

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Научно-технический журнал
Периодичность: 6 номеров в год
Издаётся с января 1942 г.
ISSN 2223 – 9731, индекс 70116

Международный редакционный совет

С. А. Виноградов (председатель, канд. техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
В. Е. Фортов (д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, Москва, Россия),
Б. М. Лапидус (д-р экон. наук, проф., ОАО «РЖД», Москва, Россия),
К. Эсвельд (проф. железнодорожной инженерии, Технологический университет Делфта, Зальтбоммель, Нидерланды),
И. Г. Горячева (д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия),
С. Куммер (д-р экономики, проф., Венский экономический университет, Институт транспорта и логистики, Вена, Австрия),
Н. А. Махутов (д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия),
В. И. Колесников (д-р техн. наук, проф., академик РАН, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),
В. Ф. Ушкалов (д-р техн. наук, член-корреспондент НАН, Институт технической механики НАН, Днепр, Украина),
К. П. Шенфельд (д-р техн. наук, АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
Г. С. Фокс-Рабинович (д-р техн. наук, Университет Макмастера, Гамильтон, Канада),
Б. А. Лёвин (д-р техн. наук, проф., РУТ (МИИТ), Москва, Россия),
В. И. Сенько (д-р техн. наук, проф., Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Республика Беларусь),
О. Н. Назаров (канд. техн. наук, ОАО «РЖД», Москва, Россия),
Д. А. Мачерет (д-р экон. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия),
Б. Е. Дынькин (д-р техн. наук, проф., РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия),
Е. Н. Розенберг (д-р техн. наук, проф., АО «НИИАС», Москва, Россия),
А. В. Смольянинов (д-р техн. наук, проф., УрГУПС, Екатеринбург, Россия),
Ли Сюэвей (д-р наук, проф., Пекин, Китайская Народная Республика)

Редакционная коллегия

А. Б. Косарев (председатель, д-р техн. наук, проф.),
С. В. Фёдоров (д-р техн. наук, проф.),
Ж. Е. Бедова (секретарь),
С. М. Захаров (д-р техн. наук, проф.),
Н. Ф. Сирина (д-р техн. наук, доцент),
Д. В. Ермоленко (д-р техн. наук, доцент),
Г. В. Гогричиани (д-р техн. наук),
А. Я. Коган (д-р техн. наук, проф.),
В. А. Ивницкий (д-р техн. наук, д-р физ.-мат. наук, проф.),
В. А. Кучумов (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Макарова (д-р экон. наук),
Л. А. Мугинштейн (д-р техн. наук, проф.),
Е. А. Шур (д-р техн. наук, проф.),
Б. Э. Глюзберг (д-р техн. наук, проф.),
О. Ф. Мирошниченко (д-р экон. наук, проф.)

Учредитель — АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта».

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Статьи рецензируются.

© «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ»), Москва, 2019

Вестник

Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта

Вестник ВНИИЖТ | Том 78, 4/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4>

СОДЕРЖАНИЕ

Contents.....	194
Оценка стоимости жизненного цикла электровоза «онлайн»	
А. А. Акишин, В. В. Брексон, О. В. Виноградова, В. А. Кучумов, Н. Д. Миронов, Н. Б. Никифорова	195–202
Эффективность организации перевозок длинномерных грузов на фитинговых платформах с различной длиной погрузочных площадок	
С. В. Мозгрин, Г. Е. Писаревский	203–209
Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков	
Е. А. Шур, В. М. Федин, А. И. Борц, Ю. В. Ронжина, А. И. Фимкин.....	210–217
Разработка бортового устройства мониторинга технического состояния поглощающего аппарата грузового вагона	
Ю. И. Матяш, И. А. Гаджиев	218–226
Технология автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства с использованием удаленного сервера	
А. А. Голубин, Т. И. Набатчикова, С. Н. Науменко	227–232
Новый способ контроля начала подачи и сгорания топлива в тепловозных дизелях	
А. Ю. Коньков, И. Д. Конькова	233–240
Расчетно-экспериментальная оценка влияния использования подшпальных прокладок на показатели динамического воздействия подвижного состава на путь в стыковой зоне	
В. Н. Каплин, М. Н. Мысливец, Е. А. Сидорова, Е. А. Полунина.....	241–248
Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов	
Д. О. Давыдов.....	249–256

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35600 от 17.03.2009.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов.

Адрес учредителя, издателя, редакции
журнала «Вестник ВНИИЖТ»:
129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., 10.
Тел. (499) 260-43-19.
Цена свободная.

Главный редактор — Ж. Е. Бедова.

Ответственный за выпуск —
канд. техн. наук И. В. Сиротенко.

Подписано к печати 24.10.2019.

Дата выхода в свет 31.10.2019.

Формат бумаги 60×90 1/8.

Офсетная печать. Усл. печ. л. 8.

Тираж 600 экз. Заказ 190326.

Верстка — ООО «Эко-Вектор Ай-Пи».

Отпечатано ООО «Полиграфист и издатель»,
119501, Москва, ул. Веерная, 22-3-48.

E-mail: poligrafistizdatel@gmail.com.

Vestnik VNIIZhT

Vestnik of the Railway Research Institute
Vol. 78, 4/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4>

Contents

Online assessment of the electric locomotive life-cycle cost by A. A. Akishin, V. V. Brekson, O. V. Vinogradova, V. A. Kuchumov, N. D. Mironov, N. B. Nikiforova	195–202
Effectiveness of arrangement of the long cargo transportation on the fitting platforms with different length of freight storage by S. V. Mozgrin, G. E. Pisarevskiy	203–209
Methods of elimination of rails increased damage in the area of weld joints by E. A. Shur, V. M. Fedin, A. I. Borts, Yu. V. Ronzhina, A. I. Fimkin	210–217
Development of the onboard monitoring device of technical condition of the shock-absorbing device of the freight car by Yu. I. Matyash, I. A. Gadzhiev	218–226
Technology of automated analysis of the transport superstructure heat transfer coefficient using remote server by A. A. Golubin, T. I. Nabatchikova, S. N. Naumenko	227–232
New method of control of fuel injection beginning and fuel burning in the diesel locomotive engines by A. Yu. Kon'kov, I. D. Kon'kova	233–240
Estimation and test assessment of the rail pads effect on the indicators of dynamic impact of the rolling stock on the track in the joint area by V. N. Kaplin, M. N. Myslivets, E. A. Sidorova, E. A. Polunina	241–248
Method of calculation of the overall heat-transfer coefficient of the technical transport superstructure for perishables traffic by D. O. Davydov	249–256

Editorial Board:

Alexander B. Kosarev
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey V. Fedorov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Sergey M. Zakharov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Nina F. Sirina
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),
Dmitriy V. Ermolenko
(Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof.),

Georgiy V. Gogrichiani
(Dr. Sci. (Eng.)),
Alexander Ya. Kogan
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Victor A. Ivnitkiy
(Dr. Sci. (Eng.),
Dr. Sci. (Phys. and Math.),
Prof.),
Vladislav A. Kuchumov
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),

Elena A. Makarova
(Dr. Sci. (Econ.)),
Lev A. Muginshtein
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Evgeniy A. Shur
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Boris E. Glyuzberg
(Dr. Sci. (Eng.), Prof.),
Olga E. Miroshnichenko
(Dr. Sci. (Econ.), Prof.),

Scientific Editors: S. N. Naumenko (Dr. Sci. (Eng.)), E. E. Kossov (Dr. Sci. (Eng.), Prof.)

Editor-in-Chief: Joan E. Bedova
E-mail: journal@vniizht.ru.
Person responsible for the issue: I. V. Sirotenko.

Editorial office: 10, 3rd Mytischinskaya,
129626 Moscow, Russian Federation
Tel.: +7 (499) 260 4319.

Passed for printing 24.10.2019.
Format 60×90 1/8. Circulation 600 copies.

Print: "Printing-office Poligrafist i izdatel LTD".
E-mail: poligrafistizdatel@gmail.com.

Vestnik VNIIZhT
is published six times per year
First published in 1942
ISSN 2223 – 9731

**A peer reviewed scientific
and technological journal**
Languages: Russian, English

Publisher:
JSC Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"),
Moscow, Russian Federation
www.vniizht.ru

International Advisory Board:
Sergey A. Vinogradov,
Cand. Sci. (Eng.), General Director of JSC "VNIIZhT",
Moscow, Russian Federation
Vladimir E. Fortov,
Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of the
Russian Academy of Sciences (RAS), Director of United High
Temperature Institute of RAS, Moscow, Russian Federation
Boris M. Lapidus,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chairman of Joint Scientific
Council RZD, Chairman of International Board on Railway
Research (IRRBB) of UIC, Guest professor of Stockholm School
of Economics, Moscow, Russian Federation
Coenraad Esveld,
Prof., Dr. of railway engineering of Delft Technical
University, General Director of "Esveld Consulting
Services", Zaltbommel, Netherlands
Irina G. Goryacheva,
Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Academician of
the RAS, Head of laboratory for tribology, Institute for
Problems in Mechanics of the RAS, Moscow, Russian
Federation
Sebastian Kummer,
Univ. Prof. Dr. (Econ.) of Vienna University of Economics
and Business, Head of Institute of Transport and Logistics,
Vienna, Austria
Nikolay A. Makhutov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding member of the
RAS, Head of the scientific school "Safety and security
of critically and strategically important objects of
infrastructure" of Research Institute for Machine Science
named after A. A. Blagonravov of the RAS (IMASH RAS),
Moscow, Russian Federation
Vladimir I. Kolesnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, Rostov state university of railway
engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian Federation
Victor F. Ushkalov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, corresponding member of the
National Academy of Science of Ukraine, Head of
department of Statistical dynamics and multidimensional
mechanical systems dynamics of the Institute of Technical
Mechanics, Dnepr, Ukraine
Konstantin P. Shenfeld,
Dr. Sci. (Eng.), Executive director of JSC "VNIIZhT",
Moscow, Russian Federation
Herman S. Fox-Rabinovich,
Dr. Sci. (Eng.), Chief researcher of McMaster University
Engineering, Hamilton, Ontario, Canada
Boris A. Levin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of the Russian University
of Transport (RUT (MIIT)), Moscow, Russian Federation
Li Xuewei,
Dr. Sci., Professor, Vice-President of Engineering Union
of China Transport system, Party Member of CPC group
of Ministry of Education (Peking University, China)
Benjamin I. Senco,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belorussian State University
of Transport, Gomel, Republic of Belarus
Oleg N. Nazarov,
Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of technical policy department
JSC RZD, Moscow, Russian Federation
Dmitriy A. Macheret,
Dr. Sci. (Econ.), Professor, JSC "VNIIZhT", Joint Research
Council of JSC RZD, Moscow, Russian Federation
Boris E. Dynkin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored President of
International association of transport universities of
Asian-Pacific countries (IATU APC), Rostov state university
of railway engineers (RGUPS), Rostov-on-Don, Russian
Federation
Efim N. Rozenberg,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, First deputy Director General
of JSC Design & Research Institute for Information
Technology, Signaling and Telecommunication on Railway
Transport (JSC NIITAC), Moscow, Russian Federation
Alexander V. Smolyaninov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor of department "Wagons" of Ural
State University of Railway Transport, Yekaterinburg,
Russian Federation

© JSC Railway Research Institute, Moscow 2019

Оценка стоимости жизненного цикла электровоза «онлайн»

А. А. АКИШИН¹, В. В. БРЕКСОН², О. В. ВИНОГРАДОВА¹, В. А. КУЧУМОВ¹, Н. Д. МИРОНОВ¹,
Н. Б. НИКИФОРОВА¹

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Уральские локомотивы» (ООО «Уральские локомотивы»), Верхняя Пышма, 624090, Россия

Аннотация. Принцип выбора электровоза, основанный на анализе затрат стоимости жизненного цикла, находит все большее применение. При этом соответствие локомотива заявленным показателям или характер его эксплуатации не контролируется достаточно объективно. Описанный в статье метод оценки расходов по жизненному циклу «онлайн» основан на непрерывной оценке эксплуатационных расходов локомотива и позволяет своевременно обнаружить отклонения параметров эксплуатации или локомотива от заданных. Метод получил название «СЖЦ «онлайн»» и в данный момент тестируется на электровозах 2ЭС6 Октябрьской железной дороги по заказу ООО «Уральские локомотивы». Приведены основные показатели эксплуатации, закономерности их изменения и влияние на общие затраты.

Ключевые слова: локомотив; жизненный цикл; эксплуатация; эффективность использования; оценка затрат

Введение. До 1990-х гг. отечественные железные дороги являлись общегосударственной собственностью и занимались решением задач народного хозяйства, включая мобилизационные. В учебной литературе [1] экономика локомотивного хозяйства не упоминалась. В начале 90-х гг. прошлого века ситуация в стране коренным образом изменилась. В условиях развития рыночной экономики был разработан и введен в действие ГОСТ 31539–2012 «Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения». С появлением контрактов жизненного цикла необходимость использования понятия «стоимость жизненного цикла» (СЖЦ), позволяющего интегрально экономически оценивать эксплуатационные свойства электровозов, увеличивается [2–8].

В настоящей статье обоснован комплексный подход к оценке эксплуатационных свойств электровозов на базе экономической модели стоимости жизненного цикла «онлайн».

Общие положения. На Октябрьскую железную дорогу в 2018 г. по контракту жизненного цикла (КЖЦ) было поставлено пять электровозов 2ЭС6, которые эксплуатируются на полигоне вместе с электровозами ВЛ10, 2ЭС4К, 3ЭС4К и др. Поступившие в эксплуатацию электровозы становятся частью транспортного

конвейера, участвуя в технологических операциях по прицепке и отцепке составов, проверке тормозов, экипировке, обслуживанию, ремонту и т.д.

В первом полугодии 2018 г. суммарный пробег пяти электровозов 2ЭС6 составил 429 131 км, средний пробег каждого локомотива — 85 826 км.

За первый квартал 2018 г. парком 2ЭС6 был реализован грузооборот $91\,813 \cdot 10^4$ т·км, при этом общие расходы, включая удельные капитальные вложения в парк, расходы на электроэнергию и ремонт, составили 37,137 млн руб., таким образом средние удельные затраты на перевозку составили 404,48 руб./ 10^4 т·км. За второй квартал 2018 г. парком 2ЭС6 был реализован грузооборот $100\,246 \cdot 10^4$ т·км (+8,41 % к результату первого квартала), при этом общие расходы составили 36,746 млн руб., средние удельные затраты на перевозку этим парком уменьшились до 366,56 руб./ 10^4 т·км (–9,38 % по отношению к первому кварталу). Полученные фактические данные по эксплуатации парка электровозов 2ЭС6 на Октябрьской железной дороге позволяют оптимистично оценивать поставку по КЖЦ.

Однако дальнейшее использование КЖЦ ставит задачу более подробного рассмотрения показателей эксплуатационной деятельности электровоза. Необходимо применить показатели, которые будут способствовать определению стратегической линии как для изготовителя локомотивов (ООО «Уральские локомотивы»), так и для заказчика продукции (Дирекции тяги — филиала ОАО «РЖД»). Эти показатели должны, с одной стороны, оценивать полезность достижения заводом новых характеристик (например, увеличение критических масс поездов для локомотивов, повышение коэффициента технической готовности (КТГ) и других параметров), с другой — позволить заказчику обоснованно предъявлять заводу свои требования.

Цель данной статьи — рассмотреть основные показатели эксплуатации электровозов и обосновать возможность и целесообразность применения предложенных в работе принципов экономической оценки эксплуатационной деятельности локомотива на базе модели стоимости жизненного цикла «онлайн».

■ E-mail: Mironov.Nikolay@vniizht.ru (Н. Д. Миронов)

Длительность и периодичность ремонтов электровоза 2ЭС6
Duration and periodicity of electric locomotive 2ES6 repair

Вид обслуживания	Периодичность (часы эксплуатации либо км пробега)	Продолжительность, ч, сут
ТО	Не менее 180 ч	1,2 ч
ТР-1	Не менее 30 тыс. км	18 ч
ТР-2	Не менее 300 тыс. км	3 сут
ТР-3	Не менее 600 тыс. км	6 сут



Рис. 1. КТГ для месяцев, включающих проведение ремонтов для электровозов 2ЭС6

Fig. 1. EAR (equipment availability ratio) for months including electric locomotives 2ES6 repairs

Показатели эффективности эксплуатации локомотива. В настоящее время используют четыре основных коэффициента, характеризующих периодичность обслуживания, степень безотказности и ремонтпригодности локомотива [9]:

- коэффициент оперативной готовности, показывающий отношение времени в работоспособном состоянии ко всей длительности периода;

- коэффициент технической готовности, который показывает отношение суммарного времени в работоспособном состоянии к суммарному времени пребывания локомотива в работоспособном состоянии и на техническом обслуживании или ремонте;

- коэффициент внутренней готовности представляет собой отношение времени в работоспособном состоянии к суммарному времени пребывания локомотива в работоспособном состоянии и на внеплановых ремонтах;

- мгновенный коэффициент готовности наличного парка локомотивов — это отношение количества работоспособных локомотивов в заданный момент времени к их общему количеству в парке.

Оценка эксплуатации подвижного состава по КТГ. Наиболее распространенным в применении является КТГ: он включает в себя длительность плановых осмотров и ремонтов, поэтому уже не может быть равен 1; для электровозов 2ЭС6 на Октябрьской железной дороге задано значение КТГ=0,96. В качестве примера в таблице приведены длительность и периодичность ремонтов электровоза 2ЭС6. Как видно из таблицы, периодичность ремонтов зависит от пробега, то есть чем больше пробег электровоза в сутки, тем чаще надо делать ремонт.

На рис. 1 представлены значения КТГ, характерные для месяцев, в которых проводятся ТО, ТР-1, ТР-2, ТР-3, то есть КТГ уменьшается за счет проведения планового обслуживания электровозов. На рис. 2 показана зависимость КТГ, рассчитанных за каждые 3 месяца за 4 года с учетом плановых осмотров и ремонтов для разной величины среднесуточного пробега электровозов 2ЭС6: видно, что чем больше электровоз имеет пробег, тем чаще производится

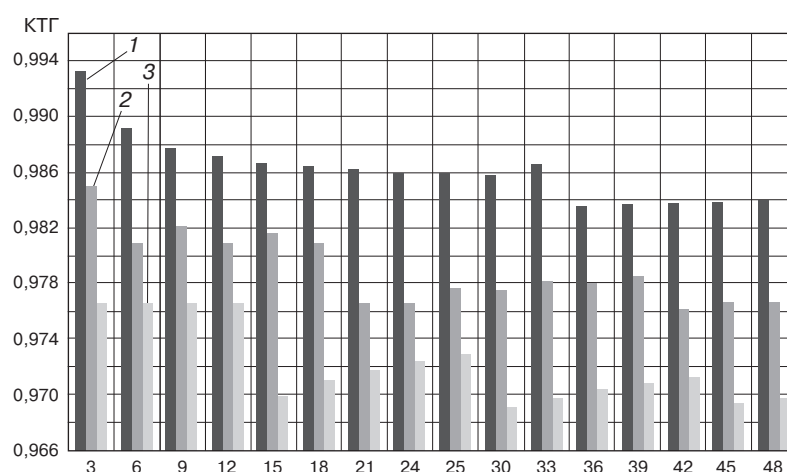


Рис. 2. КТГ, рассчитанный по 3 месяцам за 4 года с учетом плановых осмотров и ремонтов для разных среднесуточных пробегов электровозов 2ЭС6:

1 — 300 км; 2 — 500 км; 3 — 700 км

Fig. 2. EAR calculated quarterly for 4 years of scheduled inspections and repairs for different average daily mileage of electric locomotives 2ES6:

1 — 300 km; 2 — 500 km; 3 — 700 km

периодические ремонты, за счет чего снижаются КТГ и уменьшаются возможности по проведению дополнительных внеплановых ремонтов.

При снижении КТГ ниже установленного значения возникает необходимость держать дополнительный парк электровозов, чтобы обеспечить планируемый объем перевозок. Повышенный КТГ позволяет заказчику реализовывать увеличенный объем перевозок, что может в свою очередь создать для изготовителя некоторый дополнительный условный «запас прочности» для появления неплановых ремонтов. По текущему значению коэффициента КТГ возможно оценивать его общую величину за весь срок дальнейшей эксплуатации, то есть прогнозировать изменения КТГ в будущем (из-за плановых ремонтов) и делать выводы о целесообразности принятия управленческих решений в части проведения дополнительных работ по электровозам.

За первые два квартала 2018 г. для электровозов 2ЭС6 были определены расчетный коэффициент (КТГ_р) с учетом только плановых ремонтов и фактический коэффициент (КТГ_ф), представленные на рис. 3. Расчетный и фактический КТГ несколько отличаются, что связано с возникновением трех внеплановых ремонтов, различием между реальным и планируемым временем проведения ТР и ТО.

Оценка эксплуатации подвижного состава по КТГ эффективна в большинстве случаев для подвижного состава, который имеет постоянную модель эксплуатации, то есть маршруты его движения и совершаемая работа в течение значительного периода неизменны (поезда метро, пригородные поезда), когда основным критерием является выполнение расписания без необходимости увеличения совершаемой работы. Для оценки эксплуатации грузовых локомотивов этот показатель недостаточен: он отражает степень готовности и величину парка, но не произведенную работу и эффективность.

Расход электроэнергии. Расходы на электроэнергию составляют около половины всех затрат жизненного цикла на этапе эксплуатации локомотива. Потребление энергии в поездке зависит от множества параметров, начиная от массы поезда и профиля участка и заканчивая погодными условиями, поэтому расход энергии может быть спрогнозирован путем статистической оценки записей поездок.

Выделим основные параметры, определяющие расход электроэнергии в конкретной поездке:

- стабильные, редко изменяемые (план и профиль участка);
- квазипостоянные (постоянные ограничения скорости, которые изменяются, как правило, при модернизации пути и путевого полотна);
- постоянные в пределах допуска (тяговые и тормозные характеристики электровоза при выпуске с завода);

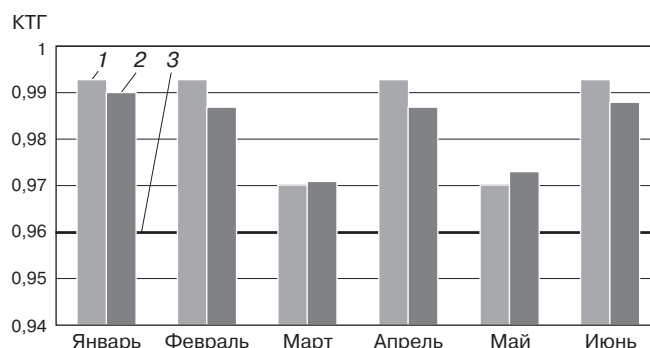


Рис. 3. Диаграмма расчетного и фактического КТГ для электровозов 2ЭС6 за первое полугодие 2018 г.: 1 — расчетный КТГ; 2 — фактический КТГ; 3 — заданное значение
Fig. 3. Diagram of the calculated and actual EAR for electric locomotives 2ES6 for the first six months of 2018 year: 1 — calculated EAR; 2 — actual EAR; 3 — specified value

• изменяемые в процессе эксплуатации (характеристики локомотива и отдельного оборудования в зависимости от старения параметров оборудования, изменения его характеристик при проведенных ремонтах);

• случайные, свойственные только данной поездке (масса поезда, тип вагонов, грузов, режимы движения, погодные условия и др.).

Кроме ожидаемых и измеряемых затрат энергии, имеются потери энергии в точке контакта колесо-рельс, возрастающие при наличии боксования при осуществлении перевозок на пределе сцепления. Задачу определения расхода электроэнергии для электровоза (Эл1), используемого на новом участке, невозможно разложить на следующие составляющие:

1) прогнозирование применения электровоза Эл1 на участке А вместо другого электровоза (Эл2). При этом существует участок В, на котором эксплуатируются оба локомотива;

2) те же условия, что и в пункте 1, но электровоз Эл1 не эксплуатировался пока ни на одном из участков;

3) те же условия, что и в пункте 1, но электровозы Эл1 и Эл2 не эксплуатируются совместно на одних участках;

4) сравнение расхода электроэнергии данным электровозом по сравнению с другими электровозами на этом участке;

5) сравнение расхода электроэнергии электровоза Эл1 после нескольких лет эксплуатации с момента внедрения.

