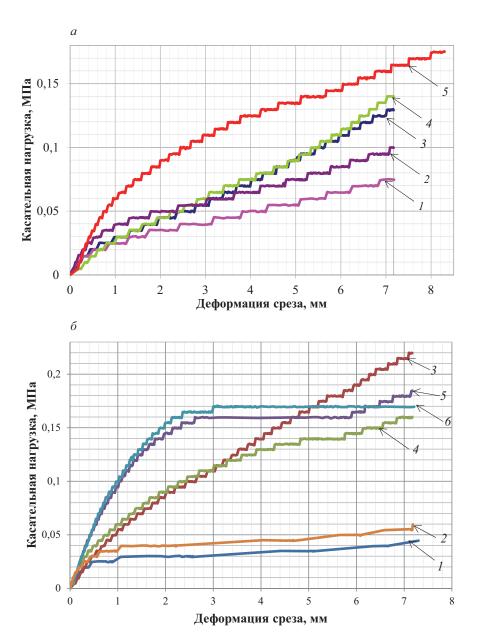


Рис. 2. Деформации среза образцов грунта во время сдвиговых испытаний при нормальной нагрузке 100 кПа:

a — супесчаного грунта: I — неукрепленный грунт; 2 — ПВС 5%, W = 18%, после заморозки; 3 — ПВС 10%, W = 18%, до заморозки; 4 — ПВС 10%, после заморозки; 5 — ПВС 5% + NaHCO $_3$  2%, W = 18%, после заморозки;  $\delta$  — суглинистого грунта: I, I — неукрепленный грунт; I — грунт, укрепленный 10%-ным раствором ПВС, I — грунт, укрепленный 5%-ным раствором ПВС с добавлением 1%-ной борной кислоты; I — грунт, укрепленный 5%-ным раствором ПВС с добавлением 1%-ной борной кислоты, после 5 циклов замораживания—оттаивания

 $(c = 14 \text{ к}\Pi a)$ . При введении раствора молекулы ПВС связывают частицы грунта из-за своих «клейких свойств» даже при небольшом количестве раствора и маленькой концентрации (5%, 2), о дополнительных внутренних силах говорит вид графика. На начальном этапе (до сдвига в 1 мм) график идет более интенсивно, ступени стабилизации меньше и касательная нагрузка, необходимая для деформации среза до 7,17 мм, в 1,33 раза больше по сравнению с неукрепленным грунтом. При введении более концентрированного раствора ПВС (10%) без замораживания кривая (3) касательная нагрузка в 1,73 раза больше, а после замораживания – кривая (4) в 1,86 раза больше по сравнению с неукрепленным грунтом. Как оказалось, это не предел, при добавлении в 5%-ный раствор ПВС всего 2% обычной пищевой соды (NaHCO<sub>3</sub>), кривая (5), касательное напряжение, необходимое для сдвига в 7,17 мм, в 2,2 раза больше и равна 165 кПа, против 75 кПа у неукрепленного грунта. Даже при 165 кПа площадки стабилизации меньше, чем у неукрепленного грунта. Дальнейшая деформация среза ограничена конструктивными особенностями срезового прибора.

Анализ рис. 2, б показывает влияние введенного в грунт раствора. Кривые 1 и 2 иллюстрируют грунты неукрепленные, довольно слабые, по сравнению с укрепленными образцами. При сдвиге грунта 1 видно, что образец сопротивляется только на первом этапе, до сдвига величиной в 1 мм. Далее грунт потерял устойчивость и показал увеличение деформаций без роста нагрузки. Он находился в мягкопластичном состоянии. Несмотря на то, что второй грунт — тугопластичный, картина сдвига повторилась.

Образец 3, укрепленный 10%-ным раствором ПВС, повторяет картину по предыдущим испытаниям [15]. Связи достаточно прочные и эластичные, для того чтобы сохранять свои свойства до полной нагрузки  $\tau = 0.23$  МПа, что в 5,1 раза больше по сравнению с неукрепленным грунтом ( $\tau = 0.045$  МПа).

Образец 4, укрепленный 5%-ным раствором ПВС, также показал высокие прочност-

ные результаты. При концентрациях 5 и 10% ПВС получено положительное влияние на прочностные характеристики грунта. Далее было изучено влияние добавок на прочностные свойства грунта.

Образцы 5 и 6 были укреплены 5%-ным раствором с добавлением 1%-ной борной кислоты. Последний образец выдержал 5 циклов замораживания-оттаивания. На первом этапе нагружения до τ ≤ 0,16 МПа деформация среза достигла 2,5 мм более интенсивно по сравнению с предыдущими испытаниями образцов грунта. При достижении сдвига в 2,5 мм произошел разрыв внутренних связей, об этом говорит большая площадка стабилизации на графике. В отличие от неукрепленного грунта стабилизация на данном этапе шла 4 ч, а время всего испытания – 1,5 ч. Можно было изменить картину последнего испытания, добавив в грунт большее количество раствора, но тогда бы потерялась объективность сравнения результатов.

#### Заключение

Таким образом, в ходе лабораторных испытаний были изучены прочностные свойства супесчаного и суглинистого грунтов, укрепленного водными растворами ПВС концентрациями 5 и 10%, а также с добавлением борной кислоты.

На данном этапе получилось увеличить сцепление грунта в 4,3–11,6 раз в зависимости от методики испытаний, концентрации исходного раствора, а также введенных в раствор добавок. При закреплении глинистых грунтов другими способами возрастает либо удельное сцепление, либо угол внутреннего трения, но в рассматриваемом случае увеличивается и удельное сцепление, и угол φ. Это говорит о новом характере взаимодействия частиц грунта с вводимым раствором, который только предстоит изучить и дать научное объяснение.

Применение криотропного гелеобразования для закрепления грунтов еще слабо ис-

следовано, но лабораторные испытания показали перспективы использования криогеля в транспортном строительстве.

Далее необходимо разработать расчетную модель для определения параметров устойчивости земляного полотна объектов транспортной инфраструктуры, а также масштабную модель для натурных испытаний.

#### Библиографический список

- 1. Лозинский В. И. Криогели на основе природных и синтетических полимеров. Получение, свойства и применение / В. И. Лозинский: дис. ... докт. хим. наук. М.: ИНЭОС РАН, 1994. 682 с.
- 2. Вайнерман Е.С. Криогели природных и синтетических полимеров. Получение и свойства / Е.С. Вайнерман, В.И. Лозинский, И.А. Стояченко, С.В. Рогожин // Межвуз. науч. сб. «Процессы студнеобразования в полимерных системах». Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1985. Ч. 2. С. 20.
- 3. Lozinsky V.I. On the possibility of mechanodestruction of poly (vinyl alcohol) molecules under moderate freezing of its concentrated water solutions / V.I. Lozinsky, E.S. Vainennan, S.V. Rogozhin // The 31st IVPAC Symposium on Macromolecules "MACRO' 87" abstracts of Reports. Merseburg, 1987. Vol. 4. P. 171.
- 4. Лозинский В.И. Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта / В.И. Лозинский // Успехи химии. 1998. С. 573—586.
- 5. Лозинский В.И. Некоторые термомеханические свойства криогелей поливинилового спирта / В.И. Лозинский, Л.В. Домотенко, Е.С. Вайнерман, С.В. Рогожин // Высокомолекулярные соединения. 1985. Т. 31 A(9). С. 1805—1809.
- 6. Рогожин С. В. Нековалентное криоструктурирование в полимерных системах / С. В. Рогожин, В. И. Лозинский, Е. С. Вайнерман, Л. В. Домотенко, А. М. Мамцис, С. А. Иванова, М. И. Штильман, В. В. Коршак // Докл. АН СССР.— 1984.— Т. 278.— С. 129—131.
- 7. Елисеев А. В. Метод зашиты дисперсных грунтов от эрозии / А. В. Елисеев, В. Г. Чеверев // Криосфера земли. -2008. Т. 8, № 3. С. 36–40.