У современных электровозов также имеются значительные расходы на вспомогательные нужды, объясняемые наличием на электровозе систем управления как непосредственно локомотивом, так и отдельным оборудованием. Эти расходы компенсируются лучшими тяговыми и тормозными характеристиками и возможностью повышать массу поезда. Процент затрат электроэнергии на вспомогательные нужды при

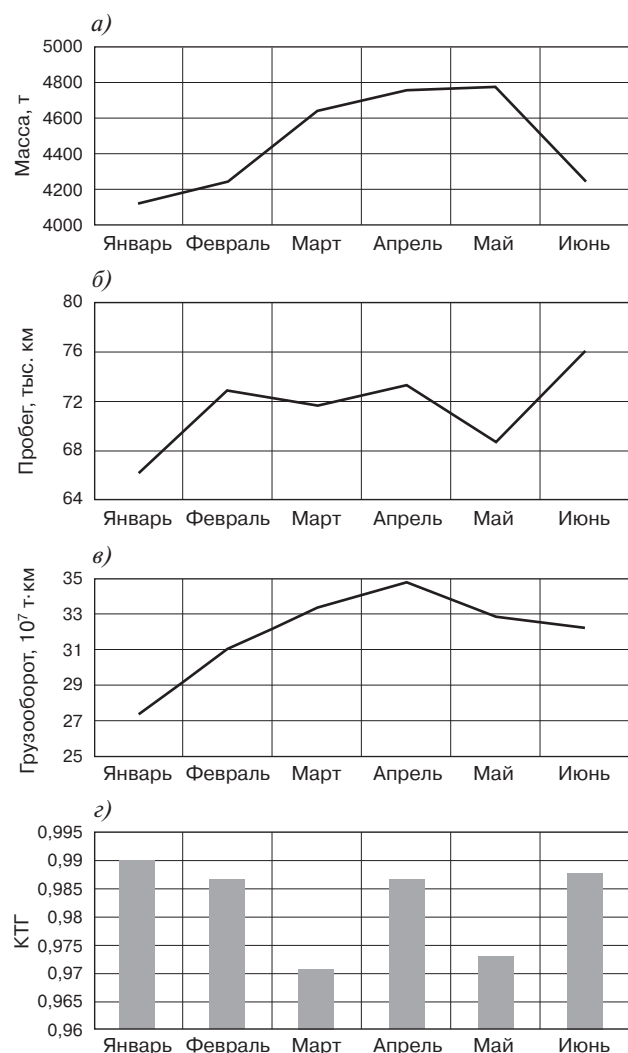


Рис. 4. Основные эксплуатационные показатели электровоза 2ЭС6 за первое полугодие 2018 г. (помесячно) на Октябрьской железной дороге:

а — средняя масса состава; б — общий пробег парка электровозов; в — грузооборот парка электровозов; г — КТГ парка электровозов
 Fig. 4. Main performance indicators of electric locomotive 2ES6 for the first six months of 2018 (on a monthly basis), at Oktyabrskaya railroad:
 а — average weight of the rolling stock; б — total mileage of the electric locomotives fleet; в — cargo turnover of the electric locomotive fleet; г — EAR of the electric locomotives fleet

уменьшении среднего веса состава возрастает, использование электровоза не на полную мощность делает его менее энергоэффективным. Нужно при этом учитывать, что поезда редко бывают загруженными в обоих направлениях: обычно в одном направлении они следуют груженые, в другом — порожние, то есть уже имеется увеличение потерь электроэнергии.

Тонно-километровая работа. Данный показатель характеризует основную функцию электровоза — перемещение грузов — и зависит от совершаемых пробегов и масс поездов. На рис. 4 представлены основные эксплуатационные показатели электровоза 2ЭС6. Анализ графиков показывает, что в течение

полугодия масса поездов (см. рис. 4, а) и грузооборот (см. рис. 4, в) увеличивались, что свидетельствует о повышении эксплуатационной эффективности применяемых электровозов. Показатель «тонно-километровая работа» является одним из наиболее важных, однако не отражает все особенности эксплуатации электровозов, в частности расход электроэнергии, другие затратные показатели. Из рис. 4, г видно, что значение КТГ совершенно не связано с произведенной работой.

Удельный расход электроэнергии. Для проведения анализа текущего расхода электроэнергии вводится понятие «ожидаемого» расхода, который рассчитывается с учетом работы, совершаемой за месяц на каждом участке. Ожидаемый и фактический расходы электроэнергии за первое полугодие 2018 г. (помесячно) для участков Бабаево—Лужская и Бабаево—Санкт-Петербург Октябрьской железной дороги представлены на рис. 5, а. На рис. 5, б показаны зависимости удельного расхода электроэнергии и грузооборота за тот же период времени для этих же участков. В целом разница между ожидаемыми и фактическими расходами электроэнергии (см. рис. 5, а) незначительна, она находится в пределах 3% и вызвана влиянием случайных факторов.

Рассматривая зависимость удельного расхода электроэнергии по отдельным месяцам за первое полугодие 2018 г. (см. рис. 5, б), можно выделить три этапа: январь-февраль, март-апрель и май-июнь. На первом этапе увеличивается масса перевозимых грузов (почти на 14%; см. рис. 4, а), осваиваются более экономные способы вождения и, несмотря на то что это зимние месяцы, наблюдается понижение удельных энергозатрат (порядка 3%). На втором этапе уменьшение удельного расхода электроэнергии (почти на 16%) происходит по мере улучшения погодных условий и увеличения массы перевозимых грузов. Повышение удельного расхода энергии в мае-июне (третий этап) соответствует началу работ по ремонту пути, что связано с появлением дополнительных ограничений скорости, следованием поездов по неправильному пути и т.д.

Комплексные экономические оценочные показатели. В настоящее время в большинстве областей техники используются комплексные экономические показатели, которые определяют деятельность данной техники в стоимостном выражении. Рассмотренные выше показатели не являются комплексными и не отражают экономическую оценку эксплуатационной деятельности. Для комплексной оценки эксплуатационной работы электровозов возможно использовать существующий метод оценки эффективности по СЖЦ. Этот метод применяют при создании и внедрении новых локомотивов, а также при разработке и модернизации отдельных узлов, технологии их эксплуатации, обслуживания и ремонта.

При разработке и внедрении новых локомотивов рассчитывают СЖЦ, то есть оценивают планируемые затраты на реализацию определенного объема тонно-километровой работы (реализуемой в настоящее время или планируемой на заданном направлении). Результирующим экономическим показателем при этом является СЖЦ по реализации определенного объема работы на заданном участке эксплуатации. При этом основными затратными составляющими являются [10, 11, 12, 13, 14]:

- инвестиционная стоимость самого локомотива с учетом необходимых капитальных вложений;
- затраты на электроэнергию;
- затраты на обслуживание и ремонт;
- затраты на содержание локомотивных бригад.

По материалам расчета СЖЦ при начальном расчете оценивается окупаемость применения электровазона и та прибыль, которую заказчик получит за время КЖЦ.

Однако до недавнего времени такая оценка производилась перед началом проектирования, на этапе изготовления макетного образца и по результатам первых эксплуатационных поездок и не проводилась по результатам реальной эксплуатации. Расчет реализуемой текущей СЖЦ по фактическим результатам эксплуатации (расчет СЖЦ «онлайн») позволяет не только оценить фактическую эффективность электровазона и его применения, но и рассчитать его реальный срок окупаемости и определить векторы развития тяги, направленные на понижение СЖЦ. Тем самым СЖЦ используется как инструмент по управлению оптимизацией эксплуатации [15].

При расчете стоимости жизненного цикла перед началом эксплуатации рассматривается СЖЦ для определенного количества произведенной работы. Для сравнения СЖЦ разных локомотивов и периодов времени рассматривается удельная стоимость жизненного цикла (УСЖЦ), реализуемая в процессе эксплуатации и рассчитываемая «онлайн».

Удельная стоимость жизненного цикла на элементарном периоде расчета (ЭПР) может быть представлена следующим выражением:

$$P_{\text{усжц}} = \frac{P_{\text{эли}} + P_{\text{реми}} + P_{\text{лок.бри}} + P_{\text{инвести}}}{A_i},$$

где $P_{\text{эли}}$ — стоимость электроэнергии, затраченной за данный период расчета (ЭПР); $P_{\text{реми}}$ — стоимость проведенных плановых и внеплановых ремонтов за данный период расчета (ЭПР); $P_{\text{лок.бри}}$ — затраты на локомотивные бригады за ЭПР; $P_{\text{инвести}}$ — стоимость инвестиций, которые должны быть компенсированы за жизненный цикл; A_i — тонно-километровая работа, выполненная за ЭПР.

В данном выражении показатели по энергоемкости и работе входят в явном виде, а коэффициент

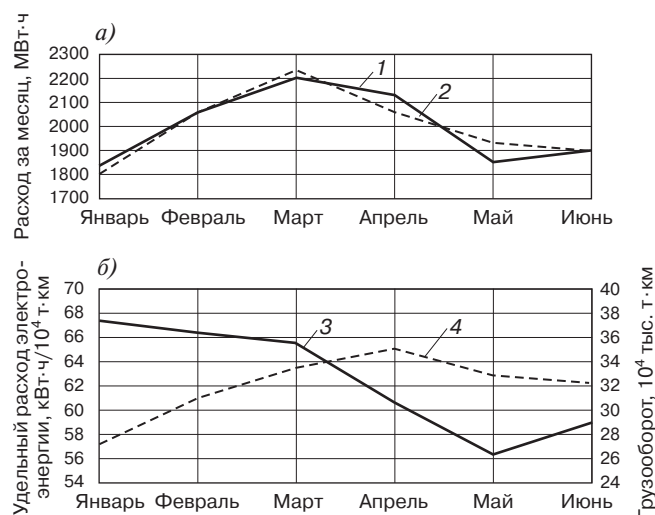


Рис. 5. Расходы электроэнергии за первое полугодие 2018 г. (помесячно):

- a* — абсолютные значения; *б* — удельные значения;
 1 — фактический расход; 2 — ожидаемый расход;
 3 — удельный расход; 4 — грузооборот

Fig. 5. Consumption of electric power in the first six months of 2018 year (on a monthly basis):

- a* — absolute values; *b* — specific values;
 1 — actual consumption; 2 — estimated consumption;
 3 — specific consumption; 4 — cargo turnover

готовности отражен стоимостью ремонтов и проведенной работой. И все эти показатели связаны стоимостными коэффициентами, в результате чего получается единая стоимостная характеристика.

Частота проведения расчетов зависит от технической оснащенности локомотивов. На электровазонах, выпускаемых ООО «Уральские локомотивы», осуществляется передача информации с локомотива с дискретностью до 5 мин, и поэтому в настоящее время возможно реализовать расчет СЖЦ с дискретностью 5 мин, что позволит оперативно отслеживать изменения СЖЦ и производить необходимые действия по управлению эксплуатацией. Разумеется, в результате такого расчета может получиться некоторая функция, зависящая от особенностей проведенной поездки (груженный или порожний поезд был проведен, на каком участке и т.д.). При этом возможно провести увеличение интервала с целью сглаживания функции и определения линии тренда.

С целью оценки экономической эффективности эксплуатации локомотивов 2ЭС6 на Октябрьской железной дороге на рис. 6 представлена динамика изменения экономических и эксплуатационных показателей работы парка электровазонов за первое полугодие 2018 г. Как видно из рис. 6, зависимости выполненной работы, затраченной энергии, удельной СЖЦ не являются монотонными функциями. Общие расходы на перевозку до марта росли соответственно росту пробегов, выполненной работы и затратам электроэнергии на совершение этой работы (соответственно

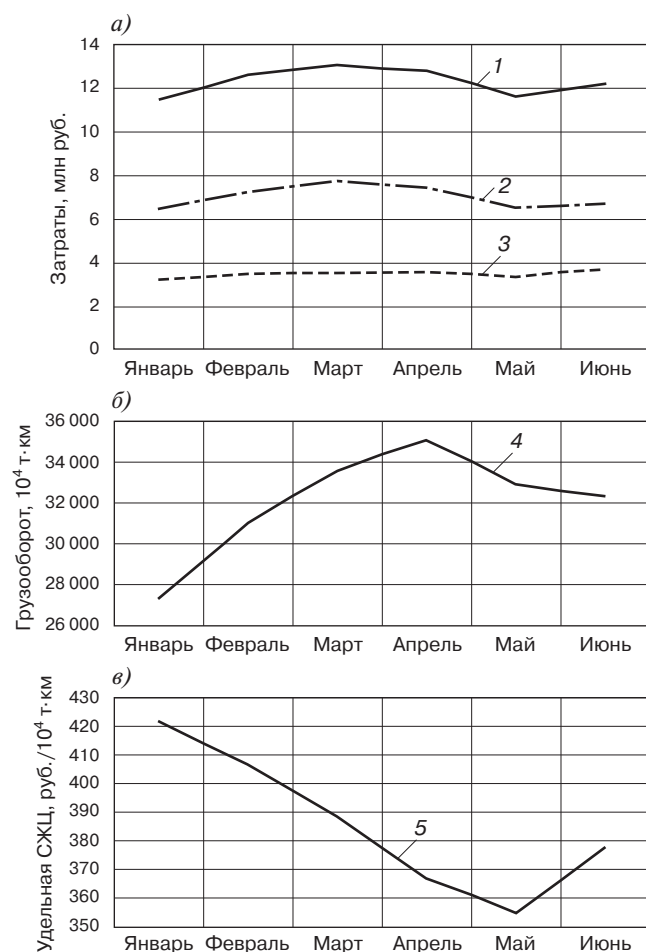


Рис. 6. Графическая интерпретация динамики изменения экономических и эксплуатационных показателей работы парка электровозов 2ЭС6 за первое полугодие 2018 г.:

а — динамика изменения затрат на перевозочный процесс; б — изменение грузооборота по месяцам; в — изменение удельной стоимости жизненного цикла; 1 — общие затраты парка на перевозку; 2 — затраты на электроэнергию; 3 — затраты на ремонт; 4 — грузооборот парка электровозов; 5 — удельная стоимость жизненного цикла парка электровозов

Fig. 6. Graphic interpretation of the dynamics of changes in economic and operating indicators of the electric locomotives 2ES6 fleet in the first six months of 2018 year:

а — dynamics of changes in expenses for traffic; б — changes of cargo turnover on a monthly basis; в — changes of the unit cost of the life cycle; 1 — total fleet expenses on carriage; 2 — power costs; 3 — repair costs; 4 — electric locomotive fleet cargo turnover; 5 — unit cost of the life cycle of the electric locomotive fleet

пробегах возрастали затраты на ремонты). Причем при совершении в апреле большей работы, чем в январе, на 28 % расходы на ремонт выросли в значительно меньшей степени (порядка 11 %), то есть увеличение работы связано с повышением масс поездов. Несмотря на рост работы в апреле по сравнению с мартом (на 4,6 %), расходы на топливно-энергетические ресурсы упали на 3 %, что связано с изменением погодных условий и частично маршрутов поездок. При этом УСЖЦ монотонно уменьшалась, в целом с января по май снижение составило 16 %, что свидетельствует

о повышении эффективности применения электровозов в данный период.

В мае грузооборот снизился, уменьшились расходы по всем основным статьям, затраты на перевозку стали меньше по сравнению с апрелем. В июне объем выполняемой работы уменьшился по сравнению с апрелем на 8 %, при этом значительно увеличились пробеги и расходы на ремонт. Увеличение пробега без повышения грузооборота соответствует уменьшению масс водимых поездов (рост удельных затрат электроэнергии), в связи с этим удельная СЖЦ электровоза увеличилась на 6 %. Изменения связаны с летними ремонтными работами, появившимися временными ограничениями скорости, движением по неправильно-му пути.

Проведенный укрупненный анализ при оценке УСЖЦ с дискретностью расчета в один месяц показывает общие возможности использования оценки УСЖЦ «онлайн». Непрерывная оценка УСЖЦ является одним из этапов цифровизации и позволит анализировать динамику изменения основных экономических показателей эксплуатации локомотивов, определять необходимые мероприятия по их совершенствованию и проводить анализ стратегии развития эксплуатации. Используя понятие УСЖЦ, возможно показать и аргументировать выполненную электровозом работу и достигнутую окупаемость применения локомотива.

В настоящее время ученые АО «ВНИИЖТ» совместно со специалистами ООО «Уральские локомотивы» проводят тестовые испытания на электровозах 2ЭС6 Октябрьской железной дороги сервера «СЖЦ „онлайн“», который позволяет оперативно анализировать собираемую информацию по эксплуатационной деятельности и сервисному обслуживанию локомотивов, эксплуатируемых по контракту жизненного цикла, а также предоставляет возможность более эффективно и оперативно управлять парком электровозов.

Заключение. УСЖЦ «онлайн» является единым критерием, который позволяет экономически оценить эффективность эксплуатации электровоза и отражает энергоэффективность выполненных перевозок, объем произведенной тонно-километровой работы, эксплуатационные расходы, надежность электровоза и его КТГ.

Критерий УСЖЦ позволяет оценить причины отклонений эксплуатационных показателей эффективности от планируемых и определить стратегию совершенствования электровоза. С помощью критерия УСЖЦ возможно провести анализ эксплуатации отдельного электровоза и прогнозировать его состояние и возможные характеристики. УСЖЦ также позволяет анализировать состояние группы электровозов при изменении технологии эксплуатации (например, начало эксплуатации при повышении масс составов), в том числе оценивать, насколько экономически выгодны проводимые мероприятия.

Расчет жизненного цикла «онлайн» — еще один шаг в сторону цифрового локомотива. Локомотив создает и рассчитывает информацию по своей жизнедеятельности, определяя тем самым пути совершенствования и устранения причин неудач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзинбуд С.Я., Кельперис П.И. Эксплуатация локомотивов. М.: Транспорт, 1980. 248 с.
2. ГОСТ 31539–2012. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения [Электронный ресурс]. 2014. URL: <http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5302694> (дата обращения: 30.07.2019 г.).
3. Вавилов Е. Н., Кархова И. Ю. Эффект от внедрения новых локомотивов // Железнодорожный транспорт. 1997. № 9. С. 54–57.
4. Иванова Н.Г., Мурашов А.А. Предельная (лимитная) цена и стоимость жизненного цикла подвижного состава железнодорожного транспорта. М.: Маска, 2007. 296 с.
5. Мурашов А.Е., Иванова Н.Г., Ставрова Е.К. Стоимость жизненного цикла и цена новых локомотивов // Локомотив. 2010. № 5. С. 37–39.
6. Брусиловский М.Э. Комплексная оценка стоимости жизненного цикла технических систем железнодорожного транспорта: Дис. ... канд. экон. наук. М.: МИИТ, 2011. 161 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004946509> (дата обращения: 30.07.2019 г.).
7. Загребельский А.М., Кадышев С.А., Ребрик Б.Н. Стоимость жизненного цикла электровагона // Железнодорожный транспорт. 1998. № 12. С. 34–36.
8. Бабел М. Теоретические основы и методология выбора объемов и технологий модернизации тепловозов по критерию стоимости жизненного цикла: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВНИИЖТ. Москва, 2014. 48 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005553513> (дата обращения: 30.07.2019 г.).
9. ОАО «РЖД». О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» (с изменениями от 21.09.2018 г. № 2070р): утв. распоряжением от 30 декабря 2016 г. № 2796р [Электронный ресурс]. URL: <https://prorzd.ru/2018/02/18/2796r/> (дата обращения: 30.07.2019 г.).
10. ОАО «РЖД». Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта: утв. распоряжением от 27 декабря 2007 г. № 2459р [Электронный ресурс]. URL: <https://jd-doc.ru/2007/dekabr-2007/12704-rasporiazhenie-oao-rzhd-ot-27-12-2007-n-2459r> (дата обращения: 30.07.2019 г.).
11. ОАО «РЖД». Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. ОАО «РЖД» 10.11.2010. М.: Техинформ, 2011. 289 с.

12. М-во путей сообщ. СССР. Методические указания по определению технико-экономической эффективности новых и усовершенствованных электровагонов / Э.И. Хаит [и др.]. М.: Транспорт, 1986. 115 с.

13. ГОСТ Р 27.202–2012. Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла [Электронный ресурс]. 2013. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200102419> (дата обращения: 30.07.2019 г.).

14. Инструкции РЖД. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте: утв. указанием МПС РФ от 31.08.1998 г. № В-1024у [Электронный ресурс]. URL: https://instructions.rzd.ucoz.ru/load/dlja_dvizhencev/metodicheskie_rekomendacii_po_ocenke_investicionnykh_proektov_na_zhelezнодорожном_transporte_utverzheny_ukazaniem_mps_v_1024u_ot_31_08_1998/10-1-0-971 (дата обращения: 30.07.2019 г.).

15. ОАО «РЖД». Методические рекомендации по расчету экономического эффекта внедрения научно-технических достижений и передового опыта на железных дорогах — филиалах ОАО «РЖД»: утв. распоряжением от 7 сентября 2005 г. № 1392р [Электронный ресурс]. URL: <https://jd-doc.ru/2005/sentyabr-2005/11002-gasporiazhenie-oao-rzhd-ot-07-09-2005-n-1392r> (дата обращения: 30.07.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

АКИШИН Александр Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория «Электровагоны», АО «ВНИИЖТ»

БРЕКСОН Виталий Вильямович, первый заместитель генерального директора ООО «Уральские локомотивы»

ВИНОГРАДОВА Ольга Владимировна, ведущий инженер, лаборатория «Электровагоны», АО «ВНИИЖТ»

КУЧУМОВ Владислав Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория «Электровагоны», АО «ВНИИЖТ»

МИРОНОВ Николай Дмитриевич, инженер, лаборатория «Электровагоны», АО «ВНИИЖТ»

НИКИФОРОВА Нина Борисовна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория «Электровагоны», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 07.06.2019 г., принята к публикации 08.08.2019 г.

Online assessment of the electric locomotive life cycle cost

A. A. AKISHIN¹, V. V. BREKSON², O. V. VINOGRADOVA¹, V. A. KUCHUMOV¹, N. D. MIRONOV¹, N. B. NIKIFOROVA¹

¹ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Limited Liability Company Ural Locomotives (LLC "Ural Locomotives"), Verkhnyaya Pyshma, 624090, Russia

Abstract. The selection and supply of electric locomotives based on the life cycle contract requires a more thorough review of indicators of their effectiveness implemented in operation. This study examines the main operation indicators currently used: coefficients of operational availability, technical availability, intrinsic availability (instantaneous), availability of the locomotive fleet, performed ton-kilometer operation, and electric power consumption. However, these indicators are not comprehensive and do not provide

an overall economic assessment of operation. For a comprehensive assessment of the effectiveness of operation of locomotives, an online calculation of the life cycle cost is proposed. This involves directly using operating and service data for its performance, and the calculation of an indicator — life cycle specific cost (LCSC). The online LCSC is a uniform criterion associated with the energy efficiency of the performed transportation, volume of the ton-kilometer operation, operation expenses, reliability of electric locomotive,

and its equipment availability ratio (EAR). The LCSC analysis enables assessment of deviations of the operation effectiveness indicators from those planned, and determining a strategy for improvement of the electric locomotive. It helps to define peculiarities in the operation of an electric locomotive and to forecast its condition and potential properties. Additionally, the LCSC facilitates analyzing the condition of a group of electric locomotives when changing the operation technology (for example, operation starting with increased rolling stock weight), including assessment of the extent of economic benefits of fulfilled measures.

Currently, scientists of the JSC "VNIIZhT" and specialists of LLC "Ural Locomotives" are conducting tests on the electric locomotives 2EC6 on the Oktyabrskaya railroad using the "Online LCC" server. This allows online analysis of information collected on the operation and servicing of locomotives under the life cycle contract, providing effective and prompt control of the electric locomotive fleet.