- 8. Алтунина Л. К. Метод зашиты почв от эрозии с применением криогелей и многолетних растений / Л. К. Алтунина, М. С. Фуфаева, Д. А. Филатов, Л. И. Сваровская, Е. А. Жук, О. Г. Бендер // Вестн. ТГПУ. -2012.- Т.  $122, \ No \ 7.-$  С. 177-183.
- 9. Алтунина Л. К. Применение криогеля для стабилизации почв, подверженных дефляции / Л. К. Алтунина, М. С. Фуфаева, Д. А. Филатов, Л. И. Сваровская, Т. Ган-Эрдэнэ // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII, № 3. С. 83—88.
- 10. Алтунина Л. К. Полевые эксперименты по применению криогелей с целью защиты почв от водной и ветровой эрозии / Л.К. Алтунина, М.С. Фуфаева, Д.А. Филатов, Л. И. Сваровская, С. В. Мария, Е.А. Жук, О. Г. Бендер, Н.П. Сигачев, Н.А. Коновалова // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 2. С. 47—52.
- 11. Алтунина Л. К. Криогели для тампонажных работ в районах распространения.многолетнемерзлых пород / Л. К. Алтунина, В. А. Кувшинов, С. Н. Долгих // Гидротехника. 2010. № 3. С. 56–60.
- 12. Клочков Я. В Способ регулирования подземных вод в основании дорог / Я. В. Клочков, Н. П. Сигачев // Горн. информ.-аналит. бюл. (научтехнич. журнал). 2015. № 7 (спец. вып. 32). М. : Изд-во «Горная книга», 2015. 12 с.
- 13. Клочков Я. В Мероприятия по улучшению водно-теплового режима водоотводных сооружений / Я.В. Клочков, Е.В. Непомнящих // Вестн. Забайкальск. гос. ун-та. Чита, 2014. № 12 (115). С. 12–21.
- 14. Патент 2187888 С2 Российская Федерация. МПК Е02 В 3/16, Е02D 3/12. Состав для создания водонепроницаемости низкотемпературных грунтов и пород / Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов, Л.А. Стасьева, С.Н. Долгих, Г.А. Мельник; патентообладатель Акционерная компания ЗАО «АЛРОСА», Институт химии нефти СО РАН (ИХН СО РАН). науч.-исслед. ин-т связи.— 2004131313/03.— заявл. 25.10.2004; Бюл. опубл. 20.12.2006. 35.— 4 с.
- 15. Шипарев Р.Г. Криотропное гелеобразование, как способ повышения прочностных характеристик грунта / Р.Г. Шипарев, Г.М. Стоянович // Науч.технич. и соц.-эконом. развитие транспорта и промышленности стран АТР. 2016. С. 350—353.

#### References

- 1. Lozynskiy V.I. Kriogely na osnove pryrodnykh i syntetycheskykh polymerov. Polucheniye, svoistva i prymeneniye [Cryogel on the basis of natural and synthesized polymers. Manufacture, properties, application]. Diss... Doctor of chemistry. Moscow, INEOS RAN (A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences) Publ., 1994, 682 p. (In Russian)
- 2. Weinerman Y. S., Lozynskiy V. I., Stoyachenko I.A. & Rogozhyn S. V.. Kriogely pryrodnykh i syntetycheskykh polymerov. Polucheniye i svoistva [Cryogel of natural and synthesized polymers. Manufacture and properties]. *Mezhvuzovskiy nauchniy sbornyk* "Protsessy studneobrazovaniya v polymernykh systemakh" [Interuniversity scientific proceedings "Processes of gelation in polymeric systems"], 1985, pt 2, p. 20. (In Russian)
- 3. Lozinsky V.I., Vainennan E.S. & Rogozhin S.V. On the possibility of mechanodestruction of poly (vinyl alcohol) molecules under moderate freezing of its concentrated water solutions. *The 31st IVPAC Symposium on Macromolecules "MACRO'87" abstracts of Reports*. Merseburg, 1987, vol. 4, p. 171. (In Russian)
- 4. Lozinsky V. I. Kriotopnoye geleobrazovaniye rastvorov polyvinilovogo spyrta [Cryotropic gelling action of polyvinyl alcohol solutions]. *Uspekhy khymii* [*Progress of chemistry*], 1998, vol. 67, issue 7, pp. 573–586. (In Russian)
- 5. Lozinsky V.I., Domotenko L.V., Weinerman Y.S. & Rogozhyn S. V. Nekotoriye termomekhanicheskiye svoistva kriogeley polyvinilovogo spyrta [Some thermomechanical properties of polyvinyl alcohol cryogel]. *Vysokomolekulyarnoye soyedyneniye* [*High molecular weight compound*], 1985, vol. 31 A (9), pp. 1805–1809. (In Russian)
- 6. Rogozhyn S. V., Lozynskiy V. I., Weinerman Y. S., Domotenko L. V., Mamtsys A. M., Ivanova S. A., Shtylman M. I. & Korshak V. V. Nekovalentnoye kriostrukturyrovaniye v polymernykh systemakh [Noncovalent cryo structurization in polymeric systems]. *Doklady AN SSSR* [Reports of USSR Academy of Sciences], 1984, vol. 278, pp. 129–131. (In Russian)
- 7. Yeliseyev A. V. & Cheverev V. G. Metod zashyty dispersnykh gruntov ot erozii [Method of dispersive

- soil protection from erosion]. *Kryosfera zemly* [*The Earth's cryosphere*], 2008, vol. 8, no. 3, pp. 36–40. (In Russian)
- 8. Altunyna L. K., Fufayaeva M. S., Fylatov D. A., Svarovskaya L. I., Zhuk Y. A. & Bender O. G. Metod zashyty pochv ot erozii s prymeneniyem kriogelely i mnogoletnykh rasteniy [Method of soil protection from erosion with the application of cryogel and perennial plants]. *Vestnyk TGPU* [*Proceedings of Tomsk State Pedagogical University*], 2012, vol. 122, no. 7, pp. 177–183. (In Russian)
- 9. Altunyna L. K., Fufayaeva M. S., Fylatov D. A., Svarovskaya L. I. & T. Gan-Erdene Prymeneniye kryogelya dlya stabilizatsii pochv, podverzhennykh deflyatsii [Cryogel application for soil stabilization susceptible to wind erosion]. *Kryosfera zemly* [*The Earth's cryosphere*], 2013, vol. XVII, no. 3, pp. 83–88. (In Russian)
- 10. Altunyna L. K., Fufayaeva M. S., Fylatov D. A., Svarovskaya L. I., Mariya S. V., Zhuk Y. A.., Bender O. G., Sygachev N. P. & Konovalova N. A. Poleviye eksperymenty po prymeneniyu kryogeley s tselyu zashyty pochv ot vodnoy i vetrovoy erozii [Field experiments of cryogel application for soil protection from wind and water erosion]. *Problemy agrokhimii i ekologii* [*The problems of agricultural chemistry and ecology*], 2013, no. 2, pp. 47–52. (In Russian)
- 11. Altunyna L. K., Kuvshynov V. A. & Dolgykh S. N. Kryogely dlya tamponazhnykh rabot v rayonakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod [Cryogel applied for plugging operations in areas of continuous permafrost]. *Gydrotekhnika* [*Hydraulic engineering*], 2010, no. 3, pp. 56–60. (In Russian)
- 12. Klochkov Y. V. & Sygachev N. P. Sposob regulyrovaniya podzemnykh vod v osnovanii dorog [Control method of subgrade ground water]. *Gorniy informatsionno-analyticheskiy byulleten (nauchno-tekhnichaskiy zhurnal)* [Mining research and information bulletin (Scientific and technical journal)], 2015, no. 7 (special issue 32), 12 p. (In Russian)
- 13. Klochkov Y. V. & Nepomnyashykh Y. V. Meropriyatiya po uluchsheniyu vodno-teplovogo rezhyma vodootvodnykh sooruzheniy [Measures to improve water-thermal regime of drainage structures]. *Vestnyk Zabaikalskogo gosudarstvennogo univesyteta* [*Proceedings of Transbaikal State University*], 2014, no. 12 (115), pp. 12–21. (In Russian)

14. Altunyna L. K., Kuvshynov V. A., Stasiyeva L. A., Dolgykh S. N. & Melnyk G. A. *Patent 2187888 C2 Rossiyskaya Federatsiya. MPK E02B 3/16, E02D 3/12. Sostav dlya sozdaniya vodonepronytsayemosty nyzkotemperaturnykh gruntov i porod [Patent 2187888 C2 the Russian Federation. IPC E02 B 3/16, E02D 3/12. The solution for the generation of waterproofing quality of low-temperature soil and rock*]. Patentoobladatel Aktsionernaya kompaniya ZAO "AIROSA", Institut khymii nefty SO RAN (IKhN SO RAN). Nauchno-issledovatelskiy institute svyazy [Patent holder Stock company ZAO "ALROSA", Institute of petroleum chemistry SB RAS (Si-

berian Branch of the Russian Academy of Sciences) (IKnN SO RAS). Signals Research and Development Establishment], 2004131313/03, appl. 25.10.2004; Bul. publ. 20.12.2006. 35, 4 p. (In Russian)

15. Shyparev R. G. & Stoyanovich G. M. Kryotropnoye geleobrazovaniye, kaka sposob povysheniya prochnostnykh kharakteristyk grunta [Cryotropic gelling as the method for improvement of soil strength properties]. Nauchno-tekhnicheskoye i sotsialno-ekonomicheskoye razvitiye transporta i promyshlennosty stran ATR [Scientific-technical and social and economic development of transport and industry of APR countries], 2016, pp. 350–353. (In Russian)

СТОЯНОВИЧ Геннадий Михайлович – доктор техн. наук, профессор; \*ШИПАРЕВ Руслан Геннадьевич – аспирант, RusGenn@outlook.com (Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск).

УДК 628.214:628.292

#### Н.В. Твардовская

# ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УДАРОВ В НАПОРНЫХ СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАСИТЕЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Дата поступления: 04.09.2017 Решение о публикации: 15.11.2017

#### Аннотация

**Цель:** Предложить эффективный и доступный способ предотвращения негативных последствий гидравлических ударов для напорных трубопроводов систем водоотведения. **Методы:** Аналитическим путем представлены основные количественные соотношения при подборе гасителей гидравлического удара для загрязненных жидкостей. **Результаты:** Описаны конструкция и принцип действия гасителя гидравлических ударов, адаптированного для работы в условиях транспортировки загрязненных жидкостей. Разработана схема установки устройства на напорной линии. Даны основы расчета рекомендуемого защитного устройства. Приведены расчеты экономической эффективности использования гасителя гидравлических ударов дифференциального действия. **Практическая значимость:** Использование гасителей дифференциального действия в напорных системах водоотведения, транспортирующих неочищенные сточные воды, позволяет организовать надежную защиту таких напорных трубопроводов от последствий гидравлических ударов, в том числе исключить угрозу возникновения экологической опасности. Экономические расчеты показывают, что затраты, связанные с применением рассмотренного устройства, несоизмеримо меньше, чем средства, необходимые на восстановление работы трубопроводной магистрали и возмещение ущерба от загрязнения окружающей среды при авариях.

**Ключевые слова:** Системы водоотведения, напорные трубопроводы, сточные воды, гидравлический удар, противоударная защита, гаситель дифференциального действия.

Nadezhda V. Tvardovskaya, Cand. Sci. Eng., associate professor, tvardov\_nv@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University). PREVENTION OF CONSEQUENCES OF HYDRAULIC SHOCK IN PRESSURIZED WATER DISPOSAL SYSTEMS USING DIFFERENTIAL-ACTING SHOCK ABSORBER

#### Summary

**Objective:** To introduce an effective and available method of preventing the negative effects of hydraulic shock for sewerage pressure lines. **Methods:** To present the basic quantitative relations when selecting hydraulic shock absorbers for contaminated liquids by means of analytical determination. **Results:** Configuration and operating principle of a hydraulic shock absorber, designed to operate in conditions of carrying contaminated liquids, was described. The diagram of device installation at pressure line was developed. Calculating basis for a recommended protection device was given. Cost-effectiveness computations of using a differential-acting hydraulic shock absorber were stated. **Practical importance:** The use of differential-acting hydraulic shock absorbers in sewerage systems, which carry crude waste water, allows for organization of reliable protection of such pressure lines from the consequences of hydraulic shock, as well as eliminating the threat of environmental hazard. Economic calculations show that the costs connected with application of the device in question are far less than the funds necessary for pipeline rehabilitation and compensation of damage from environmental contamination in case of pipe breakage.

**Keywords:** Water disposal systems, power conduits, effluent water, hydraulic shock, shock protection, differential-acting shock absorber.

#### Введение

Одним из наиболее опасных видов нестационарного движения жидкости в напорных трубопроводных системах различного назначения являются резкие изменения давления в трубопроводе — гидравлические удары, которые могут приводить к аварийным ситуациям, сопровождающимся повреждением трубопроводов, насосных агрегатов, арматуры [1–5]. Для напорных трубопроводных систем водоотведения к дополнительным негативным последствиям таких аварий относится выход перекачиваемой сточной жидкости в окружающую среду [4, 6, 7], что экологически опасно.