Keywords: locomotive; life cycle; operation; effective use; expenses assessment

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-195-202>

REFERENCES

1. Aizinbud S. Ya., Kel'peris P. I. *Ekspluatatsiya lokomotivov* [Operation of locomotives]. Moscow, Transport, 1980, 248 p.
2. GOST 31539–2012. *Tsikl zhiznenny zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Terminy i opredeleniya* [Life cycle of railway rolling stock. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2014. URL: <http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5302694> (retrieved on 30.07.2019).
3. Vavilov E. N., Karkhova I. Yu. *Effekt ot vnedreniya novykh lokomotivov* [Effect of introduction of new locomotives]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport], 1997, no. 9, pp. 54–57.
4. Ivanova N. G., Murashov A. A. *Predel'naya (limitnaya) tsena i stoimost' zhiznennogo tsikla podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta* [Limit price and cost of life cycle of rolling stock of railway transport]. Moscow, Maska, 2007, 300 p.
5. Murashov A. E., Ivanova N. G., Stavrova E. K. *Stoimost' zhiznennogo tsikla i tsena novykh lokomotivov* [Cost of life cycle and price of new locomotives]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2010, no. 5, pp. 37–39.
6. Brusilovskiy M. E. *Kompleksnaya otsenka stoimosti zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta: Dis. ... kand. ekon. nauk* [Complex assessment of the life cycle cost of technical systems of railway transport; dissertation of the candidate of economics: 08.00.05]. Moscow, MSURE, 2011, 161 p. URL: <https://search.rsl.ru/record/01004946509> (retrieved on 30.07.2019).
7. Zagrebel'skiy A. M., Kadyshchev S. A., Rebruk B. N. *Stoimost' zhiznennogo tsikla elektrovoza* [Electric locomotive life cycle cost]. *Railway transport*, 1998, no. 12, pp. 34–36.
8. Babel M. *Teoreticheskie osnovy i metodologiya vybora ob'ektov i tekhnologiy modernizatsii teplovozov po kriteriyu stoimosti*

zhiznennogo tsikla: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Theoretical bases and methodology of selection of volumes and technologies of modernization of locomotives using criterion of the life cycle cost: dissertation of doctor of technical sciences: 05.22.07]. Moscow, JSC "VNIIZhT", 2014, 48 p. URL: <https://search.rsl.ru/record/01005553513> (retrieved on 30.07.2019).

9. *On the system of maintenance and repair of locomotives of JSC "RZD"*: approved by the order of JSC "RZD" dated 30.12.2016, no. 2796r. As amended on 21.09.2018, no. 2070r. (in Russ.).

10. *Method of determination of the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complicated technical systems of the railway transport*: approved by the order of JSC "RZD", dated 27.12.2007, no. 2459r. (in Russ.).

11. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznikh dorog* [Instruction for calculation of the throughput of railroads]. Moscow, Tekhinform, 2011, 289 p.

12. Methodical guidelines for determination of technical and economic effectiveness of new and improved electric locomotives. Moscow, Transport, 1986, 116 p. (in Russ.).

13. GOST R 27.202–2012. *Upravlenie nadezhnost'yu. Stoimost' zhiznennogo tsikla* [Reliability of equipment. Reliability control. Life cycle cost]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200102419> (retrieved on 30.07.2019).

14. *Methodical recommendations for assessment of investment projects for railway transport: approved by direction of the RF Ministry of Railways*, dated 31.08.1998, no. B-1024y. (in Russ.).

15. *Methodical recommendations for calculation of economic effect of introduction of the research and development achievements and advance experience on railroads – branch of JSC "RZD"*: approved by JSC "RZD" on September 7, 2005, no. 1392r. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Aleksander A. AKISHIN,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Laboratory "Electric locomotives", JSC "VNIIZhT"

Vitaliy V. BREKSON,
Fist Deputy General Director, LLC "Ural Locomotives"

Olga V. VINOGRADOVA,
Leading Engineer, Laboratory "Electric Locomotives",
JSC "VNIIZhT"

Vladislav A. KUCHUMOV,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
Laboratory "Electric Locomotives", JSC "VNIIZhT"

Nikolay D. MIRONOV,
Engineer, Laboratory "Electric Locomotives", JSC "VNIIZhT"

Nina B. NIKIFOROVA,
Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher,
Laboratory "Electric locomotives", JSC "VNIIZhT"

Received 07.06.2019

Accepted 08.08.2019

■ E-mail: Mironov.Nikolay@vniizht.ru (N. D. Mironov)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России: коллективная монография / под ред. А. Б. Косарева, О. Н. Назарова. М.: РАС, 2018. 119 с. (Труды АО «ВНИИЖТ»).

Рассмотрены вопросы научно-технического сопровождения работ, связанных с созданием, испытаниями, вводом в эксплуатацию систем инфраструктуры и высокоскоростного подвижного состава отечественных железных дорог.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Эффективность организации перевозок длинномерных грузов на фитинговых платформах с различной длиной погрузочных площадок

С. В. МОЗГРИН, Г. Е. ПИСАРЕВСКИЙ

Акционерное общество «РЖД Логистика» (АО «РЖД Логистика»), Москва, 107078, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы методологии оценки эффективности организации перевозок длинномерных грузов на фитинговых платформах. Применение инновационных видов креплений при перевозках на фитинговых платформах способствует расширению номенклатуры грузов, перевозимых на этом подвижном составе. Экономическая оценка для такого вида перевозок выполнена с учетом интересов каждого участника перевозочного процесса и апробирована на основе конкретных данных. Полученные результаты показывают, насколько эффективна реализация рассматриваемого технического и технологического решения.

Ключевые слова: фитинговая платформа; сроки доставки; экономическая эффективность; себестоимость грузовых перевозок; грузовые тарифы; дополнительно возникающие затраты перевозчика; ставки сбора за предоставление комплекта крепления на вагоне

Возможности использования фитинговых платформ при перевозках длинномерных грузов. Для перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м, а также других длинномерных грузов возможно использование фитинговых платформ с различной длиной погрузочных площадок. Наличие стопорных устройств для крепления за нижние фитинги и инновационных комплектов крепления создает условия для обеспечения безопасной перевозки таких видов грузов [1].

Технико-экономическая оценка перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м на данном типе подвижного состава выполнена в соответствии с требованиями положений действующих методик [2, 3, 4] на основе изменения финансовых результатов перевозчика и соответствующих затрат грузовладельца с учетом их экономических интересов [5].

Предлагается рассмотреть следующие два возможных варианта перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м. В настоящее время такие рельсы перевозят на сцепках из двух универсальных платформ с длиной каждой платформы по осям сцепления 14620 мм (рис. 1). Крепление на этом сцепе осуществляется традиционным способом — с применением прокладок, брусков, проволочных растяжек и деревянных стоек разового использования [1].

■ E-mail: MozgrinSV@rzdlog.ru (С. В. Мозгрин)

Этот вариант перевозки принимается в качестве базового. Масса одной отправки на сцепе, согласно техническим условиям размещения и крепления рельсов, составляет 120 т [6]. Кроме того, применяется обвязка—крепление рельсов массой 1,2 т. При инновационной системе перевозки железнодорожных рельсов длиной 25 м используют 80-футовые фитинговые платформы с длиной по осям сцепления 25620 мм (рис. 2) с расчетной массой отправки 70 т. При таком варианте организации перевозки рельсов загрузка фитинговой платформы составляет 65 т при массе многооборотного комплекта крепления (МКК) 5 т.

Методология оценки эффективности применения различных способов перевозок железнодорожных рельсов. Применительно к поставленной задаче расчеты могут быть ограничены определением показателей сравнительной экономической эффективности, учитывающей лишь изменяющиеся финансовые последствия внедрения нового метода перевозки. В качестве расчетного периода принимается календарный год. Объем перевозок принимается равным для каждого рассматриваемого варианта, исходя из условий работы расчетной единицы — один сцеп универсальных платформ (или одна 80-футовая фитинговая платформа), с приведением финансовых результатов к одной тонне перевозимого груза.

На основе результатов выборки отчетных данных за 2018 г. и анализа географии перевозок железнодорожных рельсов и других длинномерных грузов установлена средняя дальность перевозок, составляющая $L \approx 1640$ км. Продолжительность такой перевозки (включая погрузку и выгрузку) определяется в соответствии с Правилами исчисления сроков доставки грузов на основе установленной нормативами скорости доставки грузов [7]. В данном случае нормативная скорость доставки соответствует 310 км/сут с добавлением двух суток на выполнение начальной-конечной операции. Общий срок доставки ($t_{\text{дост}}$) составляет 7,3 сут. Арендуемые у операторов вагоны используются на условиях «полурейса», то есть только

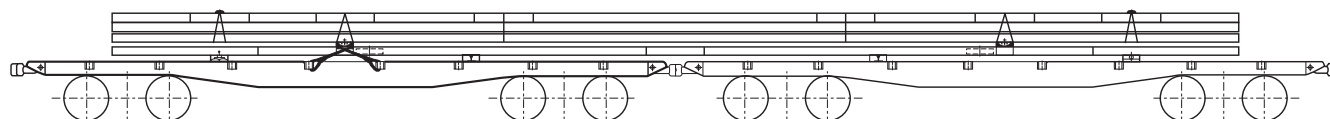


Рис. 1. Схема размещения и крепления рельсов длиной 25 м на сцепе из двух универсальных платформ [6]

Fig. 1. Layout of the installation and fixation of rails 25 m long at the coupling of two universal platforms [6]

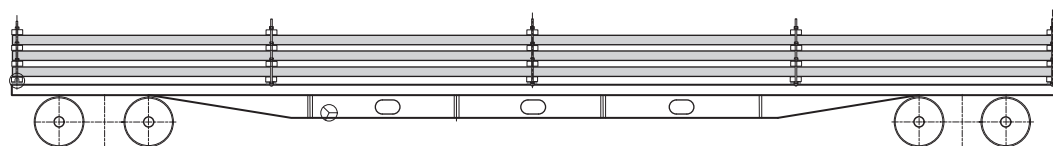


Рис. 2. Схема размещения и крепления рельсов длиной 25 м на 80-футовой фитинговой платформе

Fig. 2. Layout of the installation and fixation of rails 25 m long on 80-foot fitting platform

в груженом состоянии (без оплаты порожнего пробега) вагона.

Для выполнения технико-экономических расчетов введем следующие показатели:

- коэффициент соотношения массы перевозимого груза за одну отправку, равный отношению массы груза, перевозимого по базовому варианту, к массе груза, перевозимого по новому варианту: $d^{гр} = 120/65 = 1,85$;
- приведенное годовое количество отправок для выполнения одинакового объема перевозок — $Q^{год}$;
- для базового варианта $Q_{баз}^{год} = 365/t_{дот}$;
- для нового варианта $Q_{нов}^{год} = Q_{баз}^{год} \cdot d^{гр}$.

Расчетные показатели, принимаемые по рассматриваемым вариантам, приведены в табл. 1.

Как отмечалось выше, существуют различные экономические интересы у участников перевозочного процесса. В связи с этим структура составляющих общей оценки экономической эффективности нового способа перевозки рельсов длиной 25 м с учетом интересов участников перевозочного процесса различна.

Таблица 1

Расчетные показатели, принимаемые по рассматриваемым вариантам

Table 1

Estimated indicators assumed for the options under examination

Показатели	Сравниваемые варианты	
	Базовый	Новый (инновационный)
Вид перевозки — повагонная отправка	Сцеп из двух платформ	80-футовая фитинговая платформа
Масса груза (без крепления), т	120	65
Масса крепления, т	1,2	5,0
Периодичность использования крепления	Разовое	Многоразовое
Коэффициент соотношения массы перевозимого груза, $d^{гр}$	$d_{баз}^{гр} = 1,0$	$d_{нов}^{гр} = 1,85$
Приведенное годовое количество отправок, $Q^{год}$	$Q_{баз}^{год} = 50$	$Q_{нов}^{год} = 50 \cdot 1,85 = 92,5$

Оценка экономической эффективности применения нового способа перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м для перевозчика (ОАО «РЖД»). Величина годового экономического эффекта для ОАО «РЖД» ($\mathcal{E}_{год}^{РЖД}$) определяется как разность финансовых результатов компании при использовании нового варианта по отношению к базовому по формуле

$$\mathcal{E}_{год}^{РЖД} = \mathcal{Z}_{нов} - \mathcal{Z}_{баз}, \text{ тыс. руб.}, \quad (1)$$

где $\mathcal{Z}_{нов}$, $\mathcal{Z}_{баз}$ — общий финансовый результат ОАО «РЖД», полученный при организации перевозки железнодорожных рельсов длиной 25 м на 80-футовых фитинговых платформах, соответственно по базовому и новому вариантам.

Предлагается детально рассмотреть каждую из составляющих формулы (1).

$$\mathcal{Z}_{нов} = (T_{жд}^{фит} - C_{жд}^{фит}) + (T_{жд}^{пв} - C_{жд}^{пв}), \text{ тыс. руб.}, \quad (2)$$

где $T_{жд}^{фит}$ — годовая провозная плата, получаемая ОАО «РЖД» за перевозки по инфраструктуре ОАО «РЖД» в зависимости от загрузки вагона и дальности перевозки железнодорожных рельсов длиной 25 м, тыс. руб.; $C_{жд}^{фит}$ — годовые затраты ОАО «РЖД» при перевозках железнодорожных рельсов длиной 25 м на 80-футовых фитинговых платформах, тыс. руб.; $T_{жд}^{пв}$ — годовая провозная плата за перевозки по инфраструктуре ОАО «РЖД» комплектов крепления МКК в полувагонах от мест выгрузки рельсов на станции массовой погрузки в зависимости от загрузки полувагона и дальности перевозки, тыс. руб.; $C_{жд}^{пв}$ — годовые затраты ОАО «РЖД» при перевозках полувагонов с комплектами креплений МКК в места массовой погрузки железнодорожных рельсов длиной 25 м, тыс. руб.

Годовая провозная плата $T_{жд}^{фит}$ определяется из выражения

$$T_{жд}^{фит} = P_{фит}^{гр} Q_{нов}^{год} 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (3)$$

где $P_{фит}^{гр}$ — провозная плата на фитинговой платформе с загрузкой до 70 т и дальности перевозки (L) 1640 км для груза 3-го тарифного класса согласно Прейскуранту

№ 10-01 [8], руб. за вагон ($P_{\text{фит}}^{\text{гр}} = 145929$ руб. за вагон); $Q_{\text{нов}}^{\text{год}}$ — приведенное годовое количество отправок по новому варианту (см. табл. 1), $Q_{\text{нов}}^{\text{год}} = 92,5$ отправок.

В результате расчета значение показателя $T_{\text{жд}}^{\text{фит}}$ составит 13498,4 тыс. руб.

Годовые затраты ОАО «РЖД» составят:

$$C_{\text{жд}}^{\text{фит}} = C_{\text{фит}}^{\text{рел}} M_{\text{фит}} L Q_{\text{нов}}^{\text{год}} 10^{-1} \cdot 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (4)$$

где $C_{\text{фит}}^{\text{рел}}$ — себестоимость перевозок рельсов на фитинговой платформе для условий 2018 г., откорректированная для соответствующей загрузки и длины вагона по осям сцепления по сравнению со значениями показателей по среднему грузовому вагону [7, 8], $C_{\text{фит}}^{\text{рел}} = 4,3126$ руб./10 т·км; $M_{\text{фит}}$ — масса погруженных рельсов на фитинговую платформу и крепления, $M_{\text{фит}} = 70$ т; L — дальность перевозки, км.

В данной формуле произведение составляющих $M_{\text{фит}}$, L и $Q_{\text{нов}}^{\text{год}}$ соответствует привлеченному годовому объему грузооборота в этом типе подвижного состава, т·км.

Соответственно,

$$C_{\text{жд}}^{\text{фит}} = 4,3126 \cdot 70 \cdot 1640 \cdot 92,5 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-3} = 4579,5 \text{ тыс. руб.}$$

Годовая провозная плата, полученная ОАО «РЖД» за перевозку комплекта крепления, определяется по формуле

$$T_{\text{жд}}^{\text{пв}} = P_{\text{креп}} Q_{\text{баз}}^{\text{год}} d_{\text{нов}}^{\text{гр}} / 12 \cdot 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (5)$$

где $P_{\text{креп}}$ — провозная плата за перевозку комплекта крепления МКК в полувагонах с загрузкой до 60 т (справочно: вес комплекта МКК в расчете на один вагон — 5 т, количество комплектов крепления в вагоне — 12 шт.). При дальности перевозки 1640 км для груза (группа метизы) 3-го тарифного класса $P_{\text{креп}} = 103725$ руб. за вагон.

Тогда

$$T_{\text{жд}}^{\text{пв}} = 103725 \cdot 50 \cdot 1,85 / 12 \cdot 10^{-3} = 799,5 \text{ тыс. руб.}$$

Годовые затраты ОАО «РЖД» за перевозку комплекта крепления:

$$C_{\text{жд}}^{\text{пв}} = C_{\text{комп.креп}}^{\text{пв}} Q_{\text{пв}}^{\text{год}} 10^{-1} \cdot 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (6)$$

где $C_{\text{комп.креп}}^{\text{пв}}$ — себестоимость перевозок комплектов креплений МКК в полувагонах. Для условий 2018 г. она откорректирована для соответствующей загрузки и длины вагона по осям сцепления по сравнению со значениями показателей по среднему грузовому вагону [9], тогда $C_{\text{комп.креп}}^{\text{пв}} = 4,0224$ руб./10 т·км; $Q_{\text{пв}}^{\text{год}}$ — годовой грузооборот при перевозках комплектов креплений МКК в полувагонах, т·км; $Q_{\text{пв}}^{\text{год}} = (50 \cdot 1,85 / 12) (60 \cdot 1640) = 758,5$ тыс. т·км.

Подставив приведенные выше значения в формулу (6), годовые затраты ОАО «РЖД» составят

$$C_{\text{жд}}^{\text{пв}} = 4,0224 \cdot 758500 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-3} = 305,1 \text{ тыс. руб.}$$

В целом организация перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м на фитинговых платформах позволяет получить для перевозчика (ОАО «РЖД») прибыль в расчете на установленный измеритель в год (формула (2)):

$$Z_{\text{нов}} = (13498,4 - 4579,5) + (799,5 - 305,1) = 9413,3 \text{ тыс. руб.}$$

Оценим теперь финансовый результат ОАО «РЖД» при организации перевозки рельсов длиной 25 м по базовому варианту — на сцепе из двух универсальных платформ, которые определяются по формуле

$$Z_{\text{баз}} = (T_{\text{жд}}^{\text{спл}} - C_{\text{жд}}^{\text{спл}}) - (\Delta E_{\text{доп}}) - (P_{\text{жд}}^{\text{шт}}), \text{ тыс. руб.}, \quad (7)$$

где $T_{\text{жд}}^{\text{спл}}$ — годовая провозная плата, получаемая ОАО «РЖД» за перевозки по инфраструктуре ОАО «РЖД» в зависимости от загрузки вагона и дальности перевозки рельсов длиной 25 м на сцепе из двух универсальных платформ; $C_{\text{жд}}^{\text{спл}}$ — годовые затраты ОАО «РЖД» при перевозках рельсов длиной 25 м на сцепах из двух универсальных платформ, тыс. руб.; $\Delta E_{\text{доп}}$ — дополнительные затраты ОАО «РЖД» из-за коммерческого брака вследствие недостаточной надежности крепления груза в базовом варианте и, как следствие, нарушения с некоторой вероятностью крепления груза в процессе перевозки.

В связи с проведением работ по устранению нарушений крепления груза возможна просрочка в его доставке, за что перевозчик уплачивает пени в размере девяти процентов платы за перевозку грузов за каждые сутки просрочки (неполные сутки считаются за полные), но не более чем в размере платы за перевозку данных грузов [7]. Поэтому в формулу (7) вводится составляющая размера штрафа ($P_{\text{жд}}^{\text{шт}}$).

Годовая провозная плата $T_{\text{жд}}^{\text{спл}}$ определяется из выражения

$$T_{\text{жд}}^{\text{спл}} = P_{\text{спл}}^{\text{гр}} Q_{\text{баз}}^{\text{год}} 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (8)$$

где $P_{\text{спл}}^{\text{гр}}$ — провозная плата за сцеп из двух универсальных платформ с загрузкой до 121,2 т при дальности перевозки 1640 км. Для груза 3-го тарифного класса, согласно Прейскуранту № 10-01 [8], $P_{\text{спл}}^{\text{гр}} = 219392$ руб. за сцеп; $Q_{\text{баз}}^{\text{год}}$ — годовое количество грузовых рейсов (отправок) сцепа с рельсами длиной 25 м, см. табл. 1).

$$\text{Тогда } T_{\text{жд}}^{\text{спл}} = 219392 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 10969,6 \text{ тыс. руб.}$$

Годовые затраты ОАО «РЖД» при перевозках рельсов длиной 25 м на сцепах из двух универсальных платформ определяются исходя из следующей зависимости:

$$C_{\text{жд}}^{\text{спл}} = C_{\text{спл}}^{\text{рел}} Q_{\text{баз}}^{\text{год}} M_{\text{спл}} L 10^{-1} \cdot 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (9)$$

где $C_{\text{спл}}^{\text{рел}}$ — себестоимость перевозок рельсов на сцепах универсальных платформ. Для условий 2018 г. она откорректирована для соответствующей загрузки

и длины вагона по осям сцепления по сравнению со значениями показателей по среднему грузовому вагону [9, 10], $C_{\text{спл}}^{\text{рел}} = 4,1127$ руб./10 т·км; $M_{\text{спл}}$ — масса погруженных рельсов и крепления МКК ($M_{\text{спл}} = 121,2$ т).

Тогда

$$C_{\text{жд}}^{\text{спл}} = 4,1127 \cdot 50 \cdot 121,2 \cdot 1640 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-3} = 4087,4 \text{ тыс. руб.}$$

Дополнительные затраты ОАО «РЖД» из-за коммерческого брака вследствие недостаточной надежности крепления груза определяются по формуле

$$\Delta E_{\text{доп}} = Q_{\text{баз}}^{\text{год}} \Psi_{\text{ком}} [e_{\text{ман}} \sum t_{\text{ман}} + e_{\text{отст}} \times \sum t_{\text{отст}} L_{\text{в}} n_{\text{ваг}} 10^{-3} + (P_{\text{мат}} + P_{\text{опт}})], \quad (10)$$

где $\Psi_{\text{ком}}$ — доля груженых сцепов с железнодорожными рельсами длиной 25 м, отцепляемых в пути следования по причине нарушения крепления грузов (на основании отчетности ОАО «РЖД» значение этого показателя принято $\Psi_{\text{ком}} = 0,01$); $e_{\text{ман}}$, $e_{\text{отст}}$ — расходные ставки на измерители «локомотиво-час маневровой работы» и «1 час занятия 1 км станционных путей». Рассчитывается в соответствии с требованиями действующих нормативных документов ОАО «РЖД» [11, 12], руб.; для условий работы в расчетном периоде принято: $e_{\text{ман}} = 2732,33$ руб.; $e_{\text{отст}} = 28,32$ руб.; $\sum t_{\text{ман}}$ — продолжительность маневровой работы по выбраковке вагона (сцепы) из грузового состава и постановке его во вновь сформированный поезд (в расчетах принято $\sum t_{\text{ман}} = 1$ ч), ч; $\sum t_{\text{отст}}$ — время простоя вагона (сцепы) с грузом на станционных путях в ожидании проведения работ по креплению груза на вагоне и последующей отправки (на основании анализа случаев нарушения крепления грузов установлено, что в среднем $\sum t_{\text{отст}} = 7,8$ сут, или 187,2 ч), ч; $L_{\text{в}}$ — длина универсальной платформы по осям сцепления ($L_{\text{в}} = 14,62$ м), м; $n_{\text{ваг}}$ — количество вагонов в одном сцепе ($n_{\text{ваг}} = 2$); $P_{\text{мат}}$ — стоимость материалов по оснастке одного сцепы при перевозке рельсов длиной 25 м, руб. за сцеп.

На основе подробной калькуляции данных о стоимости транспортно-технологической оснастки для оборудования сцепов с рельсами длиной 25 м (40879 руб. за комплект) и принятой доле (40 %) расхода материалов при устранении брака получено, что $P_{\text{мат}} = 0,40 \cdot 40879 = 16352$ руб. за комплект; $P_{\text{опт}}$ — оплата труда работников железной дороги с начислениями, занятых проведением работ по устранению коммерческого брака. В расчетах принимается в доле (0,45) к расходу материалов, $P_{\text{опт}} = 7358$ руб. в расчете за один сцеп вагонов.