Обзор литературных источников показывает, что в настоящее время исследования по защите от резких повышений давления в трубопроводах, перекачивающих сточные воды, практически отсутствуют. Некоторые из них посвящены изучению работы напорных трубопроводов, транспортирующих уже очищенные сточные воды [8]. В то же время именно наличие загрязнений в сточных водах, транспортируемых напорным способом, представляет при разработке противоударной защиты систем особую сложность.

В связи с этим разработка мероприятий по предотвращению негативных последствий гидравлических ударов актуальна для напорных систем водоотведения, в том числе с экологической точки зрения.

## Особенности противоударной защиты систем водоотведения

Для обеспечения надежной работы напорных трубопроводов водоотведения важно правильно подобрать и установить средства защиты от гидравлических ударов.

Согласно основному нормативному документу для систем наружной канализации СП 32.13330.2012 [9], как расчет, так и подбор противоударных мер и средств надлежит производить по СП 31.13330.2012 [10], посвященному проектированию и устройству наружных сетей и сооружений систем водоснабжения. Однако выбор средств защиты от гидравлических ударов для напорных трубопроводов водоотводящих систем представляет особую сложность. Стоки являются многокомпонентной и гетерогенной средой, поэтому многие противоударные устройства, хорошо срабатывающие на чистой воде или очищенных сточных водах, в условиях сточных вод без какой-либо очистки достаточно быстро засоряются и не выполняют своих функций.

Для защиты напорных трубопроводных систем от резких изменений давления в настоящее время существуют несколько принципиальных способов, таких как сброс части жидкости из трубопровода, ликвидация мест образования вакуума путем впуска воздуха или воды, увеличение продолжительности переходного процесса и уменьшение приведенного модуля упругости всей напорной системы [6, 11].

Наиболее эффективным из них для снижения давления при гидравлических ударах в системах водоотведения, как и для большинства других [1–3], можно рекомендовать при повышениях давления сброс части жидкости из напорного трубопровода. Однако при использовании такого варианта защиты для систем, перекачивающих сточные воды, наиболее предпочтительно использование устройств, которые не имеют быстро засоряемых элементов и при срабатывании которых не происходит выпуск сточных вод за пределы трубопроводной системы.

### Конструкция гасителя гидравлических ударов

Для гашения гидравлических ударов, начинающихся как с волны повышения, так и понижения давления, рекомендуется применять гаситель гидравлических ударов дифференциального действия для загрязненных жидкостей с разделителем сред [12].

Конструкция такого гасителя для загрязненных жидкостей представлена на рис. 1. Гаситель состоит из корпуса *I* со сливной линией *2*, который установлен на отводном патрубке *3* защищаемого трубопровода *4* через задвижку *5*. Такое устройство снижает давление путем сброса части транспортируемой жидкости из трубопровода *4* в сливную линию *2* с помощью сбросного клапана *6*, автоматически открывающегося при повышении давления в системе выше допустимого.

В стационарном режиме клапан 6 плотно прижимается по конической поверхности тарелки к седлу 7 за счет давления, передаваемого из трубопровода 4 через разделитель

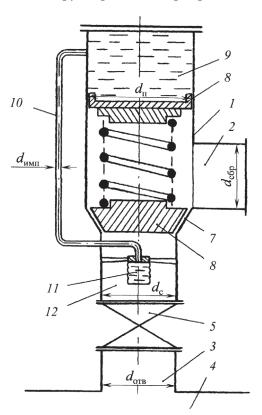


Рис. 1. Конструкция гасителя гидравлических ударов дифференциального действия для загрязненных жидкостей с разделителем сред: 1 — корпус гасителя; 2 — сливная линия; 3 — отводящий патрубок; 4 — защищаемый трубопровод; 5 — задвижка; 6 — сбросной клапан; 7 — седло сбросного клапана; 8 — подпружиненный поршень; 9 — полость в верхней части гасителя; 10 — импульсная трубка; 11 — разделитель сред; 12 — полость крепления разделителя сред

сред 11 по импульсной трубке 10 в полость 9 и действующего на поршень 8. Гидравлическая нагрузка, прижимающая клапан 6 к седлу 7, обусловливается тем, что его площадь меньше площади поршня 8.

При гидравлическом ударе давление в трубопроводе под клапаном резко возрастает. Одновременно происходит сжатие разделителя сред 11, укрепленного в полости 12 и выполненного в виде сильфонной оболочки. Давление передается в полость 9 с некоторым запаздыванием, обусловленным упругими свойствами сильфона 11. Вследствие этого давление на клапан 6 со стороны напорного трубопровода 4 на короткое время превышает давление, действующее на поршень 8 со стороны полости 9. Поэтому клапан 6 приподнимается, и часть жидкости из трубопровода 4 по отводному трубопроводу 3 через гаситель сбрасывается по сливной линии 2. В дальнейшем давление в полостях 9 и 12 выравнивается, в этот момент клапан б плавно опускается и сброс жидкости прекращается.

Повышение надежности гасителя в работе при перекачке неоднородных жидкостей достигается тем, что в его устройстве имеется разделитель сред 11 в виде сильфонной оболочки, который обеспечивает отсутствие возможности засорения импульсной трубки 10 загрязнениями, содержащимися в перекачиваемой жидкости, и одновременно является дросселирующим элементом.

Систему разделитель сред 11 — полость 9 рекомендуется заполнять однородной жидкостью, вязкость которой должна быть возможно меньшей и не изменяться при значительных колебаниях температуры окружающего воздуха. Таким требованиям, например, отвечают масла: АМГ, веретенное, трансформаторное.

Такой гаситель гидравлических ударов является гасителем дифференциального действия с гидравлической нагрузкой. Подобные устройства автоматически настраиваются на любое давление в рабочем режиме и срабатывают только при значительной разности давлений, возникающих в системе. Главное

их достоинство заключается в эффективном гашении гидравлических ударов по сравнению со многими другими противоударными средствами [1].

### Схема установки гасителя дифференциального действия

При организации защиты от гидравлического удара насосного оборудования с помощью рекомендуемого гасителя отвод жидкости при его срабатывании осуществляется по сливной линии прямо в приемный резервуар канализационной насосной станции (КНС) и выброса стоков за пределы системы водоотведения не происходит.

На рис. 2 представлена схема организации защиты с помощью гасителя гидравлических ударов дифференциального действия для напорного трубопровода на одной из канализационных насосных станций Ленинград-

ской обл. Отвод жидкости при его срабатывании осуществляется по отводному трубопроводу 5 в приемный резервуар.

В случае необходимости установки такого гасителя в промежуточной точке по длине магистрали его подсоединяют к трубопроводу аналогичным способом в колодце, а сброс жидкости при срабатывании гасителя осуществляется по отводному трубопроводу в специальный мокрый колодец, размеры которого назначаются таким образом, чтобы не допустить излива сточной жидкости на поверхность земли.

## Основы расчета гасителя гидравлических ударов

Определение основных габаритов гасителя гидравлических ударов дифференциального действия с разделителем сред проводят в следующей последовательности.

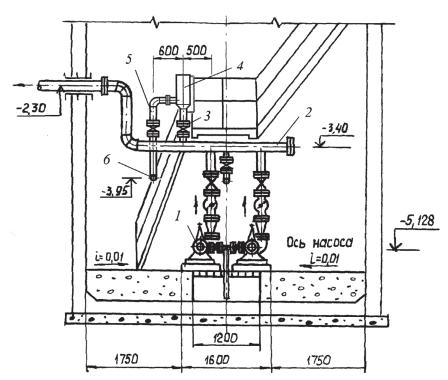


Рис. 2. Организация защиты от гидравлического удара с помощью гасителя гидравлических ударов с разделителем сред в помещении КНС:

1 — насос; 2 — напорный трубопровод; 3 — задвижка; 4 — гаситель гидравлических ударов с разделителем сред; 5 — отводной трубопровод; 6 — подача излишков жидкости в приемный резервуар

$$d_{\rm c} = 0.85 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{V_{\rm o} - \frac{g \cdot \Delta H_{\rm Jion}}{C}}{\mu_{\rm km} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\rm pc}}}},$$

где D — внутренний диаметр защищаемого трубопровода (м);  $V_{_{0}}$  – скорость движения жидкости в трубопроводе в стационарном режиме до возникновения гидравлического удара (M/C); g — ускорение свободного падения  $(m/c^2)$ ; C – скорость распространения волны гидравлического удара в перекачиваемых сточных водах (м/с); определяется с учетом загрязненности сточных вод [13];  $\Delta H_{\text{доп}}$  – допустимое превышение расчетного напора над рабочим (м); обычно принимают  $\Delta H_{\text{поп}} = (0,1 -0.2)H_{\rm p}$ ;  $H_{\rm p}$  – напор в системе до возникновения гидравлического удара (м);  $H_{\rm nc}$  – расчетный допустимый избыточный напор в трубопроводе (м), равный:  $H_{\rm pc}=H_{\rm p}+\Delta H_{\rm доп}=$  =  $(1,1-1,2)H_{\rm p}$ ;  $\mu_{\rm кл}-$ коэффициент расхода гасителя, зависящий от потерь напора в ответвлении гасителя и сбросного трубопровода.

Расход жидкости  $q_{\rm cбp}$  (м³/с), который необходимо сбросить через клапан для снижения давления в системе до величины  $H_{\rm pc}$ , составит

$$q_{\rm c6p} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left[ V_{\rm o} - \frac{g \cdot \Delta H_{\rm доп}}{C} \right].$$

Тогда объем жидкости  $W_{\rm cбp}$  (м³), сбрасываемой при срабатывании гасителя, находится как

$$W_{\rm cop} = q_{\rm cop} \cdot t_{\rm cop} \,,$$

где  $t_{\rm c6p}$  — время, в течение которого происходит сброс жидкости (c).

Расчет поршня. Диаметр поршня  $d_{_{\Pi}}$  (м) определяется, принимая напор, при котором клапан приподнимется и начнется сброс жид-

кости, равным расчетному допустимому избыточному напору в трубопроводе:

$$d_{\rm II} = d_{\rm c} \cdot \sqrt{\frac{H_{\rm pc}}{H_{\rm p}}} \approx (1,05-1,1) \cdot d_{\rm c}.$$

Расчет пружины и сильфона. Для смягчения ударов при подъеме и опускании сбросного клапана в конструкции гасителя применена винтовая цилиндрическая пружина сжатия. Для ее изготовления используют прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали по ГОСТ 14959–2016 [14]. Выбор материала пружинной проволоки принимается по ГОСТ 13764–86 [15], а подбор стандартной пружины проводится по методике ГОСТ 13765–86 [16]. Подбор сильфона осуществляется согласно положениям ГОСТ 21482–76 [17].

Остальные размеры гасителя принимаются по конструктивным соображениям. Диаметр ответвления, на котором установлен гаситель, и диаметр сбросного трубопровода принимают равными диаметру отверстия клапана в седле, т. е.  $d_{\text{отв}} = d_{\text{сбр}} = d_{\text{с}}$ . Диаметр импульсной трубки  $d_{\text{имп}} = 10{\text -}15\,$  мм. В качестве дополнительного дросселирующего элемента для большего замедления процесса передачи давления из трубопровода в верхнюю полость 9 в устройстве может быть использована диафрагма с отверстием, которая устанавливается внутри муфты в импульсной трубке 10. В этом случае, как показывают исследования [1], наиболее подходящей может быть диафрагма с диаметром отверстия  $d_{\text{пиаф}} = 1{,}0\,$  мм.

# Эффективность использования гасителя гидравлических ударов

В качестве примера был проведен расчет экономической эффективности использования гасителя гидравлических ударов для загрязненных жидкостей на напорном канализационном трубопроводе канализационной станции (рис. 2) по сравнению со стоимостью

устранения аварий при гидравлических ударах в течение года на рассматриваемой линии без средств противоударной защиты.

Расчеты показали, что затраты, связанные с предложенным устройством для защиты от резких повышений давления напорного трубопровода, несоизмеримо меньше, чем средства, необходимые на восстановление работы трубопроводной магистрали при авариях. В отличие от систем, транспортирующих чистую воду, проведение данных мероприятий по противоударной защите является и природоохранным мероприятием, предотвращенный годовой ущерб в данном случае составляет около 100 тыс. руб./год.

#### Заключение

Для гашения волн повышенного давления при гидравлических ударах в напорных системах водоотведения рекомендуется использовать гаситель гидравлических ударов дифференциального действия для загрязненных жидкостей с разделителем сред. По приведенным зависимостям можно рассчитать все основные элементы данного устройства.

Применение рекомендуемого средства противоударной защиты для напорных систем водоотведения способствует предупреждению случаев возникновения нестационарных процессов, а следовательно, и аварийных ситуаций, а также является составной частью комплекса природоохранных мероприятий. Затраты, связанные с внедрением устройства для защиты от резких повышений давления напорных водоотводящих систем, несоизмеримо меньше, чем средства, необходимые на восстановление работы трубопроводной магистрали и возмещение ущерба от загрязнения окружающей среды при авариях.

#### Библиографический список

1. Дикаревский В. С. Водоводы : монография / В. С. Дикаревский // Труды РААСН. Строительные науки. — 1997. - T. 3. - 200 c.

- 2. Махарадзе Л.И. Нестационарные процессы в напорных гидротранспортных системах и защита от гидравлических ударов / Л.И. Махарадзе, Г.И. Кирмелашвили. Тбилиси: Мецниереба, 1986. 152 с.
- 3. Ашиянц Э. П. Гидравлический удар в нагнетательных водоводах / Э. П. Ашиянц. Ереван : Лимуш, 2010.-210 с.
- 4. Храменков С. В. Опыт внедрения инновационной техники для предотвращения гидравлического удара / С. В. Храменков, К. Е. Хренов, М. Н. Козлов, Е. В. Шушкевич, М. В. Богомолов, О. А. Меньщикова // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10, ч. 1. С. 6—13.
- 5. Капинос О. Г. Противоударная защита напорных трубопроводов с применением обратных клапанов / О. Г. Капинос, Н. В. Твардовская // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. СПб. : ПГУПС, 2010. Вып. 1 (22). С. 93—104.
- 6. Твардовская Н. В. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 23.04.05 / Н. В. Твардовская. СПб. : СПбГАСУ, 2005. 24 с.
- 7. Примин О. Г. Методы повышения экологической безопасности трубопроводов канализационных сетей / О.Г. Примин, Е.И. Пупырев // Экология и промышленность России. 2013. № 3. С. 13–17.
- 8. Орлова С. С. Прогноз и повышение эксплуатационной надежности напорных трубопроводов оросительных систем, транспортирующих сточные воды: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / С. С. Орлова. Волгоград: ВГСА, 2008. 19 с.
- 9. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализир. ред. СНиП 2.04.03–85. М. : Минрегион России, 2012. 85 с.
- 10. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализир. ред. СНиП 2.04.02–84\* с изменением № 1. М. : Минстрой России, 2015. 125 с.
- 11. Примин О. Г. Обеспечение надежности и экологической безопасности напорных канализационных трубопроводов / О. Г. Примин // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 59–64.
- 12. Патент 41831. Россия, МКИ7 F16L55/045. Гаситель гидравлических ударов / В.С. Дикаревский,