В этих условиях дополнительные затраты ОАО «РЖД» из-за коммерческого брака могут составить:

$$\Delta E_{\text{доп}} = 50 \cdot 0,01 \cdot [2732,33 \cdot 1 + 28,32 \cdot 187,2 \cdot 14,62 \times 2 \cdot 10^{-3} + (16352 + 7358)] \cdot 10^{-3} = 13,3 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты по оплате пени определяем по следующей формуле:

$$\Pi_{\text{жд}}^{\text{шт}} = \Delta t_{\text{пр}} f_{\text{шт}} 10^{-2} T_{\text{жд}}^{\text{спл}} Q_{\text{баз}}^{\text{год}} \Psi_{\text{ком}} 10^{-3}, \text{ тыс. руб.}, \quad (11)$$

где $\Delta t_{\text{пр}}$ — общая продолжительность просрочки в доставке груза с округлением до полных суток (в расчетах принимается $\Delta t_{\text{пр}} = 8$ сут); $f_{\text{шт}}$ — размер ставки пени в расчете за каждые сутки просрочки в доставке ($f_{\text{шт}} = 9\%$) (Федеральный закон «Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации» от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ в редакции от 03.08.2018 г. М.: Право и государство, 2018. 61 с.), %; остальные обозначения приведены выше.

В этом случае

$$\Pi_{\text{жд}}^{\text{шт}} = 8 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \cdot 219392 \cdot 50 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 79,0 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, перевозка рельсов длиной 25 м традиционным методом позволяет получить прибыль в соответствии с формулой (7) в расчете на установленный измеритель в год:

$$Z_{\text{баз}} = (10969,6 - 4087,4) - 13,3 - 79,0 = 6790,3 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно требованиям алгоритма расчета по формуле (1) годовой экономический эффект для ОАО «РЖД» от организации перевозок рельсов длиной 25 м на фитинговых платформах составляет

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{РЖД}} = 9413,3 - 6789,9 = 2623,4 \text{ тыс. руб.},$$

или в расчете на 1 тонну:

$$\mathcal{E}_{\text{год (т)}}^{\text{РЖД}} = \mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{РЖД}} / Q_{\text{баз}}^{\text{год}} M_{\text{баз}} = 2623,0 / 50 \cdot 120 = 437,2 \text{ руб.},$$

где $M_{\text{баз}}$ — масса груза, перевозимого по базовому варианту, т.

Оценка экономической эффективности применения новой организации перевозок железнодорожных рельсов длиной 25 м для грузовладельца. Величина годового экономического эффекта для грузовладельца ($\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{гр}}$) определяется как изменение затрат грузовладельцев от применения нового варианта организации перевозки рельсов длиной 25 м по отношению к базовому способу доставки по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{гр}} = \Delta \sum E_{\text{баз}} - \Delta \sum E_{\text{нов}}, \quad (12)$$

где $\Delta \sum E_{\text{баз}}$ — затраты грузовладельца при организации перевозок рельсов длиной 25 м при базовом варианте их доставки; $\Delta \sum E_{\text{нов}}$ — затраты грузовладельца при организации перевозок рельсов длиной 25 м при новом варианте их доставки.

Структура затрат грузовладельца при реализации базового варианта перевозки $\Delta \sum E_{\text{баз}}$ следующая:

$$\Delta \sum E_{\text{баз}} = T_{\text{жд}}^{\text{спл}} + A_{\text{пол}}^{\text{пл}} - \Pi_{\text{жд}}^{\text{шт}} + E_{\text{скр}}^{\text{гр}} + E_{\text{отр}}^{\text{гр}} + \Delta O_{\text{об}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{жд}}^{\text{спл}}$ — годовая провозная плата перевозки по инфраструктуре ОАО «РЖД» в зависимости от

загрузки вагона и дальности перевозки рельсов длиной 25 м на сцепе из двух универсальных платформ (см. формулу (8)); ранее расчеты показали, что $T_{\text{жд}}^{\text{спл}} = 10969,6$ тыс. руб.; $A_{\text{пол}}^{\text{пл}}$ — годовые затраты грузовладельца по оплате стоимости предоставляемых универсальных платформ для освоения установленного объема перевозок, тыс. руб., равные

$$A_{\text{пол}}^{\text{пл}} = 365 C_{\text{сут}}^{\text{ар}} 10^{-3}. \quad (14)$$

Здесь $C_{\text{сут}}^{\text{ар}}$ — суточная ставка аренды универсальной платформы в расчетном периоде, руб. за вагон (для условий 2018 г. $C_{\text{сут}}^{\text{ар}} = 1200$ руб. за вагон, а в расчете за сцеп — 2400 руб.). В целом затраты грузовладельца по аренде вагонов составят $A_{\text{пол}}^{\text{пл}} = 365 \cdot 2400 \times 10^{-3} = 876,0$ тыс. руб.; $P_{\text{шт}}^{\text{шт}}$ — поступление штрафных платежей от ОАО «РЖД» при нарушении сроков доставки грузов (см. формулу (11)), $P_{\text{шт}}^{\text{шт}} = 79,0$ тыс. руб.

$E_{\text{скр}}^{\text{гр}}$ — годовые платежи по расходу транспортно-технологической оснастки для оборудования сцепов с рельсами длиной 25 м, которые используются одновременно ($P_{\text{мат}} = 40879$ руб. за комплект, см. формулу (10)), при этом учитывается предельный уровень рентабельности — 10 %, установленный на такой вид работ:

$$E_{\text{скр}}^{\text{гр}} = 40879 \cdot (1 + 10 \cdot 10^{-2}) \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 2248,3 \text{ тыс. руб.};$$

$E_{\text{отр}}^{\text{гр}}$ — годовые расходы по оплате труда работников (с начислениями) на выполнение работ по креплению рельсов на вагонах, принимается в доле ($\alpha_{\text{тр}}$) к $E_{\text{скр}}^{\text{гр}}$, при этом $\alpha_{\text{тр}} = 0,45$, тогда

$$E_{\text{отр}}^{\text{гр}} = \alpha_{\text{тр}} \Delta E_{\text{скр}}^{\text{гр}} = 0,45 \cdot 2248,3 = 1011,7 \text{ тыс. руб.};$$

$\Delta O_{\text{об}}$ — увеличение затрат грузовладельцев в связи с ростом грузовой массы в движении (замедление оборачиваемости оборотных средств грузовладельцев) рассчитывается в соответствии с [12] по следующей формуле:

$$\Delta O_{\text{об}} = \frac{\Pi \Delta t_{\text{пр}}}{t_{\text{обр}} s_{\text{кл}}} 10^{-2} N_{\text{гр}} \Psi_{\text{ком}} M_{\text{спл}} 10^{-3}, \quad (15)$$

где Π — стоимость 1 т рельсов, руб. (принимается на основании аналитических материалов Департамента экономической конъюнктуры и стратегического развития ОАО «РЖД»). Для условий на конец 2018 г. $\Pi = 34\,970$ руб. (без учета НДС); $\Delta t_{\text{пр}}$ — см. формулу (11), $\Delta t_{\text{пр}} = 8$ сут; $t_{\text{обр}}$ — среднее время оборачиваемости оборотных средств (рекомендуется принимать на уровне 20 сут), сут; $s_{\text{кл}}$ — коэффициент приведения одновременных затрат к текущим, принимается на уровне ключевой ставки Центрального банка России (принято: $s_{\text{кл}} = 7,75\%$), %, $M_{\text{спл}}$ — масса груза (без крепления) в расчете на один сцеп, $M_{\text{спл}} = 120$ т.

$$\Delta O_{\text{об}} = 34970 \cdot 8 / 20 \cdot 7,75 \cdot 10^{-2} \cdot 50 \cdot 0,01 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 65,0 \text{ тыс. руб.}$$

На основании полученных результатов расчета затраты грузовладельцев ($\Delta \Sigma E_{\text{баз}}$) при организации перевозок на сцепах универсальных платформ традиционным методом составляют (см. формулу (13)):

$$\Delta \Sigma E_{\text{баз}} = 10969,6 + 876,0 - 79,0 + 2248,3 + 1011,7 + 65,0 = 15091,6 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты грузовладельца при перевозке рельсов длиной 25 м при новом (инновационном) варианте их доставки на 80-футовой фитинговой платформе:

$$\Delta \Sigma E_{\text{нов}} = T_{\text{жд}}^{\text{фит}} + A_{\text{пол}}^{\text{фит}} + E_{\text{скр}}^{\text{гр}} + E_{\text{отр}}^{\text{гр}}, \quad (16)$$

где $T_{\text{жд}}^{\text{фит}}$ — годовая провозная плата перевозки на фитинговой платформе по инфраструктуре ОАО «РЖД», определяются по формуле (3) и равна

$$T_{\text{жд}}^{\text{фит}} = 145\,929 \cdot 50 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} = 13\,498,4 \text{ тыс. руб.};$$

$A_{\text{пол}}^{\text{фит}}$ — годовые затраты грузовладельца по оплате стоимости предоставляемых фитинговых платформ,

Таблица 2

Расчет суточной ставки сбора за предоставление комплекта крепления $C_{\text{кр}}^{\text{ар}}$, руб. за комплект

Table 2

Calculation of the daily charge rate for providing a fixation set $C_{\text{кр}}^{\text{ар}}$, rubles per set

Наименование показателя	Значение показателя	Примечание
Стоимость комплекта крепления, руб.	227 000	—
Срок полезного использования, лет	30	—
Годовые амортизационные отчисления, руб.	7566,7	—
Годовые расходы на техническое обслуживание и годовую ревизию, руб.	1891,7	Принимается в доле к амортизационным отчислениям
Итого	9458,4	$7566,7 + 1891,7 = 9458,4$
То же с учетом рентабельности	10 404,2	Рентабельность принята на уровне 10 %
Значение величины $C_{\text{комп}}$ в сутки, руб.	28,5	$10\,404,2 / 365 = 28,5$
Транспортные расходы по доставке в места массовой погрузки, руб./сут за комплект	23,68	$799,6 / (50 \cdot 1,85) \cdot 365 = 23,68$ $799,6 - T_{\text{жд}}^{\text{пв}}$ (см. формулу (5)) $50 - Q_{\text{баз}}^{\text{год}}$ (см. табл. 1) $1,85 - d_{\text{нов}}^{\text{гр}}$ (см. табл. 1)
Оплата аренды вагона для выполнения операции по доставке комплекта крепления, руб./сут за комплект	26,35	Определяется с учетом формулы (14)
Величина суточной ставки сбора, $C_{\text{кр}}^{\text{ар}}$, руб. за комплект	78,53	$28,5 + 23,68 + 26,35 = 78,53$

которые определяются по формуле (14) и равны $A_{\text{пол}}^{\text{фит}} = 1900 \cdot 365 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} = 1283,0$ тыс. руб.;

$E_{\text{скр}}^{\text{тр}}$ — годовые расходы по оплате аренды комплекта крепления рельсов на фитинговых платформах определяются исходя из ставки сбора и продолжительности аренды:

$$E_{\text{скр}}^{\text{тр}} = C_{\text{кр}}^{\text{ар}} 365 d_{\text{нов}}^{\text{тр}} 10^{-3}, \text{ тыс. руб.} \quad (17)$$

Расчет суточной ставки сбора $C_{\text{кр}}^{\text{ар}}$, руб. за комплект, представлен в табл. 2.

Тогда

$$E_{\text{скр}}^{\text{тр}} = 78,53 \cdot 365 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} = 53,0 \text{ тыс. руб.}$$

В формуле (13) $E_{\text{отр}}^{\text{тр}}$ — годовые расходы по оплате труда работников (с начислениями) на выполнение работ по креплению рельсов на фитинговых платформах принимаются в доле к стоимости комплекта $C_{\text{комп}}$ ($C_{\text{комп}} = 28,5$ руб.), равной $\alpha_{\text{тр}} = 0,45$:

$$E_{\text{отр}}^{\text{тр}} = C_{\text{комп}} \alpha_{\text{тр}} 365 d_{\text{нов}}^{\text{тр}} 10^{-3}, \text{ тыс. руб.} \quad (18)$$

Тогда $E_{\text{отр}}^{\text{тр}} = 28,5 \cdot 0,45 \cdot 365 \cdot 1,85 \cdot 10^{-3} = 8,6$ тыс. руб.

На основании полученных результатов расчета затраты грузовладельцев ($\Delta \sum E_{\text{нов}}$) при организации перевозок на 80-футовых платформах инновационным методом составляют в соответствии с формулой (16):

$$\Delta \sum E_{\text{нов}} = 13498,4 + 1283,0 + 53,0 + 8,6 = 14843,0 \text{ тыс. руб.}$$

Согласно формуле (12) годовой экономический эффект для грузовладельца при перевозке рельсов длиной 25 м на фитинговых платформах составляет

$$\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{тр}} = 15091,6 - 14843,0 = 248,6 \text{ тыс. руб.,}$$

или в расчете на 1 тонну — 41,4 руб. ($248,6 \cdot 10^3 / (50 \cdot 120)$).

Заключение. Расчеты по предложенной методике показали, что для условий работы 2018 г. реализация инновационного проекта по перевозкам рельсов длиной 25 м на фитинговых платформах экономически эффективна как для перевозчика ОАО «РЖД» (экономический эффект 2623,4 тыс. руб./год), так и для грузовладельца (экономический эффект 248,6 тыс. руб./год). Оценочные расчеты для условий работы 2019 г. показывают, что получаемый эффект снижается незначительно, и это свидетельствует о перспективности предложенного нового способа перевозки рельсов и других длинномерных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мозгрин С. В. Модульная концепция использования фитинговых платформ для расширения номенклатуры перевозимых грузов // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 3. С. 177–180. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-3-177-181.

2. Методические рекомендации по обоснованию эффективности инноваций на железнодорожном транспорте: утв. МПС РФ 26.04.1999 г. № ЦТехО-11. М., 1999. 231 с.

3. ОАО «РЖД». Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного: утв. распоряжением от 27.12.2007 г. № 2459р [Электронный ресурс]. URL: <https://jd-doc.ru/2007/dekabr-2007/12704-rasporyazhenie-oao-rzhd-ot-27-12-2007-n-2459r> (дата обращения: 25.04.2019 г.).

4. СТО ОПЖТ 24-2012. Методика расчета экономически обоснованных цен на новые модели подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта [Электронный ресурс]. URL: <http://opzt.ru/sites/default/files/document/2014/07/340/326.pdf> (дата обращения: 25.04.2019 г.).

5. Толкачева М. М., Рышков А. В., Писаревский Г. Е., Ефимова Е. Н. Методология оценки корпоративной эффективности перевозочной деятельности холдинга «Российские железные дороги» // Сборник трудов ВНИИЖТ «Экономические проблемы развития железнодорожного транспорта на этапах его инновационных и структурных преобразований». М.: Интекст, 2009. С. 120–141.

6. Местные технические условия. Размещение и крепление рельсов Р65 длиной 18–25 метров и более 25 метров на сцепе из двух четырехосных универсальных платформ. Новокузнецк: Металлург Транс, 2015. 57 с.

7. Приказ Минтранса России от 07.08.2015 № 245 (ред. от 28.12.2017) «Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом» (зарегистрировано в Минюсте России 14.03.2016 № 41393) [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_195371/ (дата обращения: 25.04.2019 г.).

8. ОАО «РЖД». Прейскурант Федеральной энергетической комиссии РФ от 17.06.2003 № 47-т/5. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами. Часть I. Правила применения тарифов [Электронный ресурс]. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer_id%3D5104%26STRUCTURE_ID%4704738 (дата обращения: 25.04.2019 г.).

9. Абрамов А. П. Затраты железных дорог и цена перевозки. М.: Транспорт, 1974. 256 с.

10. Писаревский Г. Е., Ломакина Н. М. Актуализация методологии экономической оценки эффективности внедрения технических достижений и передового опыта в условиях структурной реформы Российских железных дорог // Повышение эффективности инноваций и мотивация их внедрения на железных дорогах России: сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». Научно-методическое пособие / под ред. М. М. Толкачевой, Г. Е. Писаревского. М.: Интекст, 2014. С. 17–24.

11. ОАО «РЖД». Методика расчета единичных и укрупненных расходных ставок в условиях структурной реформы ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.07.2008 г. № 1426р. М., 2008. 32 с.

12. ОАО «РЖД». Методические рекомендации по расчету единичных и укрупненных расходных ставок для использования в экономических задачах ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 08.12.2015 г. № 2874р. М., 2015. 28 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МОЗГРИН Сергей Владимирович,
начальник инженерно-технического отдела,
АО «РЖД Логистика»

ПИСАРЕВСКИЙ Геннадий Ефимович,
канд. экон. наук, консультант, АО «РЖД Логистика»

Статья поступила в редакцию 20.05.2019 г., принята к публикации 19.07.2019 г.

Effectiveness of arrangement of the long cargo transportation on the fitting platforms with different length of freight storage

S. V. MOZGRIN, G. E. PISAREVSKIY

Joint Stock Company "RZD Logistics" (JSC "RZD Logistics"), Moscow, 107078, Russia

Abstract. Fitting platforms of variable freight storage lengths are used for transportation of rails and other cargo up to 25 m long. The use of innovative fixation for transportation on the fitting platforms contributes to enlargement of the range of cargo transported on such rolling stock and establishes conditions for safe transportation of such cargo.

To evaluate the effectiveness of the arrangement of long cargo transportation on the fitting platform, this study examines two 25 m long rail transportation options. The transportation option involving two coupled 14.62 m platforms, when the cargo is fixed on the coupled platforms with the standard method is the basic option. The new option involves transportation of the 25 m long rails using 80-foot fitting platforms 25.62 m long at the coupling axes and multiway fixation sets. A calendar year is assumed as the estimate period. The transported volume is assumed equal for each option, under considering the operating conditions of the calculation unit — one coupling of universal platform (or one 80-foot fitting platform), reducing the financial results to a ton of transported cargo. The value of the annual economic effect for the freight owner ($E_{\text{year}}^{\text{own}}$) is determined as the change of the freight owner's expenses due to usage of the new option relative to the basic transportation option.

The economic assessment of the transportation is performed considering the interests of each member of the transportation process and tested based on specific data. The results demonstrate the effectiveness of implementation of the technical and technological solution under consideration.

Keywords: fitting platform; period of delivery; economic efficiency; cargo transportation cost price; freight tariffs; extra costs of carrier; rates of charge for providing set of fixation on the car

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-203-209>

REFERENCES

1. Mozgrin S. V. *Modular concept of the use of fitting platforms for expanding the range of transported goods*. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 3, pp. 177–180. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-3-177-181.
2. *Methodical recommendations for justification of effectiveness of innovations on the railway transport*: approved by the RF Ministry of Railways on 26.04.1999, no. TsTeKhO-11. Moscow, 1999, 231 p. (in Russ.).
3. *Method of determination of the life cycle cost and the limit price of rolling stock and complicated technical systems (Basic provisions)*: approved by direction of JSC "RZD", dated December 27, 2007, no. 2459r. Moscow, Intext, 2007, 278 p. (in Russ.).
4. STO OPZhT 24–2012. *Method of calculation of economically justified prices for new models of rolling stock and complicated technical systems of the railway transport*. Moscow, Legal literature, 2012, 15 p. (in Russ.).

■ E-mail: MozgrinSV@rzdlog.ru (S. V. Mozgrin)

5. Tolkacheva M. M., Ryshkov A. V., Pisarevskiy G. E., Efimova E. N. *Metodologiya otsenki korporativnoy effektivnosti perevozhnoy deyatel'nosti kholdinga "Rossiyskie zheleznye dorogi"*. Sbornik Trudov OAO "VNIIZhT" "Ekonomicheskie problemy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta na etapakh ego innovatsionnykh i strukturnykh preobrazovaniy". Moscow, Intext, 2009, pp. 120–141.

6. *Mestnye tekhnicheskie usloviya. Razmeshchenie i kreplenie rel'sov R65 dlinoy 18–25 metrov i bolee 25 metrov na stsepe iz dvukh chetyrekhosnykh universal'nykh platform*. Novokuznetsk, MetallurgTrans, 2015, 57 p.

7. *Rules of calculation of the terms of cargo and empty freight cars delivery by the railway transport*: approved by the Order of the RF Ministry of Railways dated August 7, 2015, no. 245. Moscow, 2015, 10 p. (in Russ.).

8. *Preyskurant Federal'noy energeticheskoy komissii RF ot 17.06.2003 no. 47-t/5. Preyskurant no. 10-01. Tarify na perevozki gruzov i uslugi infrastruktury, vypolnyaemye Rossiyskimi zheleznymi dorogami. Chast' I. Pravila primeneniya tarifov*. Moscow, Bussiness Project, 2003, 151 p. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru%3Fid%3D6188%26layer_id%3D5104%26STRUCTURE_ID%4704738 (retrieved on 25.04.2019).

9. Abramov A. P. *Zatraty zheleznykh dorog i tsena perevozki* [Expenses of railroads and price of transportation]. Moscow, Transport, 1974, 256 p.

10. Pisarevskiy G. E., Lomakina N. M. *Aktualizatsiya metodologii ekonomicheskoy otsenki effektivnosti vnedreniya tekhnicheskikh dostizheniy i peredovogo opyta v usloviyakh strukturnoy reform Rossiyskikh zheleznykh dorog*. Povyshenie effektivnosti innovatsiy i motivatsiya ikh vnedreniya na zheleznykh dorogakh Rossii: sbornik trudov uchenykh OAO "VNIIZhT". Nauchno-metodicheskoe posobie. Moscow, Intext, 2014, pp. 17–24.

11. *Method of calculation of the single and enlarged rates in the conditions of structural reform of JSC "RZD"*: approved by the order of JSC "RZD", dated 07.07.2008, no. 1426r. Moscow, 2008, 32 p. (in Russ.).

12. *Methodical recommendations for calculation of the single and enlarged rates for using in the economic tasks of JSC "RZD"*: approved by JSC "RZD", dated 08.12.2015, no. 2874r. Moscow, 2015, 28 p. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. MOZGRIN,

Head of Engineering and Technical Department
JSC "Russian Railways Logistics", JSC "RZD Logistics"

Gennadiy E. PISAREVSKIY,

Cand. Sci. (Econ.), Consultant, JSC "RZD Logistics"

Received 20.05.2019

Accepted 19.07.2019

Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков

Е. А. ШУР¹, В. М. ФЕДИН², А. И. БОРЦ¹, Ю. В. РОНЖИНА¹, А. И. ФИМКИН²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»)), Москва, 129626, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

Аннотация. Сварные рельсовые стыки, полученные методами электроконтактной сварки в стационарных и полевых условиях, а также методами алюминотермитной сварки, являются слабыми местами рельсового пути и повреждаются чаще, чем рельсы вне зоны сварных стыков.

В настоящее время слабым местом сварных стыков при электроконтактной сварке являются не только дефекты, связанные с непроварами в зоне сваривания, прижогами в местах плохого контакта подошвы рельсов с токоподводящими контактными губками или дефектами механической обработки швов после сварки, но и местное понижение твердости в зонах термического влияния после сварки и локальной термической обработки после сварки. При этом устранение широких зон пониженной твердости в местах сварных стыков, приводящих к образованию седловин, трещин и выкрашиваний (дефектов 46.3 и 16.3) и способствующих разрушениям рельсов вблизи таких стыков по дефектам 75.2, 79.2 и 21.2, становится главной задачей повышения работоспособности сварных стыков.

В статье приведены пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков.