- Н. В. Твардовская ; Петерб. гос. ун-т путей сообщения. № 2004120966/22. Заявл.14.07.2004 // Изобретения. Полезные модели. № 31 (10.11.2004).
- 13. Дикаревский В.С. Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения / В.С. Дикаревский, О.Г. Капинос, Н.В. Твардовская // Вестн. РААСН. 2004. Вып. 8. С. 152—156.
- 14. ГОСТ 14959–2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.
- 15. ГОСТ 13764–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Классификация (с Изменением № 1). М.: Стандартинформ, 2007.
- 16. ГОСТ 13765–86. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Обозначение параметров, методика определения размеров (с Изменением № 1) М. : ИПК Изд-во стандартов, 1999.
- 17. ГОСТ 21482—76. Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4). М. : ИПК Изд-во стандартов, 1988.

#### References

- 1. Dikarevskiy V.S. Vodovody [Water conduits]. Trudy RAASN. Stroitelniye nauky [Proceedings of RAASN (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences). Construction sciences], 1997, vol. 3, 200 p. (In Russian)
- 2. Makharadze L. I. & Kirmelashvili G. I. *Nestat-sionarniye protsessy v napornykh gydrotransportnykh systemakh i zashyta ot gydravlycheskykh udarov* [*Nonsteady processes in pressure hydrotransport systems and hydraulic shock protection*]. Tbilisi, Metsniyereba Publ., 1986, 152 p. (In Russian)
- 3. Ashiyants E. P. *Gydravlycheskiy udar v nagnetatelnykh vodovodakh* [*Hydraulic shock in delivery lines*]. Yerevan, Limush Publ., 2010, 210 p. (In Russian)
- 4. Khramenkov S. V., Khrenov K. Y., Kozlov M. N., Shushkevich Y. V., Bogomolov M. V. & Menshykova O.A. Opyt vnedreniya innovatsionnoy tekhniky dlya predotvrasheniya gydravlycheskogo udara [Experimen-

- tal integration of innovations for the prevention of hydraulic shock]. *Vodosnabzheniye i sanytarnaya tekhnika* [*Water supply and sanitary engineering*], 2010, no. 10, vol. 1, pp. 6–13. (In Russian)
- 5. Kapynos O. G. & Tvardovskaya N. V. Protyvoudarnaya zashyta napornykh truboprovodov s prymeneniyem obratnykh klapanov [Pressure conduit shock protection using pressure-relief valves]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, issue 1 (22), pp. 93–104. (In Russian)
- 6. Tvardovskaya N. V. *Gydravlycheskiy udar v na*pornykh truboprovodakh vodootvedeniya [Hydraulic shock in sewerage pressure lines]: abstr. diss... Cand. Eng: 23.04.05. Saint Petersburg, SPbGASU (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) Publ., 2005, 24 p. (In Russian)
- 7. Prymyn O. G. & Puparev Y. I. Metody povysheniya ekologycheskoy bezopasnosty truboprovodov kanalyzatsionnykh setey [Methods for improving environmental safety of sewerage net pipelines]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [*Ecology and industry of Russia*], 2013, no. 3, pp. 13–17. (In Russian)
- 8. Orlova S. S. *Prognoz i povysheniye ekspluatat-sionnoy nadezhnosty napornykh truboprovodov oro-sytelnykh system, transportyruyushykh stochniye vody* [Service reliability forecast and improvement of irrigation systems pressure lines carrying sewage water]: abstr. diss. ...Cand. Eng.: 06.01.02. Volgograd, VGSA (Volgograd State Agrarian University) Publ., 2008, 19 p. (In Russian)
- 9. SP 32.13330.2012. Kanalyzatsiya. Naruzhniye sety i sooruzheniya. Aktualyzyr. red. SNiP 2.04.03–85 [Set of rules 32.13330.2012. Sewerage. Water-supply and sewerage outdoor networks and structures. Revised ed. Building norms and regulations 2.04.03–85]. Moscow, Minregion Rossii (Ministry of Regional Development of Russia) Publ., 2012, 85 p. (In Russian)
- 10. SP 31.13330.2012. Vodosnabzheniye. Naruzhniye sety i sooruzheniya. Aktualyzyr. red. SNiP 2.04.02–84\* s izmeneniyem № 1 [Set of rules 31.13330.2012. Water supply. Water-supply and sewerage outdoor networks and structures. Revised ed. Building norms and regulations 2.04.02–84\* with Amendment № 1]. Moscow, Minstroy Rossii (Ministry of Housing and Building) Publ., 2015, 125 p. (In Russian)
- 11. Prymyn O. G. Obespecheniye nadezhnosty i ekologycheskoy bezopasnosty napornykh kanaly-

zatsionnykh truboprovodov [Reliability control and ecological safety of pressure sewer pipelines]. *Vodosnabzheniye i sanytarnaya tekhnika* [*Water supply and sanitary engineering*], 2013, no. 11, pp. 59–64. (In Russian)

12. Dikarevskiy V. S. & Tvardovskaya N. V. *Patent 41831. Rossiya, MKI7 F16L55/045. Gasytel gydravlycheskykh udarov [Patent 41831. Russia, MKI (International Patent Classification) F16L55/045. Hydraulic shock absorber]*. Saint Petersburg State Transport University, no. 2004120966/22. Appl.14.07.2004. Inventions. Useful models, no. 31 (10.11.2004). (In Russian)

13. Dikarevskiy V. S., Kapinos O. G. & Tvardovskaya N. V. Gydravlycheskiy udar v napornykh truboprovodakh vodootvedeniya [Hydraulic shock in sewerage pressure lines]. *Vestnyk RAASN [RAASN Bulletin (Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)*], 2004, issue 8, pp. 152–156. (In Russian)

14. GOST 14959–2016. Metalloproduktsiyaressorno-pruzhynnoy nelegyrovannoy i legyrovannoy staly. Tekhnicheskiye usloviya [State Standard 14959–2016. Metal products made of spring alloy-free and alloy*treated steel*]. *Technical regulations*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian)

15. GOST 13764–86. Pruzhyny vyntoviye tsylyndrycheskiye szhatiya i rastyazheniya iz staly kruglogo secheniya. Klassifikatsiya (s Izmeneniyem № 1) [State Standard 13764–86. Compression and tension coil springs made of round steel. Classification (with Amendment № 1)]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. (In Russian)

16. GOST 13765–86. Pruzhyny vyntoviye tsylyndrycheskiye szhatiya i rastyazheniya iz staly kruglogo secheniya. Oboznacheniye parametrov, metodyka opredeleniya razmerov (s Izmeneniyem № 1) [State Standard 13765–86. Compression and tension coil springs made of round steel. Parameter identifier, sizing technique (with Amendment № 1)]. Moscow, IPC Publishing House of Standards Publ., 1999. (In Russian)

17. GOST 21482–76. Sylfony odnoslyniye izmerytelniye metallycheskiye. Tekhnicheskiye usloviya (s Izmeneniyamy № 1, 2, 3, 4) [Single-layer measuring metal bellows. Technical regulations (with Amendments № 1, 2, 3, 4)]. Moscow, IPC Publishing House of Standards Publ., 1988. (In Russian)

ТВАРДОВСКАЯ Надежда Владимировна – канд. техн. наук, доцент, tvardov\_nv@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).597–



*Белаш Т. А.* Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений : монография. – М. : ФГБУ ДПО «Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2017.-175 с.

В современном сейсмостойком строительстве большое внимание уделяется вопросам использования нетрадиционных способов сейсмозащиты зданий и сооружений различного назначения, среди которых важное место занимают системы сейсмоизоляции и сейсмогашения. Именно им посвящена монография профессора Т. А. Белаш «Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений». Эти способы отличаются от традиционных подходов повышения сейсмостойкости зданий и сооружений.

Монография состоит из четырех глав, в которых представлены примеры конструктивных способов нетрадиционной сейсмозащиты, особое внимание уделено особенностям их устройства и работы во время сейсмических воздействий, представлены результаты расчетно-теоретического и экспериментального анализа поведения рассматриваемых систем защиты при землетрясениях.

Монография может быть использована магистрами, аспирантами и специалистами, изучающими вопросы сейсмостойкого строительства.

УЗДИН Александр Михайлович – доктор технических наук, профессор, uzdin@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

## СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2017 ГОД

## Проблематика транспортных систем

	Т., вып.	Стр.
<i>Белозёров В.Л., Грачёв А.А.</i> «Вечные» вопросы организации движения поездов на двухпутных участках	14, 3	397–405
Ефименко Ю. И., Рыбин П. К., Филиппов А. Г. Особенности обоснования развязок маршрутов в железнодорожных узлах с использованием динамического программирования	14, 1	5–15
Колос А. Ф., Колос И.В., Конон А.А. Математическая модель прогнозирования несущей способности балластного слоя железнодорожного пути	14, 4	578–587
Корниенко А. А., Ададуров С. Е., Глухов А. П., Диасамидзе С. В., Кустов В. Н. Модели управления рисками и ресурсами автоматизированных систем критического применения железнодорожного транспорта с учетом экономического фактора	14, 4	588–596
Маликов О. Б., Покровская О. Д. Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций логистики и клиентоориентированности	14, 2	187–199
Покровская О.Д., Маликов О.Б. Эволюционно-функциональный подход к классификации транспортных узлов	14, 3	406–419
Титова Т. С., Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии	14, 2	200–210
Современные технологии – транспорту		
Бекбаев Г. А., Привалов А. А., Ачкасов Н. Б., Кравцов А. О. Модель процесса «DDOS»-атаки на телекоммуникационную сеть железнодорожного транспорта	14, 3	420–426
Белый А. А., Барановский А. А., Воробьев Д. Е., Долинский К. Ю., Дьяченко Л. К., Осадчий Г. В. Проектирование и органи- зация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях	14, 2	211–222

	Т., вып.	Стр.
Бенин А. В., Коньков А. Н., Романов А. В. Результаты визуального обследования участка действующего Байкальского тоннеля	14, 1	16–23
Богданов Н. А. Применение метода анализа иерархий для определения текущего состояния искусственных сооружений железнодорожного транспорта на основе данных геодезического мониторинга	14, 3	427–436
Бороненко Ю. П., Даукша А. С. Перспективы внедрения вагонов со съемными кузовами увеличенной грузоподъемности	14, 3	437–451
Бороненко Ю. П., Житков Ю. Б. Моделирование динамики вагона-цистерны с жидким грузом	14, 4	597–604
Буторин С. М., Ефимов В. П. Фрикционные клинья грузовых тележек с повышенным межремонтным ресурсом	14, 4	605–614
Веревкина О. И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода	14, 4	615–627
Воробьев А. А., Керенцев Д. Е., Федоров И. В. Испытания колесных сталей на износ и контактную усталость	14, 4	628–636
Говоров В. В., Султанов Н. Н., Чусовитин М. С. Универсальный метод оценки прочности элементов верхнего строения железнодорожного пути на основе расчетной модели балки на упругом основании	14, 2	223–229
Григорьев П. С., Суворова К. Е. Оценка частот собственных ко- лебаний и динамических напряжений в оболочке котла цистерны	14, 4	637–643
Дудкин Е. П., Султанов Н. Н. Обоснование современных конструкций трамвайных путей	14, 1	24–32
Дудкин Е. П., Черняева В. А., Дороничева С. А., Смирнов К. А. Повышение эффективности и конкурентоспособности трамвая на рынке пассажирских перевозок	14, 2	230–237
Дьяченко Л. К. Смирнов В. Н., Дудкин Е. П. Оценка уровня вибраций с точки зрения их воздействия на пассажиров поездов при движении по мостовым сооружениям на высокоскоростных железнодорожных магистралях	14, 1	33–42

	Т., вып.	Стр.
Канашин Н. В., Никитчин А. А., Афонин Д. А. Опыт применения трехмерного моделирования при реконструкции мостов	14, 2	238–246
Канцибер Ю. А., Штыков В. И., Пономарев А. Б. Повышение эффективности осущения слабоводопроницаемых грунтов земляного полотна железных дорог	14, 1	43–51
Киселев А. А., Блажко Л. С., Романов А. В. Эквивалентная конусность и ее влияние на движение подвижного состава	14, 2	247–255
Киселев И. Г., Галов В. В., Комиссаров С. Б. Экспериментальное исследование электроразогрева расплавленной серы в железнодорожной цистерне	14, 4	644–649
Костроминов А. М., Костроминов А-р А., Тюляндин О. Н. Оценка вероятности пропуска считывания информации с радиочастотных меток аппаратурой СБПП	14, 4	650–656
Кручек В. А., Евстафьев А. М. Влияние технологических погрешностей на кинематику вращательного перемещения осевого редуктора с горизонтальной реактивной тягой в групповом тяговом приводе локомотива	14, 2	256–266
Кручек В. А., Евстафьев А. М. Особенности кинематического расчета осевого редуктора колесной пары с горизонтальной реактивной тягой группового тягового привода локомотива	14, 1	52–62
Кручек В. А., Титова Т. С., Грищенко А. В. Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар	14, 2	267–279
Мазнев А. С., Степанская О. А., Шатнев О. И. Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга	14, 1	63–72
Манаков А. Д., Кабецкий А. Г. Определение запасов и емкости складов в цепях поставок	14, 2	280–297
Марикин А. Н., Мирощенко В. А. Обоснование назначения минимально допустимого значения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов	14, 2	298–306
<i>Мнацаканов В. А.</i> Законы электрической тяги	14, 4	657–663
ICCN 1015 500V Manager BEVEC	17, 7	2017