Ключевые слова: рельсы; сварные стыки; дефекты; индукционная сварка рельсов; термическая обработка

Введение. Количество сварных стыков на сети ОАО «РЖД» непрерывно и интенсивно увеличивается. Это связано с ростом протяженности бесстыкового пути, а также с увеличением мест с вваренными рельсовыми рубками в местах замены участков плетей, пораженных различными дефектами. Переход металлургических комбинатов на производство 100-метровых рельсов вместо 25-метровых замедляет этот процесс, но не ликвидирует его. Сварные рельсовые стыки, изготовленные по технологиям электроконтактной сварки в стационарных и полевых условиях и методами алюминотермитной сварки, являются слабыми местами рельсового пути и повреждаются чаще, чем рельсы вне зоны сварных стыков. Если сравнить общую удельную повреждаемость 1 метра рельсов со сварным стыком посередине с такой же удельной повреждаемостью 1 метра рельсов без сварного стыка, то получим, что первый показатель в настоящее время превышает второй в 6,4 раза. Если такое же сравнение провести в отношении изломов рельсов, то удельное число изломов в полуметровом расстоянии от

сварного стыка в 24 раза превышает тот же показатель для рельсов вне стыка. При этом в настоящее время слабым местом сварных стыков являются не только дефекты, связанные с непроварами в зоне сваривания, прижогами в местах плохого контакта подошвы рельсов с токоподводящими контактными губками или дефектами механической обработки швов после сварки, но и местные снижения твердости в зонах термического влияния после сварки и локальной термической обработки после сварки. При этом устранение широких зон пониженной твердости в сварных стыках, приводящих к образованию седловин, трещин и выкрашиваний (дефектов 46.3 и 16.3) и способствующих разрушениям рельсов вблизи сварных стыков по дефектам 75.2, 79.2 и 21.2, становится главной задачей повышения работоспособности сварных стыков.

Можно сформулировать три пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков.

1. Совершенствование технологии и оборудования для электроконтактной сварки и локальной термической обработки после сварки в стационарных и полевых условиях. По этому пути развивается большинство работ, проводимых в АО «ВНИИЖТ» и ряде других организаций [1, 2, 3, 4]. За счет интенсификации нагрева и компьютеризации процесса стремились уменьшить ширину разогрева концов рельсов в процессе оплавления. В новом поколении контактных стыковых машин используются системы компьютеризированного управления процессом пульсирующего оплавления, что дает возможность при выполнении каждой сварки диагностировать качество соединений и документировать результаты контроля. При этом создаются условия для получения более ровной поверхности оплавления и уменьшения глубины кратеров на торцах рельсов. Это снижает вероятность получения различных дефектов (рыхлость, холодная сварка, пузыри, непровары) в сварном стыке [5].

На графике распределения твердости на продольном шлифе со сварным швом в середине (рис. 1) имеется три зоны пониженной твердости [6]. Снижение твердости в средней зоне, совпадающей с зоной

■ E-mail: ronzhina.yuliya@vniizht.ru (Ю. В. Ронжина)

сплавления, связано с понижением здесь содержания углерода, выгоревшего во время нагрева до жидкого состояния. В микроструктуре этой зоны кроме перлита появляется ферритная сетка (рис. 2). Снижение твердости в левой и правой зонах связано с протеканием процессов коагуляции цементитных частиц при температурах высокого отпуска в интервале 500–700 °С в зонах термического влияния. Общее снижение твердости в зоне сварных стыков, и особенно в зонах высокого отпуска, приводит к образованию местных седловин (дефект 46.2).

При последующей местной дифференцированной термической обработке сварных швов, заключающейся в индукционном нагреве всего сечения стыка с последующей нормализацией подошвы и шейки рельса и закалке головки, повышаются твердость головки и сопротивление хрупкому разрушению всего стыка. Левые и правые зоны пониженной твердости сохраняются, но при этом они могут смещаться по длине рельса в зависимости от ширины металла, прогретого при индукционном нагреве (рис. 3). Если давление сжатого воздуха, используемого при охлаждении головки, недостаточное, то ширина зоны с пониженной твердостью увеличивается, что усугубляет процесс образования седловин в эксплуатации (рис. 4).

В отечественных технических требованиях на сварные рельсы (сначала технических условиях, а затем в стандартах) ошибочно указывался минимальный уровень твердости, до которого допустимо разупрочнение металла в зонах термического влияния (на 15 % по сравнению с основным металлом, то есть до НВ 290 при минимальной твердости основного металла НВ 341). На самом деле твердость стали с исходной тонкопластинчатой структурой перлита после нагрева до температуры 700 °С (чуть ниже температуры A_{c3}) всегда составляет около НВ 250. Поэтому нужно регламентировать не величину минимально допустимой твердости в зоне влияния от сварки или от локального индукционного нагрева, а максимально допустимую ширину этой зоны, исходя из размеров зоны контакта «колесо–рельс» и стараясь предотвратить явления местного смятия в зонах пониженной твердости с образованием седловин.

В Стандарте ОАО «РЖД» 1.08.002–2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом. Технические условия» имеются и другие неточности. Так, требования по пластичности сварных стыков после сварки до термической обработки завышены. Между показателями прочности и пластичности при испытании на изгиб сварных стыков имеется тесная корреляция (рис. 5). Как видно из этого рисунка, прочности 2100 кН при расположении подошвы в зоне растяжения соответствует прогиб подошвы 20 мм, а не 25–27 мм, как записано в стандарте 2009 г. Это подтверждают и нормативы по пластичности

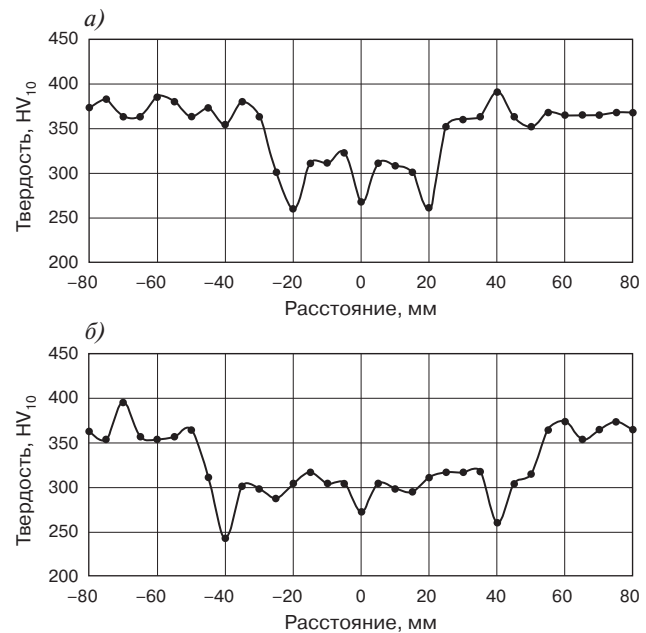


Рис. 1. Распределение твердости в головке рельса на продольном темплете, вырезанном через сварной стык, полученный электроконтактной сваркой после пульсирующего (а) и непрерывного (б) оплавления

Fig. 1. Distribution of hardness in the rail head on the longitudinal template cut through the weld joint from electric-contact welding after pulse (a) and continuous (b) burning-off

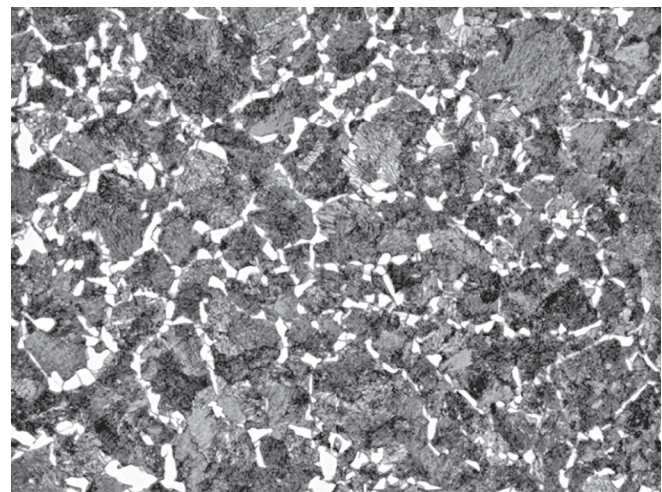


Рис. 2. Микроструктура в зоне сплавления после электроконтактной сварки (×500)

Fig. 2. Microstructure in the area of fusing after electric-contact welding (×500)

сварных швов рельсов после электротермитной сварки близкого типа рельсов, принятые на железных дорогах США (минимальная стрела прогиба 19 мм).

Таким образом, работы по этому направлению могут быть эффективны в части снижения разрушений рельсов, начинающихся в самих сварных швах, но не могут ликвидировать образования боковых зон местных снижений твердости после локальной

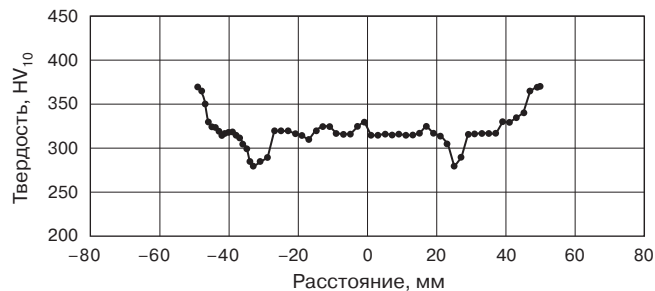


Рис. 3. Распределение твердости в головке рельса на продольном темплекте, вырезанном через сварной стык, полученный электроконтактной сваркой, после локальной термической обработки

Fig. 3. Distribution of hardness in the rail head on the longitudinal template cut through the weld joint from electric-contact welding obtained after local heat treatment



Рис. 4. Распределение твердости в головке рельса на продольном темплекте, вырезанном через сварной стык, полученный электроконтактной сваркой, после локальной термической обработки без достаточно интенсивного охлаждения

Fig. 4. Distribution of hardness in the rail head on the longitudinal template cut through the weld joint from electric-contact welding after local heat treatment without sufficient intensive cooling

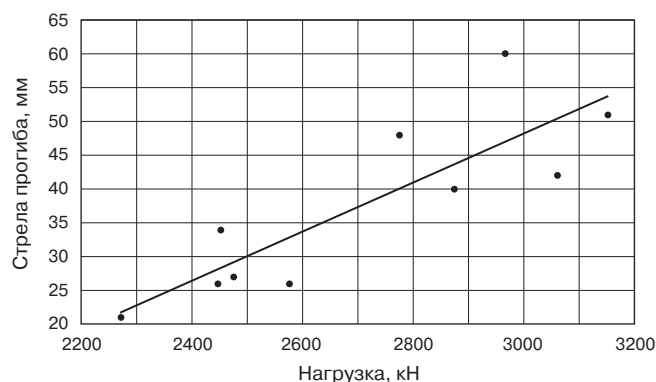


Рис. 5. Корреляция между показателями прочности и пластичности при испытании на изгиб рельсовых проб со сварными швами в средней части

Fig. 5. Correlation between indicators of strength and elasticity during bend test of sample rail with weld joints in the middle

термической обработки, проводимой вслед за сваркой. Удастся ли снизить ширину этих разупрочненных зон настолько, чтобы избежать повышенного смятия металла в них при проходе колес подвижного состава с образованием седловин, остается задачей последующих исследований.

2. Разработка технологии и оборудования для индукционной сварки в стационарных и полевых условиях.

Очень важно активизировать работы по другим методам сварки, исключаям расплавление рельсового металла, в первую очередь индукционному. Имеется многолетний успешный опыт сварки рельсов длиной 108 м на рельсосварочном предприятии (РСП) в г. Солон-ла-Шапель (Франция) индукционным способом на стационарных машинах [7]. Это единственное предприятие в мире, которое применяет метод индукционной электросварки рельсов. Во Франции начиная с 1981 г. (ввод в эксплуатацию первой высокоскоростной магистрали между Парижем и Лионом) все длинные сварные плиты всех высокоскоростных магистралей (2200 км) были сварены с использованием индукционной электросварки. Кроме того, нужно учитывать и успешный опыт газопрессовой сварки в Японии передвижными комплексами (до 60 % сварных стыков). При этом следует отметить, что впервые газопрессовая сварка успешно применялась до 1970 г. на одном РСП в Советском Союзе [1].

В РУТ (МИИТ) совместно с SNCF (Франция) была выполнена работа по индукционной сварке [8]. Она выполнялась на рельсах типа UIC60 завода в г. Айанже (Франция), отвечающих техническим требованиям к отечественным рельсам типа Р65 категории ДТ350. Технология индукционной сварки рельсов заключается в нагреве выше критической температуры A_{c3} (порядка 1200 °С) сопрягаемых частей рельсов с приложением сжимающей нагрузки. В отличие от электроконтактной сварки при индукционной сварке торцы рельсов не нагреваются до жидкого состояния, а сохраняются в твердом состоянии. Вследствие этого отсутствует окисление углерода и легирующих элементов в рельсовой стали, приводящее при электроконтактной сварке к снижению твердости в зоне сплавления, образованию пор и оксидных неметаллических включений.

Предварительно торцы свариваемых рельсов устанавливают друг против друга с высокой точностью ($\pm 0,5$ мм), фиксируют при помощи стопорных элементов, приводимых в действие гидроцилиндрами, и фрезеруют для получения чистой поверхности без дефектов. Приложение нагрузки после достижения определенной температуры нагрева стыка способствует развитию процесса термомеханической обработки с деформацией в ходе диффузионного превращения переохлажденного аустенита по схеме ВТМДО, что создает условия для получения повышенной пластичности наряду с высокими прочностными свойствами [9]. После окончания непосредственно процесса сварки выдавленный металл удаляется гратоснимателем. Для получения в зоне сварки той же твердости, что и в термически упрочненных рельсах, их головка ускоренно охлаждается. После окончательного

охлаждения всего сварного участка рельса до температур ниже 200 °С место сварки подвергается холодной правке в двух плоскостях на гидравлических прессах с лазерным измерением прямолинейности рельсов, что обеспечивает выполнение строгих требований Евро-норм, а также играет роль силового дефектоскопа. Окончательной операцией является шлифовка головки рельса в зоне сварного шва. Дефектоскопирование сварного шва не проводят. С 1981 г. произошло только 8 изломов сварных швов из 480 865 швов, сделанных индукционным методом. Таким образом, соотношение числа изломов к общему числу сварных соединений индукционным способом составляет 166 ppm, в то время как такое же соотношение для электроконтактной сварки равно 2000 ppm.

С целью улучшения эпюры внутренних остаточных напряжений (получения сжимающих напряжений в головке и подошве) после индукционной сварки возможно проведение закалочного охлаждения головки и подстуживания подошвы с тепла сварки.

Распределение твердости по продольному сечению сварного стыка рельса после индукционной сварки (рис. 6) показывает, что протекание процесса пластической деформации в ходе превращения переохлажденного аустенита и ускоренное контролируемое охлаждение обеспечивают упрочнение на расстоянии 20–23 мм по обе стороны от зоны сварного стыка. Анализ результатов замера твердости свидетельствует о том, что при вполне удовлетворительном уровне твердости сварного стыка в головке рельса по обе стороны от сварного шва имеются провалы твердости в зоне термического влияния. Насколько их ширина может быть уменьшена, чтобы предотвратить образование седловин в процессе эксплуатации, должны показать дальнейшие исследования. При этом результаты измерения твердости по поверхности катания через зону сварного стыка рельса после индукционной сварки показывают равномерное упрочнение металла поверхности катания в зоне сварного стыка и основного металла без образования провалов, что в свою очередь обеспечивает снижение неравномерного износа в зонах термического влияния и в целом в сварном стыке при эксплуатации (рис. 7).

Сравнительные испытания сварных стыков, полученных на рельсах типа Р65 категории ДТ350 индукционной и электроконтактной сваркой (см. таблицу), показали, что по ряду важных параметров индукционная сварка обеспечивает получение более высоких результатов, чем электроконтактная [8].

Дополнительно было проведено измерение остаточных напряжений по периметру рельсовой пробы в зоне сварного стыка и основного металла рельса после индукционной сварки рельсов категории ДТ350. Результаты исследований представлены на рис. 8. Анализ полученных данных показывает, что в головке

Результаты сравнительных испытаний сварных рельсовых проб
Results of comparative tests of the welded sample rail

Наименование параметра	Значение параметра	
	Индукционная сварка	Электроконтактная сварка
Прочность шва	120 %	100 %
Стрела прогиба	170 %	100 %
Микроструктура сварного шва	Аналогична основному металлу	Значительное изменение
Предел выносливости	110 %	100 %

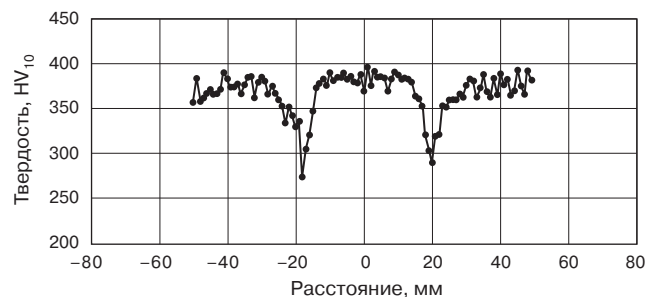


Рис. 6. Распределение твердости в головке рельса на продольном темплете, вырезанном через сварной стык, полученный индукционной сваркой

Fig. 6. Distribution of hardness in the rail head on the longitudinal template cut through the weld joint from induction welding

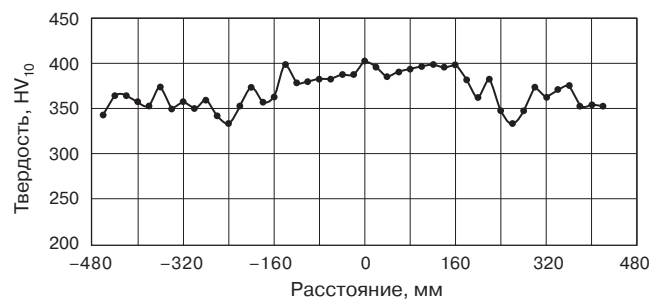


Рис. 7. Распределение твердости по поверхности катания головки рельсов в зоне сварного стыка, полученного индукционной сваркой

Fig. 7. Distribution of hardness on the rail head rolling surface in the area of the weld joint from induction welding

и подошве рельса формируются сжимающие напряжения как за счет технологии дифференцированной термической обработки с индукционного объемного нагрева с охлаждением сжатым воздухом, так и за счет технологии индукционной сварки.

3. Разработка технологии и оборудования для дифференцированной индукционной закалки предварительно сваренных рельсов в плети длиной 800 м. В работах [10, 11, 12] активно обсуждаются перспективы отечественного производства принципиально нового вида продукции — термически упрочненной рельсовой плети длиной до 800 м с ресурсом сварного стыка, равным ресурсу рельса. Технология предусматривает сварку электроконтактным или индукционным способом из 100-метровых горячекатаных рельсов в плеть

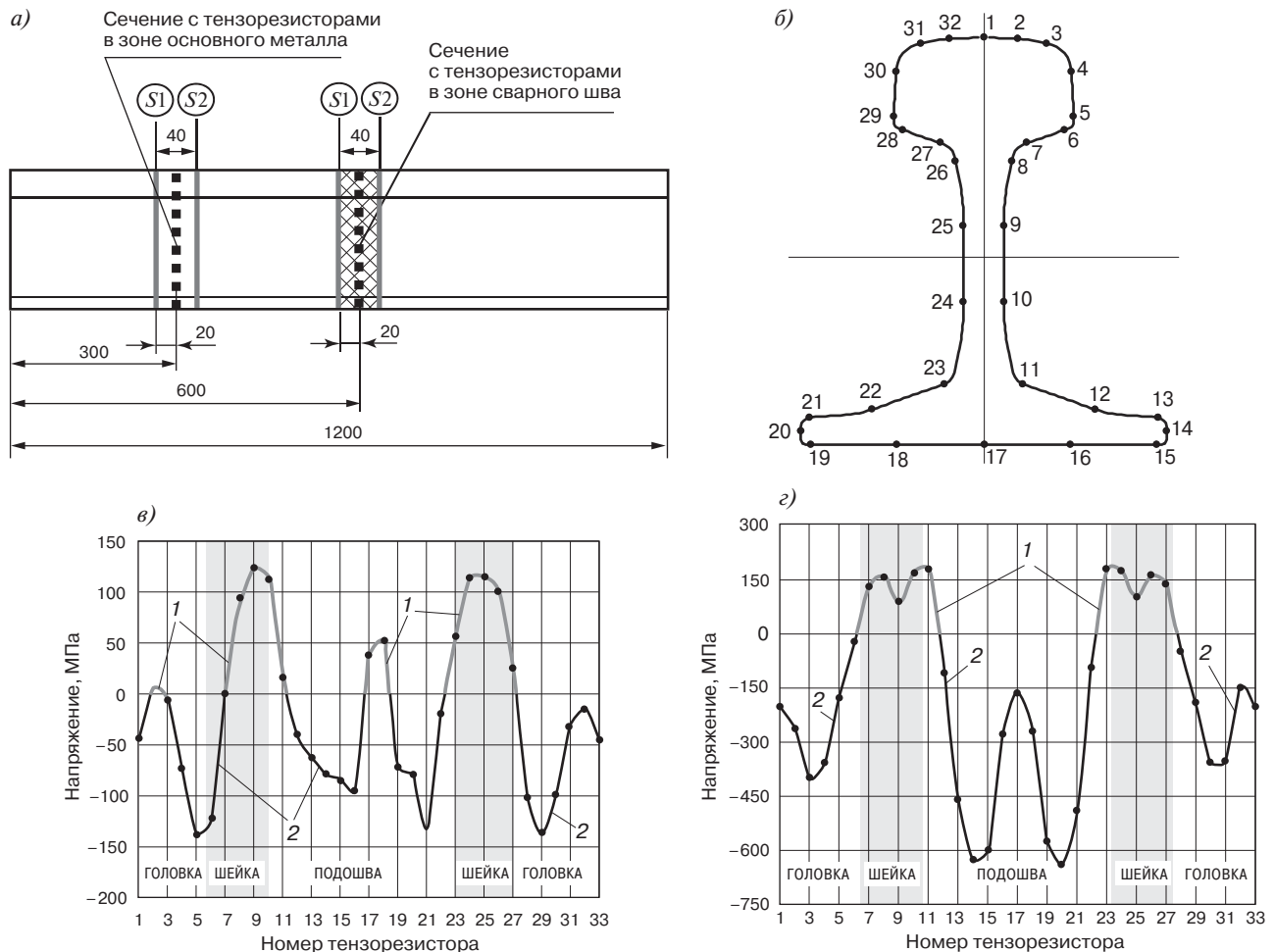


Рис. 8. Эпюра продольных остаточных напряжений в рельсовой пробе UIC60 со сварным стыком:
 а — схема проведения эксперимента: S1 — сечение 1, S2 — сечение 2; б — схема наклейки и нумерация тензорезисторов;
 в — распределение остаточных напряжений в зоне основного металла; г — распределение остаточных напряжений в зоне сварного стыка;
 1 — растягивающие напряжения, 2 — сжимающие напряжения

Fig. 8. Distribution diagram of longitudinal residual stresses in the sample rail UIC60 with weld joint:
 а — diagram of test: S1 — section 1, S2 — section 2; б — diagram of resistive strain gages gluing and numbering; в — distribution of residual stresses in the area of base metal; г — distribution of residual stresses in the area of weld joint; 1 — tension stresses; 2 — compression stresses

длиной 800 м с ее последующим упрочнением с применением объемного индукционного нагрева и двустороннего закалочного охлаждения сжатым воздухом.

Перспективная технология опробована на рельсах длиной до 12,5 м [10, 11]. Реальность внедрения такой технологии производства рельсовых плетей подтверждается многолетним опытом работы заводов в городах Айанж (Франция) и Сидней (Канада). На них была реализована технология термического упрочнения горячекатаных рельсов длиной 108 и 25 м соответственно с применением индукционной установки для объемного непрерывно-последовательного нагрева рельса с последующим двусторонним закалочным охлаждением сжатым воздухом — закалочное охлаждение головки рельса и подстуживание подошвы для сохранения прямолинейности рельсов.

Высокий уровень служебных свойств рельсов типа Р65, изготовленных металлургическими заводами

в городах Айанже (Франция) и Сиднее (Канада), упрочненных по описанной выше технологии без сварных швов, был получен при проведении испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» и на Октябрьской железной дороге.