	Т., вып.	Стр.
Орлова А. М., Рудакова Е. А., Комарова А. Н., Гусев А. В. Обоснование назначения минимально допустимого значения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов	14, 1	73–87
Орлова А. М., Фёдорова В. И. Теоретический расчет ресурса поверхности катания колес на основе экспериментальных наблюдений за вагонами модели 12-9853 на тележках 18-9855 с осевой нагрузкой 25 тс	14, 4	664–672
Покровская О.Д., Маликов О.Б., Зачешигрива М.А. Морфология терминальных сетей	14, 1	88–102
Покровская О. Д., Маликов О. Б., Зачешигрива М. А. О научно- практической реализации теории терминалистики	14, 4	673–688
Привалов А. А., Скуднева Е. В. Подход к оценке маскирования информационного обмена в сетях передачи данных оперативно технологического назначения при целевых атаках	14, 3	452–460
Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Яронова Н. В. Методы оценки надежности сети поездной радиосвязи	14, 3	461–470
Савоськин А. Н., Васильев А. П. Дислокационная модель взаимо- действия колеса и рельса при реализации вращающего момента и при боковых колебаниях экипажей	14, 1	103–109
Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В. Применение равновесного кода «1 из 5» для организации контроля комбинационных схем	14, 2	307–319
Седых Д.В., Белоусов С.В., Василенко М.Н. Автоматизация составления инструкций по пользованию устройствами сигнализации, централизации и блокировки	14, 2	320–332
<i>Смирнов В. Н.</i> Конструктивные решения по уменьшению продольных усилий в рельсах бесстыкового пути на мостах	14, 1	110–118
Соколов Д. А. Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов	14, 3	471–480

	Т., вып.	Стр.
Титова Т. С., Евстафьев А. М., Изварин М. Ю., Евстафьева М.В. Оценки энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения	14, 1	119–126
Третьяков А. В., Петров А. А., Елисеев К. В., Зимакова М. В. Проведение ходовых динамических испытаний грузовых вагонов с применением тензометрической колесной пары	14, 1	40–49
<i>Цыганская Л. В., Коршунов В. С.</i> Разработка трехосной тележки с радиальной установкой колесных пар с осевой нагрузкой 25 тс	14, 4	689–696
Чепурной А.Д., Додонов А.В., Афанасьев А.Е., Шевченко А.К., Шейченко Р.И. Постановка на производство нового семейства вагонов-платформ	14, 2	333–342
Чернышева Ю. В. Особенности движения грузового поезда с двигателями ограниченной мощности при резонансных колебаниях вагонов	14, 4	697–709
Чижов С. В., Шестакова Е. Б., Яхшиев Э. Т. Принципы расчета предварительно напряженных железобетонных элементов пролетного строения при дисперсном армировании	14, 2	343–353
Шепель А. С. Динамическая система показателей, определяющая техническую оснащенность инфраструктуры железнодорожных станций	14, 2	354–363
Шкурников С. В., Морозова О. С. О разработке имитационной модели высокоскоростного поезда	14, 3	481–489
Шматченко В. В., Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Иванов В. Г., Яронова Н. В. Влияние отказов и сбоев системы радиосвязи GSM-R на готовность перевозочного процесса	14, 3	490–500
Якушев А.В., Расщепкина Д.В., Баранов А.Н. Определение предельной длины усталостной трещины в углу буксового проема боковой рамы тележки грузового вагона	14, 4	710–719
Общетехнические задачи и пути их решения		
Ануфренко А. В., Канаев А. К. Формирование требований к узлу агрегации с использованием имитационного моделирования процесса его функционирования	14, 2	364–371

	Т., вып.	Стр.
Болдырев А.П., Жиров П.Д., Ионов В.В. Оценка параметрической надежности поглощающих аппаратов с учетом эксплуатационных факторов	14, 4	720–726
Гаранин М. А., Завьялов А. М., Дементьева Ю. В. Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма	14, 3	501–512
Герасименко П. В., Благовещенская Е. А., Ходаковский В. А. Математическое моделирование процесса изучения учебных многосеместровых дисциплин в технических вузах	14, 3	513–522
Герасименко П. В., Ходаковский В. А., Кударов Р. С., Бубнов В. П., Хватцев А. А. Тенденции и перспектива математического образования в технических вузах	14, 4	727–737
Глухих В. Н., Кирютина С. Е., Богданова А. С. Влияние начальных напряжений в древесине на прочность и формоустойчивость деревянных конструкций	14, 3	523–531
Голоскоков К. П., Чиркова М. Ю., Бенета Э. В. Расчет временных затрат на повышение надежности и достоверности информации при проектировании информационных систем	14, 3	532–538
Гофман М. В., Корниенко А. А., Котенко А. Г., Кустов В. Н., Мирончиков Е. Т. Модель цифрового маркирования ау- диосигналов, устойчивого к передаче через воздушный аудиоканал	14, 3	539–553
Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б. Водно-балансовые расчеты характеристик дренажа на осущаемых территориях	14, 3	554–561
Клименко С. В., Яковлев В. В., Ададуров С. Е. Метод контроля целостности данных с использованием CRC кода	14, 4	738–746
Котенко А. Г., Кокурин И. М., Белозеров В. Л., Тимченко В. С. Методика оценки пропускной способности реконструируемой железнодорожной линии на основе имитационного моделирования	14, 2	372–380
Кравцов А. О., Привалов А. А. Методика выбора приоритетных элементов ИТКС функционирующей в условиях применения организованным нарушителем таргетированных атак	14, 1	137–148

	Т., вып.	Стр.
<i>Маликов О.Б.</i> Определение запасов и емкости складов в цепях поставок	14, 1	149–156
Микони С. В., Дегтярев В. Г., Ходаковский В. А., Кударов Р. С. Со- поставление классификаций моделей, основанных на двух альтернативных подходах	14, 4	747–758
Олевинская Т. И. Использование виртуальной глиссады для вычисления отклонений летательного аппарата на конечном участке посадки	14, 2	381–391
Полинкевич К. Ю. Итерационный способ расчета тонкостенных стержней открытого профиля на прочность	14, 1	157–164
Себешев В. Г. Расчеты надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безот-казности	14. 1	165–174
Стоянович Г. М., Шипарев Р. Г. Закрепление грунтов с помощью криотропного гелеобразования в дорожном строительстве	14, 4	759–764
Твардовская Н.В. Предотвращение последствий гидравлических ударов в напорных системах водоотведения с использованием гасителя дифференциального действия	14, 4	768–775
Титова Т. С., Ахтямов Р. Г., Насырова Э. С. Оценка влияния жилищно-коммунального хозяйства на состояние водоемов в пределах урболандшафта	14, 1	175–182
Ходаковский В. А., Дегтярев В. Г. О теореме отсчетов и ее применении для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром	14, 3	562–573
Обзоры и рецензии		
Уздин А. М. – Белаш Т. А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография	14, 4	776