Переход к дифференцированной индукционной термической обработке 800-метровых плетей позволит устранить все основные недостатки, снижающие ресурс современных плетей, сваренных из лучших рельсов, закаленных с прокатного нагрева. Это обеспечивают:

- наличие остаточных напряжений в головке рельсов, которые наводятся там последней технологической операцией в потоке производства — холодной правкой на роlikоправильных машинах;
- максимальное укорочение или полное устранение мягких участков с пониженным сопротивлением износу, смятию и образованию контактно-усталостных

повреждений в зонах термического влияния после сварки и последующей локальной индукционной термической обработки сварных швов, что приводит к возникновению в этих местах неровностей и повышенного динамического воздействия колес подвижного состава;

- заметное повышение ударной вязкости, трещиностойкости и критического размера усталостных трещин при закалке с отдельного перекристаллизационного нагрева по сравнению с закалкой с прокатного нагрева.

Рельсовые плиты, подвергнутые дифференцированной индукционной термической обработке, будут иметь при условии проведения периодической профилактической шлифовки или фрезеровки межремонтный эксплуатационный ресурс не менее 1500–2000 млн т брутто. Такой подход обеспечит максимально возможную равнопрочность сварных стыков и цельнокатаных рельсов с получением длинных рельсовых плетей для бесстыкового пути с равным сопротивлением износу и смятию в эксплуатации, что позволит ликвидировать местные неровности в сварных плетях бесстыкового пути в течение всего срока службы рельсов. Кроме того, при этом имеет место благоприятная эпюра внутренних остаточных напряжений, способствующих получению наибольшего сопротивления зарождению и распространению контактно-усталостных трещин в головке, коррозионно-усталостных трещин в подошве и продольных трещин в шейке рельса как в прокатной, так и в сварной части рельсовых плетей. Правильно подобранный режим дифференцированно термически упрочненной рельсовой плиты позволит минимизировать процесс правки после термической обработки и сохранить внутренние остаточные сжимающие напряжения.

Проведенными исследованиями было показано, что применение отдельного нагрева под закалку за счет получения мелкого зерна при его перекристаллизации в процессе повторного нагрева приводит к росту ударной вязкости в 1,4–2,0 раза, копровой прочности в 2,0 раза, трещиностойкости в 1,5–1,8 раза, критического размера усталостных трещин в 2,3–2,5 раза.

Технологически получение требуемого структурного состояния при термической обработке рельса, изготовленного из стандартной стали, достигается последовательным нагревом каждого поперечного сечения обрабатываемого рельса, включая сварные швы, до температуры, превышающей температуру окончания фазовых превращений при нагреве и получения однородной аустенитной структуры, а затем осуществлением последовательного охлаждения каждого поперечного сечения обрабатываемого рельса, включая сварные швы, до температуры ниже температуры окончания перлитного превращения данной стали при ее охлаждении таким образом, чтобы

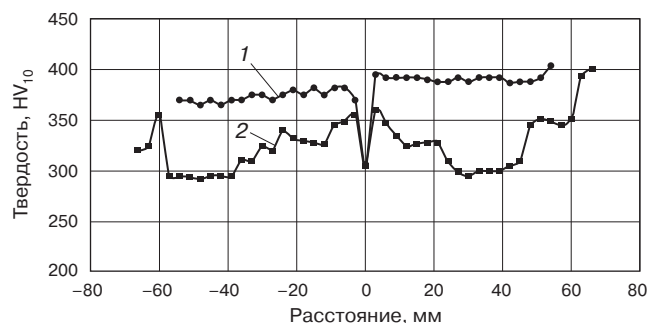


Рис. 9. Распределение твердости на поверхности катания головки рельсов в зоне сварного стыка, полученного электроконтактной сваркой, после термообработки:

- 1 — по всей длине рельсов по технологии ТЭК-ДТО;
 - 2 — по существующей технологии локальной термообработки
- Fig. 9. Distribution of hardness on the rail head rolling surface in the area of weld joint from electric-contact welding after heat treatment:
- 1 — along the entire rail length as per FEC-DCC technology;
 - 2 — as per the current technology of local heat treatment

получить в результате мелкодисперсную структуру сорбита в поверхностном слое головки до 15–20 мм.

В работе использовали рельсы из стали Э76Ф (0,79 % C, 0,97 % Mn, 0,39 % Si, 0,08 % V, 0,11 % Cr, 0,015 % P, 0,010 % S, 0,004 % Al, 0,0015 % O, 0,014 % N) производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» со сварными стыками. Сварку образцов проводили на рельсосварочном предприятии № 29 Западно-Сибирской железной дороги. Исследования твердости, макро- и микроструктуры в зоне сварного стыка, полученного электроконтактной сваркой, после термической обработки по технологии ТЭК-ДТО (разработчик — НПП «Томская электронная компания», Россия) показали, что ширина зоны пониженной твердости с измененной микроструктурой резко уменьшилась по сравнению с локальной термической обработкой сварных швов. После локальной термической обработки для зоны сварного шва характерна структура, состоящая из зерен феррита и перлита в связи с выгоранием углерода и легирующих элементов в процессе сварки. После термической обработки по всей длине она представляет собой перлитную квазиэвтектоидную структуру с ферритной сеткой. При этом если после локальной термической обработки ширина зоны с измененной микроструктурой и твердостью составляла в головке 60 мм, а в подошве 130 мм, то после термической обработки по всей длине она не превышала 6 мм (рис. 9). Такое уменьшение длин «мягких» зон в сварных стыках должно привести к тому, что в процессе эксплуатации образование здесь седловин прекратится. Понижение твердости связано с уменьшением содержания углерода в узкой зоне непосредственно сварного шва в результате выгорания его в процессе сварки. Можно с высокой степенью уверенности предполагать, что при использовании индукционной сварки после термической обработки плетей по всей длине «мягкие зоны» исчезнут полностью.

Выводы. Для устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков нужно срочно заменить оборудование и технологию для локальной термической обработки сварных стыков в РСП, чтобы устранить широкие зоны пониженной твердости в зоне сварных стыков, которые приводят к образованию седловин, трещин и выкрашиваний (дефектов 46.3 и 16.3), способствующих разрушениям рельсов вблизи сварных стыков по дефектам 75.2, 79.2 и 21.2.

Исследования качества сварных стыков, полученных электроконтактным и индукционным способами, показали существенные преимущества последнего. С учетом многолетнего успешного французского опыта сварки рельсов длиной 108 м индукционным способом на стационарных машинах необходимо ускорить разработку отечественного оборудования и технологии сварки рельсов индукционным способом.

Для создания полностью равнопрочных по всей длине 800-метровых закаленных сварных рельсовых плетей нужно разработать и испытать новую для мировой практики рельсового производства технологию сварки электроконтактным или индукционным способом из 100-метровых горячекатаных рельсов в плетью с ее последующим упрочнением с применением объемного индукционного нагрева и двустороннего закалочного охлаждения сжатым воздухом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы // Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта: Труды МПС РФ, ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2003. 94 с.
2. Перспективы развития парка путевых рельсосварочных машин / А. И. Николин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 6. С. 5.
3. Контактная сварка рельсов и термическая обработка сварных стыков рельсов современного производства на рельсосварочных предприятиях ОАО «РЖД» / А. В. Гудков [и др.] // Сварочные и наплавочные технологии на железнодорожном транспорте: Труды ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». М.: Интекст, 2008. С. 30–42.
4. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев: Наукова думка, 1992. 236 с.
5. Сварка рельсов с применением компьютерной техники / А. И. Андреев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2001. № 4. С. 21–25.

6. Резанов В. А. Параметры оценки качества сварного соединения при производстве рельсовых плетей // Сборник научных докладов по материалам 133-го заседания НП «Рельсовая комиссия». 2017. С. 320–329.
7. Revue Generale des Chemins de Fer / V. Lahidalle [et al.]. Publisher: Elsevier, 2012. № 214. P. 20–27.
8. Индукционная сварка рельсов и перспективы ее применения в России / В. М. Федин [и др.] // Сборник научных докладов по материалам 131-го заседания НП «Рельсовая комиссия». 2015. С. 84–94.
9. Основы термической обработки. Т. 2. 1983. С. 196–226 // Металловедение и термическая обработка стали: справочник в 3 т. / под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983.
10. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / С. В. Хлыст [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2013. № 6. С. 14–20.
11. Хлыст И. С., Кузьмиченко В. М., Хлыст С. В. Опыт и технологии компании для повышения потребительских качеств сварных стыков и рельсов // Сборник научных докладов по материалам 133-го заседания НП «Рельсовая комиссия». 2017. С. 330–345.
12. Кучин А. В. Приветственное слово заместителя начальника Центральной дирекции инфраструктуры-филиала ОАО «РЖД» // Сборник научных докладов по материалам 133-го заседания НП «Рельсовая комиссия». 2017. С. 11–13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУР Евгений Авелевич,
д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник, НЦ «Рельсы, сварка,
транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ФЕДИН Владимир Михайлович,
д-р техн. наук, профессор, начальник центра
«Промышленные технологии», ИУИТ РУТ (МИИТ)

БОРЦ Алексей Игоревич,
канд. техн. наук, заместитель директора НЦ «Рельсы, сварка,
транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

РОНЖИНА Юлия Вадимовна,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, НЦ «Рельсы,
сварка, транспортное материаловедение», АО «ВНИИЖТ»

ФИМКИН Александр Иванович,
канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией
«Испытания материалов», кафедра «Строительная механика»,
РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 21.01.2019 г., актуализирована
28.05.2019 г., принята к публикации 17.06.2019 г.

Methods of elimination of rails increased damage in the area of weld joints

E. A. SHUR¹, V. M. FEDIN², A. I. BORTS¹, Yu. V. RONZHINA¹, A. I. FIMKIN²

¹ Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

Abstract. Rail weld joints from electric-contact welding in stationary and field conditions, as well as those from aluminothermic welding are weak points on tracks that are easily damaged compared with rails outside the weld joints. Currently, these weak points are the defects connected with lack of penetration

in the welding area, burns at the points of poor contact of the rail foot with the current-carrying contact tips, or with defects of the weld joint machining after welding, as well as the local hardness reduction in areas affected by heat after welding, and local heat treatment after welding. Elimination of wide areas of reduced

hardness at the weld joint points producing saddles, cracks, and chipping, and promoting rails damage next to such joints is a major challenge for increasing the serviceability of weld joints.

This study introduces three avenues for elimination of increased damage of rails at weld joints including:

- Improvement of technology and equipment for electric-contact welding and local heat treatment after welding in the stationary and field conditions.
- Development of technology and equipment for induction welding in the stationary and field conditions.
- Development of technology and equipment for differentiated induction tempering of rails preliminary welded in strings 800 m long.

Keywords: rails; weld joints; defects; rails induction welding; heat treatment

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-210-217>

REFERENCES

1. Genkin I. Z. *Svarnye rel'sy i strelochnye perevody* [Welded rails and turnouts]. Moscow, Intext, 2003, 94 p.
2. *Perspektivy razvitiya parka putevykh rel'sosvarochnykh mashin* [Prospects of development of the track rail welding machines fleet] / A. I. Nikolin [et al.]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2005, no. 6, pp. 21–26.
3. *Kontaktnaya svarka rel'sov i termicheskaya obrabotka svarnykh stykov rel'sov sovremennogo proizvodstva na rel'sosvarochnykh predpriyatiyakh OAO "RZD"* / A. V. Gudkov [et al.]. Svarochnye i naplavochnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte: Trudy OAO "Nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta" [Contact welding of rails and heat treatment of the rail weld joints of the up-to-date production at the rail welding facilities of JSC RZD / A. V. Gudkov [et al.]. In collection Welding and filling technologies at the railway transport]. Moscow, Intext, 2008, pp. 30–42.
4. Kuchuk-Yatsenko S. I. *Kontaktnaya stykovaya svarka oplavleniem* [Contact welding by burning-off]. Kiev, Naukova dumka, 1992, 236 p.
5. *Svarka rel'sov s primeneniem komp'yuternoy tekhniki* [Rail welding using computer equipment] / A. I. Andreev [et al.]. Put' i putevoe khozyaystvo [Track and track facilities], 2001, no. 4, pp. 21–25.
6. Rezanov V. A. *Parametry otsenki kachestva svarnogo soedineniya pri proizvodstve rel'sovykh pletey*. Sbornik nauchnykh dokladov po materialam 133-go zasedaniya NP "Rel'sovaya komissiya" [Parameters of assessment of weld joint quality when producing rail bars. Collection of scientific reports based on the materials of 133rd meeting of NG Rail Commission], 2017, pp. 320–329.
7. *Revue Generale des Chemins de Fer* / V. Lahidalle [et al.]. Publisher: Elsevier, 2012, no. 214, pp. 20–27.
8. *Induktsionnaya svarka rel'sov i perspektivy ee primeneniya v Rossii* / V. M. Fedin [et al.]. Sbornik nauchnykh dokladov po materialam 131-go zasedaniya NP "Rel'sovaya komissiya" [Induction

welding of rails and prospects of its use in Russia / V. M. Fedin [et al.]. Collection of scientific reports based on the materials of 131st meeting of NG Rail Commission], 2015, pp. 84–94.

9. *Osnovy termicheskoy obrabotki*. In: *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali* / M. L. Bernshteyn [et al.] [Metalscience and heat treatment of steel: reference publication] / Under editorship of Bernshteyn [et al.]. Moscow, Metallurgiya, 1983, pp. 196–226.

10. *Perspektivnaya tekhnologiya proizvodstva rel'sov dlya vysokoskorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya* [Advanced manufacturing technology of rails intended for operation in the high-speed or heavy-haul traffic environment] / S. V. Khlyst [et al.]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2013, no. 6, pp. 14–20.

11. Khlyst I. S., Kuz'michenko V. M., Khlyst S. V. *Opyt i tekhnologii kompanii dlya povysheniya potrebitel'skikh kachestv svarnykh stykov i rel'sov*. Sbornik nauchnykh dokladov po materialam 133-go zasedaniya NP "Rel'sovaya komissiya" [Experience and technologies of the company for improving the weld joints and rails performances. Collection of scientific reports based on the materials of 133rd meeting of NG Rail Commission], 2017, pp. 330–345.

12. Kuchin A. V. *Privetstvennoe slovo zamestitelya nachal'nika Tsentral'noy direksii infrastruktury-fi liala OAO "RZD"*. Sbornik nauchnykh dokladov po materialam 133-go zasedaniya NP "Rel'sovaya komissiya" [Welcome speech of the Deputy Head of the Central Directorate of infrastructure — branch of JSC "RZD". Collection of scientific reports based on the materials of 133rd meeting of NG Rail Commission], 2017, pp. 11–13.

ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. SHUR,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Scientific Center "Rails, welding, transport material science" (SC "RSTM"), JSC "VNIIZhT"

Vladimir M. FEDIN,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Center of Industrial Technologies, FGBOU VO RUT (MIIT)

Aleksey I. BORTS,

Cand Sci. (Eng.), Deputy Director of Scientific Center "Rails, welding, transport material science" (SC "RSTM"), JSC "VNIIZhT"

Yulia V. RONZHINA,

Cand Sci. (Eng.), Senior Researcher, Scientific Center "Rails, welding, transport material science" (SC "RSTM"), JSC "VNIIZhT"

Aleksander I. FIMKIN,

Cand Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Laboratory Material Tests, Department of Structural Engineering, FGBOU VO RUT (MIIT)

Received 21.01.2019

Revised 28.05.2019

Accepted 17.06.2019

■ E-mail: ronzhina.yuliya@vniizht.ru (Yu. V. Ronzhina)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гричиани. М.: РАС, 2019. Ч. 1. 272 с.

Рассмотрены важные экономические факторы, влияющие на развитие железнодорожного транспорта, проблемы связанные с подвижным составом, процессами управления перевозками, совершенствованием локомотивной тяги и токосъема электропод-

вижного состава, а также вопросы пути, путевого хозяйства, металло- и материаловедения.

Сборник рассчитан на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20,

e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

Разработка бортового устройства мониторинга технического состояния поглощающего аппарата грузового вагона

Ю. И. МАТЯШ, И. А. ГАДЖИЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС), Омск, 644046, Россия

Аннотация. Повышение безопасности движения является обязательным условием для обеспечения эффективного функционирования железнодорожного транспорта. С целью получения целостного представления об объемах внеплановых ремонтов грузовых вагонов в статье проведен анализ статистики отцепок вагонов приписки России в текущий отцепочный ремонт за период с 2008 по 2018 г. Рассмотрены факторы, косвенно влияющие на репрезентативность данных, описываемых этой статистикой. Сформулированы предпосылки к дальнейшему увеличению числа неисправностей, в связи с чем обоснована актуальность проблемы мониторинга технического состояния грузовых вагонов бортовыми системами. Сформулированы основные атрибуты пилотной версии бортовой системы мониторинга узлов вагона. Дано обоснование необходимости непрерывного контроля исправного состояния поглощающего аппарата, основанное на анализе статистической информации, а также текстов научных публикаций и диссертационных работ в данном направлении. Установлена взаимосвязь неисправностей поглощающего аппарата с отказами других узлов грузового вагона. Разработан и изготовлен макет бортового устройства для мониторинга технического состояния поглощающего аппарата грузового вагона и описаны функциональные возможности этого устройства. Обозначены критерии определения неисправного состояния и снижения эффективности работы поглощающего аппарата.

Ключевые слова: безопасность движения; вагон; перевозка грузов; система мониторинга; поглощающий аппарат; взаимосвязь неисправностей; критерии неисправности

Введение. В настоящее время парк грузовых вагонов в основном представлен вагонами типовой конструкции, большая часть из них базируется на тележке модели 18-100 (по разным оценкам, от 85 до 90 % всех грузовых вагонов в России [1]), которая разрабатывалась еще в 40-е гг. XX в. Вплоть до 2004 г. это была единственная серийно выпускаемая тележка, эксплуатируемая в составе четырех- и восьмиосных грузовых вагонов [2]. В 1976 г. проектная нагрузка на ось, равная 21 т, была увеличена до 22 т, в 1977 г. — до 23 т, а позднее и до 23,5 т [2]. Таким образом, повышенные эксплуатационные нагрузки на тележку при сохранении принципиально той же ее конструкции, что и в середине XX в., приводят к сокращению межремонтного пробега вагона и увеличению вероятности внезапных отказов.

■ E-mail: ibragimgadziev@gmail.com (И. А. Гаджиев)

С целью обеспечения надлежащего технического состояния грузовые вагоны проходят текущий отцепочный ремонт (ТОР) на специально оборудованных путях, где устраняются выявленные неисправности. На рис. 1 представлена статистика по отцепкам грузовых вагонов в ТОР за последние 11 лет [3].

Исходя из приведенных данных, можно отметить рост количества отцепок вагонов на 102,7 % за период с 2008 по 2015 г. с последующим сохранением этого уровня до настоящего времени. На сегодняшний день российский грузовой вагонный парк является одним из самых молодых в мире — средний возраст вагонов 12,5 года (8,3 года по парку полувагонов), в то время как в 2008 г. эта цифра составляла 17 лет [5, 6]. В середине 2014 г. был принят ряд решений, целью которых было, во-первых, искусственно сократить парк вагонов, уменьшив срок их службы за счет невозможности его продления без дополнительного проведения обязательной модернизации вагона в соответствии с техническим регламентом Таможенного Союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава», а во-вторых, стимулировать закупку новых вагонов, что позволило бы увеличить загрузку вагоностроительных заводов [7]. В результате с января 2015 г. по

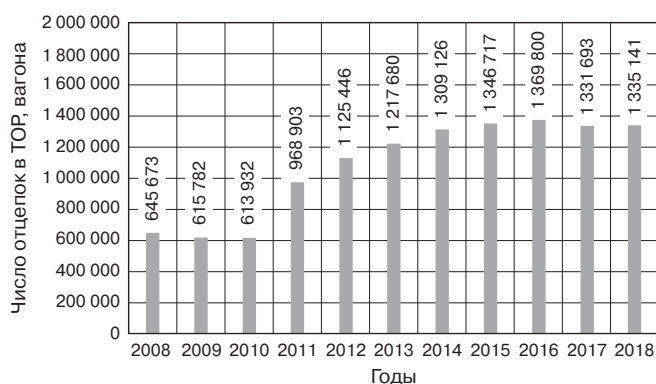


Рис. 1. Динамика поступления грузовых вагонов приписки России в ТОР за период с 2008 по 2018 г. (данные за 2018 г. спрогнозированы на основе информации за 11 месяцев 2018 г.) [3, 4]

Fig. 1. Dynamics of freight cars of Russia ascription delivery to CUR from 2008 to 2018 (data for 2018 are forecasted based on information for 11 months of 2018) [3, 4]

декабрь 2017 г. общий наличный парк грузовых вагонов в России уменьшился с 1231,6 тыс. единиц до 1114,3 тыс. единиц, то есть примерно на 10 % [8]. Таким образом, статистика на рис. 1 не учитывает те потенциальные отцепки, которые могли возникнуть, если бы исключенные из парка по уменьшенному сроку службы вагоны продолжили эксплуатироваться, а их накопившиеся к моменту изъятия неисправности были бы выявлены. С учетом вышеизложенного можно сделать вывод о том, что на данный момент не появилось предпосылок к снижению числа отцепок грузовых вагонов в ТОП по неисправностям узлов.

В соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года планируется организовать производство грузового подвижного состава нового поколения с нагрузкой на ось 25–30 т и скоростью движения до 140 км/ч, а также поставлена задача увеличить объем грузоперевозок к 2030 г. на 500–800 млн т брутто [9]. В перспективе при эксплуатации поездов повышенной массы и длины можно прогнозировать увеличение кинетической энергии движущегося состава, а значит, и появление еще большего числа неисправностей узлов грузовых вагонов [10].

В складывающейся ситуации существующий точечный контроль напольными и постовыми средствами диагностирования становится недостаточным, так как эксплуатируемые на российской сети железных дорог системы и комплексы не способны непрерывно сообщать актуальную информацию о техническом состоянии грузовых вагонов на протяжении всего маршрута следования поезда. Средства мониторинга, размещаемые непосредственно на грузовом вагоне, только недавно начали появляться на зарубежном рынке и имеют сравнительно малый функционал. Например, австрийская система WaggonTracker способна осуществлять измерение температуры буксового узла, контроль перегруза, геопозиционирование и т.д. [11]. В России подобные средства находятся на этапе испытаний и сертификации. Одним из таких аналогов является система комплексного мониторинга подвижного состава, разрабатываемая АО «НИИАС» [12, 13]. Дополнительно к этому при столь высоком числе имеющихся и прогнозируемых неисправностей, а также при эксплуатации поездов повышенной массы и длины еще больше будет сказываться негативное влияние человеческого фактора при осмотре вагонов на пунктах технического обслуживания.

Исходя из сказанного, разработка бортовой системы мониторинга как неотъемлемой части грузового вагона становится одним из наиболее актуальных путей повышения безопасности движения поездов. Развитие грузового подвижного состава в данном направлении согласуется с концепцией проекта «Цифровая железная дорога», а также с одним из приоритетных

направлений развития отрасли транспортного машиностроения в соответствии со Стратегией развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года, суть которого заключается во внедрении интеллектуальных систем при эксплуатации грузового подвижного состава («умный вагон») [14].

Описание концепции бортовой информационной системы мониторинга технического состояния узлов грузового вагона изложено в [10], конструкция и принципы работы автономного устройства электропитания системы — в работах [15, 16]. В основу данной системы мониторинга заложен блочно-модульный принцип, позволяющий в дальнейшем расширять спектр выявляемых ею неисправностей.

Выбор узла для мониторинга. Для разработки и изготовления пилотной версии предложенной системы (ввиду нецелесообразности одновременного охвата всех узлов грузового вагона без анализа учета их вклада в его безотказную работу) возникла необходимость выбора именно такого узла, который бы соответствовал следующим критериям:

- нарушение работоспособности выбранного узла представляет наибольшую угрозу для обеспечения безопасности движения;
- при оснащении выбранного узла системой мониторинга обеспечивается минимальная степень вмешательства в конструкцию существующих и эксплуатируемых грузовых вагонов;
- при серийном изготовлении системы мониторинга выбранного узла обеспечивается ее сравнительно низкая стоимость;
- контроль выбранного узла должен быть экономически выгоднее, чем устранение последствий его неисправного состояния.

В результате анализа статистики по отцепкам грузовых вагонов, случаев нарушения безопасности движения, а также публикаций по результатам исследований в данном направлении был сделан вывод, что наиболее полно этим критериям соответствует поглощающий аппарат автосцепного устройства, в том числе и по следующим причинам:

1) на сегодняшний день в эксплуатации на грузовом подвижном составе применяют различные виды поглощающих аппаратов, прямой контроль исправности которых остается невозможным, во-первых, из-за неудобства положения осмотровика и, во-вторых, из-за невозможности осмотра деталей, скрытых в корпусе поглощающего аппарата. Поэтому о многих неисправностях осмотровик судит по косвенным признакам, используя известные методы выявления неисправностей и личные навыки, что вызывает затруднения в получении достоверных сведений [17];

2) в работе [17] с целью исследования влияния неисправного поглощающего аппарата на возникновение

неисправностей в других узлах грузового вагона проведено натурное обследование более тысячи вагонов, поступивших в текущий ремонт. Установлено, что при обнаруженной неисправности поглощающего аппарата информативность взаимосвязанных неисправностей корпуса автосцепки, рамы и кузова вагона от максимально возможной составляет 58,4; 51,2 и 40,0 % соответственно. Исходя из этого, выявлены условные вероятности отказа вагона по этим неисправностям, предпосылкой для которых явилась неисправность поглощающего аппарата [17];

3) неисправный поглощающий аппарат приводит к увеличению скорости износа деталей автосцепного устройства и повышению темпов роста микротрещин в корпусе автосцепки, что значительно увеличивает вероятность ее обрыва. За 9 месяцев 2018 г. произошло увеличение отцепов по причине неисправности автосцепки на 22,53 % по сравнению с тем же периодом 2017 г., при этом общее количество обрывов автосцепок увеличилось с 30 случаев в 2017 г. до 40 — в 2018 г., то есть возросло на 25 % [3];

4) интенсификация грузоперевозочного процесса привела к увеличению массы вагонов и поездов и, как следствие, к повышенным ударным нагрузкам на грузовой вагон при переходных режимах движения поезда и маневровых горочных операциях [18];

5) несмотря на внедрение вагонных замедлителей в инфраструктуру железнодорожных станций, регулярно происходят случаи превышения допустимых скоростей соударения грузовых вагонов при роспуске с горки, вызванные морально устаревшими и нестабильными механизмами замедлителей, что в свою очередь допускает влияние на протекающие процессы человеческого фактора. Удары на горках являются не только причиной повреждения узлов вагона, но и могут приводить к самопроизвольному открытию люков у загруженных полувагонов, дверей крытых вагонов и бортов платформ. Известны также случаи, когда вследствие удара происходила разгрузка одной из тележек порожнего вагона, которая в свою очередь приводила к выпадению пружин рессорного комплекта. Практика показывает, что на устранение повреждений, вызванных продольными нагрузками, за срок службы вагона затрачиваются средства, равные его первоначальной стоимости [17, 19, 20, 21];

6) при выходе из строя поглощающего аппарата повышенные продольные динамические силы воздействуют на перевозимые грузы (в том числе относящиеся к опасным) и их крепление, дорогостоящее оборудование рефрижераторных вагонов, а также на подвесное оборудование, например, тормозную магистраль, подверженную действию инерционных нагрузок, которые могут вызвать нарушение ее плотности и обрыв крепежных деталей [17, 19];

7) повышенные продольные силы в составе являются одной из причин срабатывания воздухораспределителя (ВР) на самоторможение из-за действия инерционных сил на поршень и плунжер магистральной части ВР, что может привести к разрыву поезда [22];

8) с увеличением длины поездов до 1000 м и более был увеличен диаметр питающего отверстия кранов машиниста № 394 до 13 мм, вследствие чего их высокая питательная способность при обрыве поезда нарушает свойство автоматичности тормозов, причем в случае, когда перед этим была выполнена минимальная первая ступень разрядки тормозной магистрали, сигнализатор обрыва не срабатывает и не информирует машиниста об аварийной ситуации, что снижает уровень безопасности движения [23];

9) увеличение разности высот автосцепок вследствие неисправности упряжного устройства приводит к повышению вероятности вкатывания колеса на головку рельса из-за снижения вертикальной составляющей силы, действующей на колесо при прохождении кривых участков пути, вызванного подпиранием провисшей автосцепкой исправной автосцепки соседнего вагона [24];

10) повышенные продольные силы в составе при переходных режимах движения поезда вызывают установку вагонов под углом друг к другу в плане, что увеличивает рамные силы и приводит к еще более неблагоприятному соотношению боковых и вертикальных сил, действующих на колесо, а также вызывает повышенный износ гребней колесных пар — основную причину отцепов вагонов в ТОР [24];

11) в 2017–2018 гг. была увеличена протяженность гарантийных участков безопасного проследования на 656 км (до 2300 км для груженых вагонов и до 3300 км для порожних), что повышает требования к надежности сцепления в составе, так как разрыв поезда приводит к убыткам, связанным с нарушением графика движения поездов, удалением состава с путей [25]. По сети ОАО «РЖД» в 2018 г. рост саморасцепов по сравнению с 2017 г. составил 28 % [26];

12) ряд моделей поглощающих аппаратов может изменять свои технические характеристики во время следования поезда из-за воздействия низких температур окружающей среды (например, эластомерные и содержащие упругие полимерные элементы), следовательно, возможность непрерывного контроля эффективности работы поглощающего аппарата позволит получить новые статистические данные, которые дадут более полную картину процессов, протекающих как на отдельно взятом поглощающем аппарате, так и в составе в целом, в том числе при переходных режимах движения [27].

На рис. 2 схематично обобщены факторы, описанные в пп. 3–7 и 9–11 данного раздела, определяющие актуальность мониторинга технического состояния

поглощающего аппарата поезда из-за влияния его неисправного состояния на отказы других узлов и безопасность движения в целом.

Анализ статистических данных показывает, что общее количество отцепок вагонов по причине неисправности поглощающего аппарата сравнительно мало. При этом нет показателя, который бы учитывал вклад невыявленной неисправности поглощающего аппарата (до момента ее обнаружения и выявления окончательного отказа узла) в нарушение исправной работы других узлов вагона. На сегодняшний день не существует технических средств для непрерывного контроля снижения эффективности работы установленного на вагоне поглощающего аппарата на ходу поезда.

Техническое решение. Согласно ГОСТ 32913–2014 в зависимости от того, на каком объекте будет эксплуатироваться поглощающий аппарат, оговорены следующие классы:

- аппараты класса Т0 (например, пружинно-фрикционные Ш-2-В, Ш-6-ТО-4, ПМК-110А) применяются в исключительных случаях, например на вагонах, следующих в ремонт;
- аппараты класса Т1 (например, с упругими полимерными элементами, такие как РТ-120, ПМКП-110) применяются на вагонах, перевозящих обычные грузы;
- аппараты класса Т2 (например, эластомерные 73ZWu, АПЭ-90-А) устанавливаются на специализированных вагонах для перевозки ценных и опасных грузов классов 3, 4, 5, 8 и 9 по ГОСТ 19433–88 (например, нефть и нефтепродукты, химические вещества и т.п.), а также на вагонах с расчетной массой брутто свыше 120 тонн;
- аппараты класса Т3 (например, эластомерные 73ZWu2, АПЭ-120-И) устанавливаются на специализированных вагонах для перевозки грузов высокой степени опасности классов 1, 2, 6 и 7 (например, сжиженный газ, ядовитые вещества и т.п.).

С целью обеспечения мониторинга технического состояния поглощающего аппарата (любого класса и конструкции) авторами разработано устройство, принцип работы которого основан на определении уровней механического воздействия продольных сил в поезде через поглощающий аппарат на раму грузового вагона. На рис. 3 представлен общий вид макета устройства мониторинга технического состояния поглощающего аппарата грузового вагона, состоящего из кабеля подключения датчика (1), тумблера включения (2), микроконтроллерной платы (3), аналого-цифрового преобразователя (4), модуля беспроводной передачи данных (5).

На рис. 4 показано схематичное изображение рамы грузового вагона с указанием места крепления датчика бортового устройства для мониторинга технического состояния поглощающего аппарата. Силовой датчик (4), представляющий собой один или несколько соединенных между собой тензорезисторов,

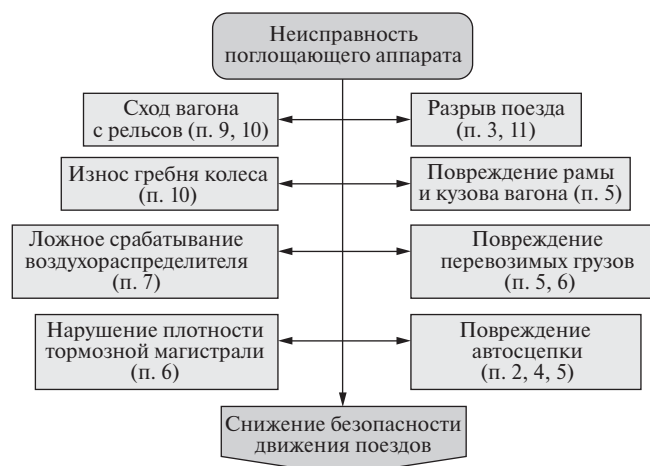


Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма влияния неисправного состояния поглощающего аппарата грузового вагона на снижение безопасности движения

Fig. 2. Cause-and-effect diagram of the impact of a failed shock-absorbing device of a freight car on traffic safety

прикрепляется на задний упор (5), расположенный внутри хребтовой балки (2) рамы вагона. Продольная сила $F_{\text{нач}}$, передаваемая от хвостовика автосцепки (1), воздействует на подвижную часть поглощающего аппарата (3), который, переходя в сжатое состояние, часть этой силы передает на задний упор (5), что вызывает его микродеформацию совместно с тензорезисторами (датчик 4), вследствие этого изменяется их электрическое сопротивление, что регистрируется в бортовом устройстве мониторинга технического состояния поглощающего аппарата (6).

С целью повышения точности измерений способ и место установки тензорезисторов на вагоне, их количество и схема включения будут уточняться при проведении натурных испытаний разработанного макета устройства. Для упрощения процесса тарировки силоизмерительного датчика рассматриваются способ крепления датчика на промежуточную пластину, а также его калибровка и жесткое закрепление на хребтовой балке.

Обработка регистрируемых данных. В результате проводимого мониторинга выявляют максимальные значения продольной силы F , передаваемые через поглощающий аппарат на хребтовую балку грузового вагона. Возможные характеристики нагружения хребтовой балки в зависимости от степени снижения эффективности работы поглощающего аппарата представлены на рис. 5.

Оценка работоспособности и степени снижения эффективности работы поглощающего аппарата производится по критерию

$$F < \bar{F}k,$$

где $\bar{F}$ — средняя продольная сила по группе вагонов; k — поправочный коэффициент.

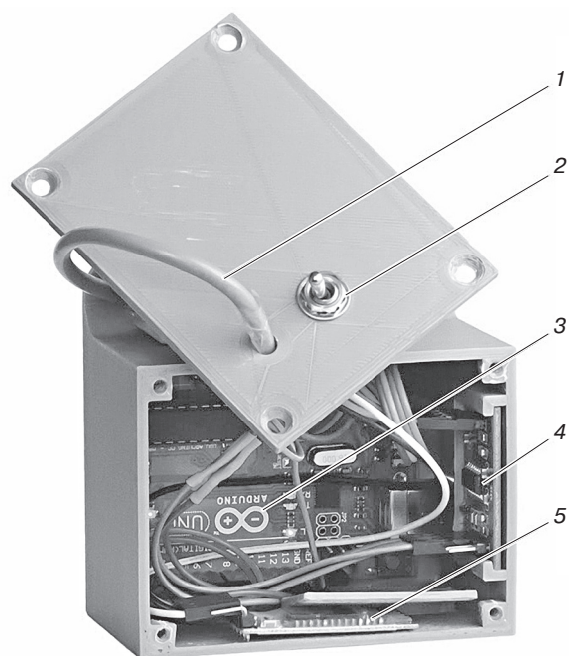


Рис. 3. Макет устройства мониторинга технического состояния поглощающего аппарата:

- 1 — кабель подключения датчика; 2 — тумблер включения;
3 — микроконтроллерная плата; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — модуль беспроводной передачи данных

Fig. 3. Mockup of the monitoring device for technical condition of the shock-absorbing device:

- 1 — sensor connection cable; 2 — toggle switch; 3 — microcontroller board; 4 — analog-to-digital converter; 5 — wireless data communication module

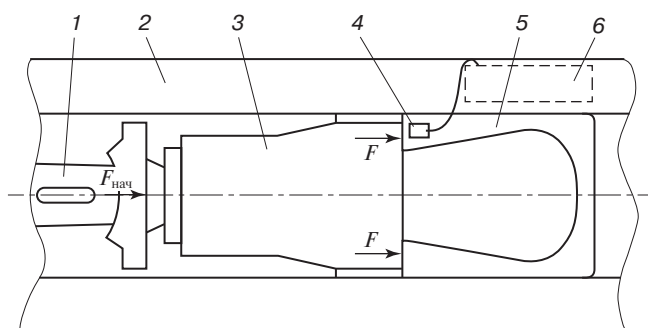


Рис. 4. Схематичное изображение рамы грузового вагона с указанием места расположения силоизмерительного датчика бортового устройства для мониторинга технического состояния поглощающего аппарата на вагоне:

- 1 — хвостовик автосцепки; 2 — хребтовая балка рамы вагона;
3 — поглощающий аппарат; 4 — силоизмерительный датчик;
5 — задний упор; 6 — бортовое устройство; $F_{нач}$ — продольная сила, действующая на поглощающий аппарат от автосцепки;
 F — продольная сила, действующая на задний упор от поглощающего аппарата

Fig. 4. Schematic picture of the freight car's frame indicating point of installation of the force-metering sensor of the onboard device for monitoring the technical condition of the shock-absorbing device on the car:
1 — coupler bar; 2 — tie rod of car frame; 3 — shock-absorbing device; 4 — force-metering sensor; 5 — rear draft lug; 6 — onboard device;
 $F_{нач}$ — longitudinal force from two-car string affecting shock-absorption device; F — longitudinal force from the shock-absorbing device affecting the rear draft lug

Для исключения влияния на итоговый результат мониторинга места расположения контролируемого вагона в составе поезда (ближе к локомотиву или к хвостовой части), а следовательно, и вызываемых этим фактором различных продольных сил по длине состава, например в процессе набегания хвостовых вагонов при торможении поезда, сравнение получаемых значений F происходит не с фиксированными браковочными величинами продольных сил, а с усредненными по ближайшим нескольким вагонам, так как все датчики соединены в единую одноранговую беспроводную сеть поезда, то есть имеется возможность одновременного сбора данных со всех вагонов. Дополнительно для повышения достоверности результатов мониторинга (с целью исключения ложных срабатываний сигналов Тревога 1 или Тревога 2) вводится поправочный коэффициент k . На данный момент для сигнала Тревога 2 он принимается равным коэффициенту запаса прочности для деталей хребтовой балки вагона в соответствии с ГОСТ 33211–2014, то есть $k=1,18$. Для компенсации погрешностей при расчете средней продольной силы и погрешностей при измерении продольной силы F на каждом из вагонов допускается отклонение на 5 %, то есть для сигнала Тревога 1 получаем $k=1,05$. Коэффициенты для различных сигналов тревоги будут уточняться по результатам натурных испытаний. В ситуации, когда вагон находится вне состава, например при роспуске с горки, измеряемая продольная сила F сравнивается с максимально допустимой, соответствующей скорости соударения 1,38 м/с в соответствии с ГОСТ 22235–2010.

Для расчета усредненного значения продольных сил на любом из вагонов предлагается использовать метод полиномиальной аппроксимации. Преимуществом данного метода, в отличие от расчета среднего арифметического значения, является возможность определить количество ближайших вагонов, принимаемых в расчет, опираясь на коэффициент детерминации R^2 , что позволит получать более точные значения.

В качестве примера рассмотрим результаты моделирования процесса торможения, полученные в программном комплексе «Универсальный механизм». Для этого в нем был смоделирован поезд, состоящий из 78 полувагонов с нагрузкой на ось 25 т и локомотива (две секции), который совершает служебное торможение на скорости 30 км/ч. На рис. 6 представлены полученные значения продольных сил в межвагонных связях для момента времени $t=9,8$ с с момента начала торможения, обработанные в табличном процессоре Microsoft Excel.

Таким образом, метод аппроксимации позволяет построить основанную на текущих измеряемых данных математическую модель, которая одним или

несколькими уравнениями описывает усредненные продольные силы в поезде для каждой межавгонной связи (сцепы). Подставляя в уравнение порядковый номер диагностируемой межавгонной связи, можно с определенной точностью рассчитать силу, которая будет в ней при исправных поглощающих аппаратах.

Показателем точности математической модели является коэффициент детерминации R^2 , который варьирует от 0 до 1, где его более высокое значение соответствует более сильной зависимости рассчитываемой средней силы от номера межавгонной связи x . Задав минимальное значение этого коэффициента, можно определить количество вагонов, которые будут взяты в расчет средней силы для конкретного сцепа. В рассмотренном примере R^2 получился равным 0,949, при этом весь поезд был описан одним уравнением. Если разделить поезд на части, то для уравнений, описывающих каждую из этих частей, коэффициент R^2 будет выше.

В результате оценки по предложенному критерию вырабатываются сигналы тревоги в зависимости от уровня превышения допустимых значений продольных сил над усредненными в соответствии с блок-схемой, представленной на рис. 7.

Благодаря возможности накопления статистических данных о силовых воздействиях, передаваемых на вагон через поглощающий аппарат, становится реальным не только определение его неисправного состояния и степени снижения эффективности работы на ходу поезда, но и прогнозирование его отказа, за исключением аппаратов класса Т0, в которых это невозможно из-за наличия в конструкции пружины: ее

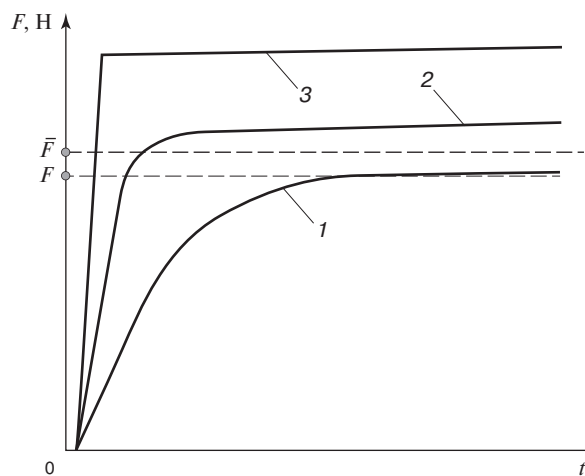


Рис. 5. Зависимость продольной силы, измеряемой на заднем упоре (F), от времени (t):

$\bar{F}$ — средняя продольная сила по группе вагонов; 1 — Норма; 2 — Тревога 1, 3 — Тревога 2 — условные сигналы, выдаваемые системой в зависимости от максимального уровня измеряемых продольных сил F

Fig. 5. Conditional schematic demonstration of the property $F(t)$ taken from the car frame:

F — longitudinal forces measured at the rear draft lug; t — real time; $\bar{F}$ — average longitudinal force for the group of cars; 1 — Norm; 2 — Alarm 1, 3 — Alarm 2 — conventional signals produced by the system depending on the maximum level of measured longitudinal forces F

отказ носит внезапный характер и снижает достоверность прогнозирования. Однако стоит отметить, что на сегодняшний день аппараты данного класса заменяются на Т1, так как в соответствии с ГОСТ 32913–2014 применение аппаратов класса Т0 допускается только в исключительных случаях.

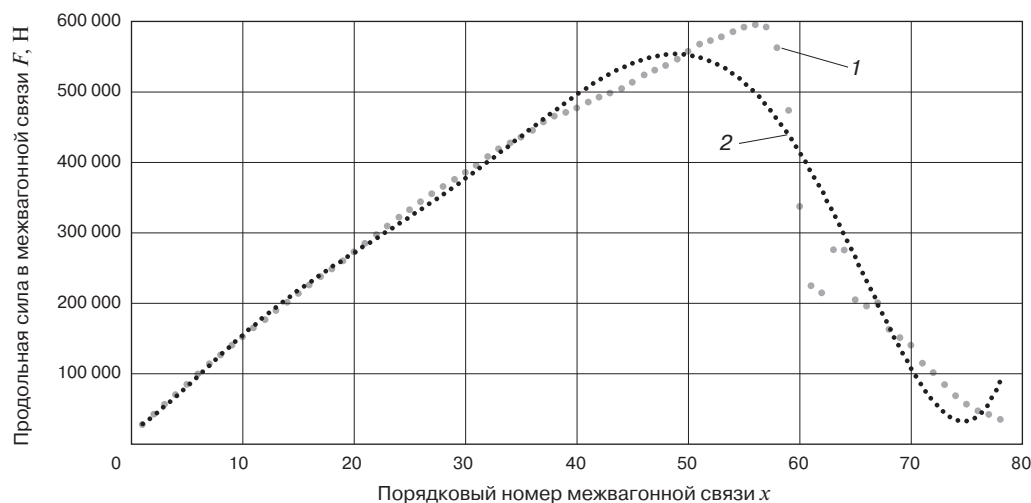


Рис. 6. График распределения продольных сил в поезде спустя 9,8 с после начала служебного торможения на скорости 30 км/ч: 1 — значения, полученные в ходе моделирования; 2 — значения, полученные с помощью математической модели, построенной методом аппроксимации; $\bar{F}(x) = 0,0002x^6 - 0,0446x^5 + 3,0272x^4 - 89,641x^3 + 1068,1x^2 + 9368,4x + 18\,135$ — математическая модель усредненной продольной силы; x — порядковый номер межавгонной связи (сцепы); $R^2 = 0,949$ — коэффициент детерминации

Fig. 6. Diagram of longitudinal forces in the train 9.8 s after beginning of the service and braking from a speed of 30 km/h: 1 — values obtained during modeling; 2 — values obtained by means of mathematical model built using approximation method; $\bar{F}(x) = 0,0002x^6 - 0,0446x^5 + 3,0272x^4 - 89,641x^3 + 1068,1x^2 + 9368,4x + 18\,135$ — mathematical model of averaged longitudinal force; x — sequential number of the two-car string (coupling); R^2 — determination coefficient

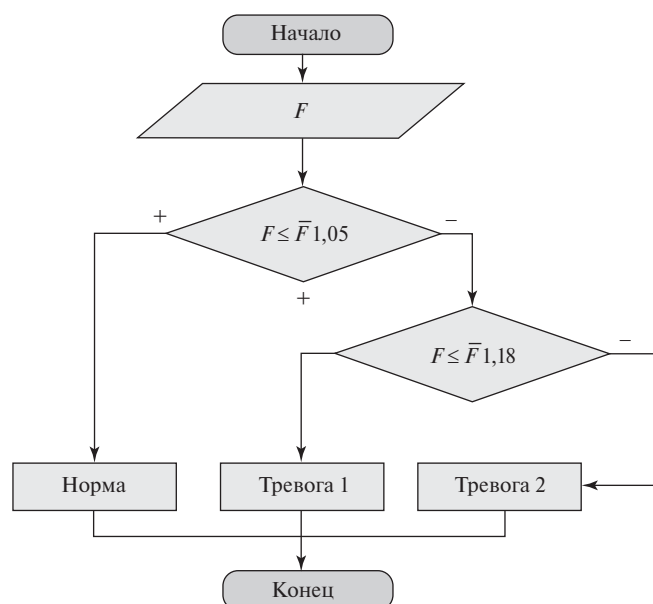


Рис. 7. Блок-схема алгоритма определения неисправного или предотказного состояния поглощающего аппарата вагона, находящегося в составе

Fig. 7. Flow chart of the algorithm of determination of failed or pre-failure condition of the shock-absorbing unit of the car within the train

Заключение. При оснащении грузовых вагонов предложенной бортовой системой мониторинга поглощающего аппарата становится возможным значительное снижение влияния описанных в статье факторов на уровень безопасности движения, а также на потенциальные разрывы поездов и сходы вагонов с рельсов. Помимо возможности в любой момент времени узнать о текущем техническом состоянии каждого поглощающего аппарата в составе, появится возможность прогнозирования его остаточного ресурса на основании непрерывно получаемых данных. Создание базы статистических данных позволит совершенствовать существующие и разрабатывать новые модели поглощающих аппаратов с учетом этой информации.

Внедрение данной системы выгодно и для владельцев грузовых вагонов, так как для них впервые открывается возможность выявления превышений продольных динамических воздействий на их вагоны при выполнении маневровых работ на сортировочных горках, где возможны соударения, а значит, повреждения не только самого поглощающего аппарата, но и остальных узлов вагона, таких как рама, кузов, крепления подвесного оборудования и перевозимых грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РЖД-Партнер. Революционные инновации на службе у потребителя [Электронный ресурс]. 2010. URL: http://www.tvsz.ru/press_center/company_in_the_media/74.html (дата обращения: 08.02.2019 г.).

2. Харибин И.А., Орлова А.М., Додонов А.В. Совершенствовать ходовую часть грузовых вагонов [Электронный ресурс]. 2009. URL: http://www.engcenter.ru/press/list_vagon/vvh-7-rus.pdf (дата обращения: 08.02.2019 г.).

3. ПКБ ЦВ ОАО «РЖД». Справочные материалы по причинам поступления грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://pkbcv.ru/docs/%D0%A2%D0%9E%D0%A0%202018-09.pdf> (дата обращения: 18.02.2019 г.).

4. РЖД-Партнер. Меньшакова М. С 2010 г. объем выпуска грузовых вагонов из текущего отцепочного ремонта вырос более чем в два раза [Электронный ресурс]. 2015. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/s-2010-g--obem-vypuska-gruzovykh-vagonov-iz-tekushchego-ottsepochnogo-remonta-vyros-bolee-chem-v-dv/> (дата обращения: 28.07.2019 г.).

5. Плетнев С. Вагон на полном пансионе: как сократить время ремонта. Gudok.ru [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1451656> (дата обращения: 18.02.2019 г.).

6. Савин Г.В., Гиниятуллин Р.Н., Потапцева Е.В. Специфика формирования стоимости текущего отцепочного ремонта в Российской Федерации // Управленец. 2016. № 4 (62). С. 58–65.

7. Хусаинов Ф. Хотели как лучше: почему на рынок вернулся дефицит грузовых вагонов. РБК. Мнение [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://www.rbc.ru/opinions/economics/26/10/2017/59f1e87a9a79470d83fc12b5> (дата обращения: 09.02.2019 г.).

8. ОАО «РЖД». Раскрытие информации ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]. 2003–2019. URL: http://www.rzd.ru/openinfo/public/ru?STRUCTURE_ID=5131&archive=1&textSearch=&form_id=28&year_id=2019 (дата обращения: 17.03.2019 г.).

9. ОАО «РЖД». Краткое описание Стратегии развития холдинга «РЖД» до 2030 года [Электронный ресурс]. 2015. URL: <http://ar2015.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030> (дата обращения: 12.02.2019 г.).

10. Матяш Ю.И., Гаджиев И.А. Разработка беспроводной бортовой информационной системы мониторинга технического состояния узлов грузового вагона на ходу поезда // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности. Материалы II всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 99–107.

11. PJM. WaggonTracker. Intelligent rail freight transport featured by WaggonTracker [Электронный ресурс]. URL: <https://pjm.co.at/en/waggontracker/> (дата обращения: 30.07.2019 г.).

12. Лебедева Е. Наш трекер работает и зимой. Gudok.ru [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1388975> (дата обращения: 30.07.2019 г.).

13. Бушуев Р.Ю., Колосов А.В., Степанов И.Б., и др. Устройство мониторинга рельсового транспортного средства и магнитоэлектрический генератор. Патент РФ на изобретение RU № 2627959. URL: <https://patentinform.ru/inventions/reg-2627959.html> <http://www.freepatent.ru/patents/2574917> (дата обращения: 13.04.2019 г.).

14. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 августа 2017 г. № 1756-п [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxiLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (дата обращения: 01.03.2019 г.).

15. Матяш Ю.И., Гаджиев И.А. Совершенствование устройства электропитания для бортовой системы диагностирования технического состояния грузового вагона на ходу поезда // Известия Транссиба. 2018. № 1 (33). С. 48–55.

16. Матяш Ю.И., Гаджиев И.А. Разработка автономного источника электропитания бортовой системы диагностирования технического состояния грузовых вагонов // Информационные и управляющие системы на транспорте и в промышленности. Материалы II всероссийской научно-технической конференции. 2017. С. 43–47.

17. Пряников С.А. Повышение надежности автосцепного устройства грузовых вагонов на основе совершенствования

контроля технического состояния пружинно-фрикционных поглощающих аппаратов при ремонте: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Екатеринбург, 2008. 22 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01003459863> (дата обращения: 02.03.2019 г.).

18. Гуров А. М. Оценка влияния параметров современных амортизаторов удара на продольную динамику поезда: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Орел, 2007. 23 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01003161060> (дата обращения: 02.03.2019 г.).

19. Израилев В. Я. Сравнительная оценка методов исследования напряженно-деформированного состояния элементов вагона при продольных динамических воздействиях: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Брянск, 1997. 21 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01000112641> (дата обращения: 02.03.2019 г.).

20. Козулин Г. Респект без повреждений. Gudok.ru [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1443294&archive=2018.11.20> (дата обращения: 18.03.2019 г.).

21. Оленцевич А. А., Гуд Ю. О., Белоголов Ю. И. Неисполнение требований регламентирующих документов как одна из причин низкого уровня безопасности [Электронный ресурс] // Молодая наука Сибири: электронный научный журнал. 2018. № 2. URL: http://mnv.irsups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/yu.i_belogolov_a.a_olencevich_yu.o_gud_2.pdf (дата обращения: 11.03.2019 г.).

22. Козубенко В. Г., Кибальченко О. В., Шевченко К. Д., Суханова О. Н. Влияние продольных динамических сил в грузовом поезде на срабатывание воздухораспределителей на самоторможение // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2000. № 2. С. 111–113.

23. Асадченко В. Р. Анализ тормозной эффективности поездов при их разрыве // Транспорт Урала. 2006. № 1 (8). С. 39–44.

24. Ромен Ю. С., Мугинштейн Л. А., Неверова Л. И. Влияние продольных сил в поездах на опасность схода вагонов в зависимости от их загрузки // Транспорт Российской Федерации. 2013. № 3 (46). С. 64–68.

25. Краснощёк А. Стабильное движение вперед. Gudok.ru [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1452527&archive=2019.02.07> (дата обращения: 15.03.2019 г.).

26. Акопов Л. Верные выводы. Gudok.ru. Волжская магистраль [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://www.gudok.ru/zdr/168/?ID=1451321&archive=49075> (дата обращения: 02.03.2019 г.).

27. Жиров П. Д. Оценка влияния эксплуатационных факторов на эффективность работы поглощающих аппаратов автосцепки: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Брянск, 2012. 18 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01005009243> (дата обращения: 02.03.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МАТЯШ Юрий Иванович,
д-р техн. наук, профессор кафедры «Вагоны», ОмГУПС

ГАДЖИЕВ Ибрагим Азимович,
аспирант кафедры «Вагоны», ОмГУПС

Статья поступила в редакцию 21.03.2019 г., актуализирована 18.06.2019 г., принята к публикации 04.07.2019 г.

Development of an onboard monitoring device for freight car shock-absorbing device's technical condition

Yu. I. MATYASH, I. A. GADZHIEV

Omsk State Transport University (OSTU), 644046, Omsk, Russia

Abstract. Good technical condition of rolling stock is an important consideration for increasing safety in train traffic. Safety is the state's priority in the development and modernization of the railroad industry. The goal of this study is to develop an onboard monitoring device for a freight car's shock-absorbing device's technical condition. This justifies the need to control the serviceability of the unit and the urgency to equip freight cars with onboard monitoring systems. The following tasks were set and resolved: collection and analysis of information on the dynamics of changes in the number of faults of freight cars serviced at the sites of the current uncoupling repair of Russian companies from 2008 to 2018; study the expediency of the primary control of serviceability of different units of the freight car; collection and analysis of information including statistical data, scientific publications, and thesis on the effect of a failed shock-absorbing device on other units of the freight car and reduction of the train's overall traffic safety. The study enabled development and manufacturing of a mockup onboard monitoring device freight car shock-absorbing device's technical condition, with its functional capabilities described. To increase the diagnostics accuracy, technology defining failure criteria of the controlled unit and reduction of its operation effectiveness is developed. The main recommendations for using the proposed onboard device are also provided. The principal advantages of the device are underlined and reasons for freight rolling stock owners to equip their cars with the developed system are advanced.

Keywords: traffic safety; car; transportation of cargo; monitoring system; shock-absorbing device; failures interaction; fault criteria

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-218-226>

REFERENCES

1. RZD-Partner. *Revolyutsionnye innovatsii na sluzhbe u potrebitelya*. URL: http://www.tvsz.ru/press_center/company_in_the_media/74.html (retrieved on 08.02.2019).
2. Kharybin I. A., Orlova A. M., Dodonov A. V. *Sovershenstvovat' khodovuyu chast' gruzovykh vagonov* [Improving the wheels and axles of freight cars: Engineering Center of Car Building]. URL: http://www.engcenter.ru/press/list_vagon/vvh-7-rus.pdf (retrieved on 08.02.2019).
3. PKB TsV OAO "RZD". *Spravochnye materialy po prichinam postupleniya gruzovykh vagonov v tekushchiy ottsepochnyy remont*. URL: <http://pkbcv.ru/docs/%D0%A2%D0%9E%D0%A0%202018-09.pdf> (retrieved on 18.02.2019).
4. RZD-Partner. Men'shakova M. *S 2010 g. ob'em vypuska gruzovykh vagonov iz tekushchego ottsepochnogo remonta vyros bole chem v dva raza*. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/s-2010-g--obem-vypuska-gruzovykh-vagonov-iz-tekushchego-ottsepochnogo-remonta-vyros-bolee-chem-v-dv/> (retrieved on 28.07.2019).
5. Pletnev S. *Vagon na polnom pansione: kak sokratit' vremya remonta*. Gudok.ru [Gudok. News of the railway, motor, air and water transport, machine building and logistics]. URL: <https://www.gudok.ru/freighttrans/?ID=1451656> (retrieved on 18.02.2019).
6. Savin G. V., Giniyatullin R. N., Potaptseva E. V. *Spetsifika formirovaniya stoimosti tekushchego ottsepochnogo remonta v Rossiyskoy Federatsii*. Upravlenets, 2016, no. 4(62). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-formirovaniya-stoimosti-tekushchego-ottsepochnogo-remonta-v-rossiyskoy-federatsii> (retrieved on 18.02.2019).

7. Khusainov F. *Khoteli kak luchshe: pochemu na rynek vernul'sya defitsit gruzovykh vagonov*. RBK. Mnenie [Opinion. RBC]. URL: <https://www.rbc.ru/opinions/economics/26/10/2017/59f1e87a9a79470d83fc12b5> (retrieved on 9.02.2019).

8. OAO "RZD". *Raskrytie informatsii OAO "RZD"* [Disclosure of information of JSC "RZD"]. URL: http://www.rzd.ru/openinfo/public/ru?STRUCTURE_ID=5131&archive=1&textSearch=&form_id=28&year_id=2019 (retrieved on 17.03.2019).

9. OAO "RZD". *Kratkoe opisaniye Strategii razvitiya kholdinga "RZD" do 2030 goda*. URL: <http://ar2015.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030> (retrieved on 12.02.2019).

10. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A. *Razrabotka besprovodnoy bortovoy informatsionnoy sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov gruzovogo vagona na khodu poezda*. Informatsionnye i upravlyayushchie sistemy na transporte i v promyshlennosti / Materialy II vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Omsk. Omsk State Transport University, 2018, pp. 99–107.

11. *WaggonTracker PJM Electronic resource*: PJM — Railway Systems Solutions. URL: <https://pjm.co.at/en/waggontracker/> (retrieved on 30.07.2019).

12. Lebedeva E. *Nash treker rabotaet i zimoy* [Elektronnyy resurs]. Gudok.ru [Gudok. News of the railway, motor, air and water transport, machine building and logistics]. URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1388975> (retrieved on 30.07.2019).

13. Patent RF na izobretenie RU № 2627959. Bushuev R. Yu., Kolosov A. V., Stepanov I. B., i dr. *Ustroystvo monitoringa rel'sovogo transportnogo sredstva i magnitoelektricheskii generator* [Pat. 2627959 Russian Federation, MPK V 61 L 25/04. Arrangement of monitoring of the rail transport and permanent magnet generator / Bushuev R. Yu., Kolosov A. V., Stepanov I. B., Sysenko R. V., Tyupin R. V. no. 2016128518; statement dated 13.07.2016; published on 14.08.2017].

14. *Strategiya razvitiya transportnogo mashinostroeniya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda*: utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 avgusta 2017 g. № 1756-r [Enactment of the Government of the Russian Federation "Strategy of development of transport engineering in the Russian Federation until 2030", dated August 17, 2017 no. 1756-r. Government of Russia]. URL: <http://static.government.ru/media/files/klnxLOfYHPRsEe6cD9NsI0KM32LMacz.pdf> (retrieved on 01.03.2019).

15. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A. *Sovershenstvovanie ustroystva elektropitaniya dlya bortovoy sistemy diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovogo vagona na khodu poezda*. Izvestiya Transsiba [News of Transsib], 2018, no. 1 (33), pp. 48–55.

16. Matyash Yu. I., Gadzhiev I. A. *Razrabotka avtonomnogo istochnika elektropitaniya bortovoy sistemy diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gruzovykh vagonov*. Informatsionnye i upravlyayushchie sistemy na transporte i v promyshlennosti / Materialy II vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Development of the autonomous electric power source of the onboard system of diagnostics of the freight car technical condition / Information and control systems for transport and industry: material of II All-Russia scientific-practical conference]. Omsk, Omsk State Transport University, 2017, pp. 43–47.

17. Pryanikov S. A. *Povysheniye nadezhnosti avtostsepnogo ustroystva gruzovykh vagonov na osnove sovershenstvovaniya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya pruzhinno-friktsionnykh pogloshchayushchikh apparatov pri remonte*: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Enhancement of reliability of the freight cars automatic coupling device based on improvement of the technical condition

control of the spring-loaded friction draft gears for repair: dissertation of the candidate of technical sciences: 05.22.07]. Yekaterinburg, 2008, 126 p.

18. Gurov A. M. *Otsenka vliyaniya parametrov sovremennykh amortizatorov udara na prodol'nuyu dinamiku poezda*: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Orel, 2007, 23 p.

19. Izrailev V. Ya. *Sravnitel'naya otsenka metodov issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov vagona pri prodol'nykh dinamicheskikh vozdustvnykh: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Bryansk, 1997, 21 p.*

20. Kozulin G. *Rospusk bez povrezhdeniy* [Elektronnyy resurs]. Gudok.ru. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1443294&archive=2018.11.20> (retrieved on 18.03.2019).

21. Olentsevich A. A., Gud Yu. O., Belogolov Yu. I. *Neispolneniye trebovaniy reglamentiruyushchikh dokumentov kak odna iz prichin nizkogo urovnya bezopasnosti*. Molodaya nauka Sibiri: elektronnyy nauchnyy zhurnal [Young science of Siberia: electronic scientific journal], 2018, no. 2. URL: http://mnv.irknps.ru/sites/default/files/articles_pdf_files/ya.i._belogolov_a.a._olentsevich_yu.o._gud_2.pdf (retrieved on 11.03.2019).

22. Kozubenko V. G., Kibal'chenko O. V., Shevchenko K. D., Sukhanova O. N. *Vliyanie prodol'nykh dinamicheskikh sil v gruzovom poezde na srabatyvaniye vozdukhospredeliteley na samotormozheniye*. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of Rostov state railroad university], 2000, no. 2, pp. 111–113.

23. Asadchenko V. R. *Analiz tormoznoy effektivnosti poezdov pri ikh razryve*. Transport Urala [Transport of the Urals], 2006, no. 1 (8), pp. 39–44.

24. Romen Yu. S., Muginshtein L. A., Neverova L. I. *Vliyanie pro dol'nykh sil v poezdakh na opasnost' skhoda vagonov v zavisimosti ot ikh zagruzki*. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation], 2013, no. 3 (46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-prodolnyh-sil-v-poezdah-na-opasnost-shoda-vagonov-v-zavisimosti-ot-ih-zagruzki> (retrieved on 11.02.2019).

25. Krasnoshchek A. *Stabil'noe dvizheniye vpered* [Elektronnyy resurs]. [Stable move forward (Electronic resource)]. Gudok.ru [Gudok: News of the railway, motor, air and water transport, machine building and logistics]. URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1452527&archive=2019.02.07> (retrieved on 15.03.2019).

26. Akopov L. *Vernye vyvody. Volzhskaya magistral'* [Elektronnyy resurs] [Correct conclusions (Electronic resource)]. Gudok.ru. [Gudok: News of the railway, motor, air and water transport, machine building and logistics]. URL: <https://www.gudok.ru/zdr/168/?ID=1451321&archive=49075> (retrieved on 02.03.2019).

27. Zhirov P. D. *Otsenka vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na effektivnost' raboty pogloshchayushchikh apparatov avtostseпки*: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Bryansk, 2012, 18 p.

ABOUT THE AUTHORS

Yury I. MATYASH,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department "Cars", OSTU

Ibragim A. GADZHIEV,

Postgraduate Student,
Department "Cars", OSTU

Received 21.03.2019

Revised 18.06.2019

Accepted 04.07.2019

■ E-mail: ibragimgadzhiev@gmail.com (I. A. Gadzhiev)

Технология автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи кузова транспортного средства с использованием удаленного сервера

А. А. ГОЛУБИН¹, Т. И. НАБАТЧИКОВА², С. Н. НАУМЕНКО³

¹ Общество с ограниченной ответственностью «Центр безопасности информации» (ООО «ЦБИ»), Королев, 141090, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

³ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

Аннотация. Представлена технология автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи K ограждающих конструкций теплоизолированных транспортных средств с использованием удаленного сервера. Лежащий в ее основе экспресс-метод дает возможность получать реальное значение K теплоизолированного транспортного средства без дополнительных трудозатрат и потерь времени на выполнение сложных математических расчетов. Специализирующийся на проведении теплотехнических испытаний транспортных средств персонал испытательных центров получает инструмент, позволяющий проводить расчеты K удаленно, находясь в любой точке земного шара. Для получения значений K достаточно отправить на сервер измеренные в ходе проведения теплотехнических испытаний за 5,5 ч три контролируемых параметра, а именно: разницу температур внутри и снаружи кузова испытываемого объекта, суммарную мощность электронагревателей и геометрическую площадь теплопередающей поверхности, после чего пользователь оперативно получает расчетное значение K . Предлагаемая технология расширяет географию деятельности испытательных центров, а расчетные значения K могут официально вноситься в паспорт транспортного средства.

Ключевые слова: экспресс-метод определения коэффициента теплопередачи; теплоограждающие конструкции транспортных средств; теплотехнические испытания; микроклимат

Введение. Основным параметром, определяемым в ходе проведения теплотехнических испытаний кузовов теплоизолированных вагонов или кабин машинистов локомотивов, является значение коэффициента теплопередачи — K , Вт/(м²·К). В соответствии с действующими стандартами установлены нормативные показатели значения K , несоответствие которым приводит к заметному увеличению расходов энергоресурсов транспортным средством в период эксплуатации.

В основе технологии автоматизированного расчета K (далее ТАРК) лежит зарегистрированный АО «ВНИИЖТ» в качестве ноу-хау экспресс-метод по его определению, позволяющий сократить на 90 %

длительность проводимых теплотехнических испытаний по сравнению с использованием традиционного равновесного метода [1]. Для автоматизации процесса расчета K была создана и описана структура программы для ЭВМ [2]. Сопоставление значений K , полученных в результате проведенных теплотехнических испытаний транспортных средств с помощью равновесного метода и определенных с помощью ТАРК, показало их высокую сходимость как для кабин машинистов локомотивов, так и для кузовов пассажирских вагонов дальнего следования и вагонов рефрижераторного подвижного состава.

Вместе с тем при апробации экспресс-метода в испытательных центрах из-за применения достаточно сложного математического аппарата возник ряд трудностей, связанных с обработкой опытных данных и расчетом значения K . Была также выявлена необходимость наличия защищенной базы данных с результатами испытаний.

Устранение выявленных недостатков привело к необходимости создания сервера, позволяющего использовать технологию расчета коэффициента теплопередачи транспортного средства удаленно и хранить полученные в испытательных центрах результаты испытаний в единой базе данных.

Как видно из представленной на рис. 1 схемы взаимодействия сервера с испытательными центрами, все промежуточные данные, полученные в ходе выполнения испытаний, направляются на сервер для проведения оперативного расчета K и их последующего хранения в базе данных по каждому испытываемому объекту. Впоследствии по номеру вагона или локомотива не составит труда отследить динамику изменения величины коэффициента теплопередачи и с высокой точностью спрогнозировать время предстоящего вида технического обслуживания или ремонта теплоограждающих конструкций. Таким

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (С. Н. Науменко)

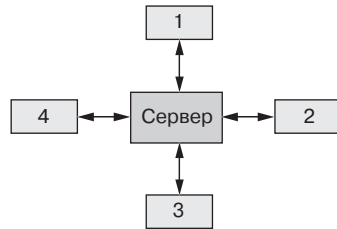


Рис. 1. Схема взаимодействия сервера с испытательными центрами:
1, 2, 3, 4 — испытательные центры по определению величины
коэффициента теплопередачи K

Fig. 1. Diagram of interaction of the server and test centers:
1, 2, 3, 4 — test centers for determining the heat transfer
coefficient K

образом, очевидно, что нет необходимости проведения испытаний в одном или ограниченном количестве испытательных центров.

Результаты адаптации ТАРК показали высокую точность проведения расчетов K и удобство ее применения. Для проведения расчета искомого коэффициента отсутствует необходимость в дорогостоящем оборудовании или привлечении специально подготовленного персонала для вычисления его величины. Достаточно иметь возможность выхода в интернет, в том числе и с мобильных устройств. Сервер проводит расчет с использованием программы «Система экспресс-оценки коэффициента теплопередачи транспортных средств» [3].

На рис. 2 показан интуитивно понятный интерфейс сервера для расчета коэффициента теплопередачи, запущенный в тестовую эксплуатацию на временном оборудовании для предварительного вычисления необходимых параметров и последующего запуска системы в промышленную эксплуатацию [4].

Сервер проводит автоматизированный расчет K на основе промежуточных данных, полученных в период проведения теплотехнических испытаний в соответствии с требованиями действующих стандартов и Соглашения о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных

транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [5–9].

Процедура проведения испытаний заключается в следующем. Испытываемый объект устанавливают в цехе (закрытом помещении) или в специализированном испытательном центре любой страны и подключают измерительную аппаратуру для получения параметров мощности, потребляемой электрообогревателями, а также температуры наружного (в цехе или термоизолированной камере) и внутреннего (внутри объекта) воздуха. Погрешность термоизмерительной аппаратуры должна составлять не более $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Измерение мощности электрообогревателей производят ваттметром или другой аппаратурой классом не более 1,5. Температуру воздуха в цехе (камере) поддерживают постоянной, с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, регламентированной в подготовительный период проведения теплотехнических испытаний.

Определение средней поверхности теплопередачи кузова объекта S выполняют по следующей формуле:

$$S = \sqrt{S_i S_e}, \quad (1)$$

где S_i , S_e — внутренняя и наружная поверхности кузова объекта, м^2 .

Вычисление S_i и S_e осуществляется с учетом особенностей конструкции кузова объекта или неровностей поверхности, таких как фаски, надколесные дуги и аналогичные элементы. Эти особенности или неровности учитываются и отмечаются в соответствующей рубрике протоколов испытаний; однако если кузов имеет покрытие типа гофрированного листа, то искомой поверхностью S должна являться прямая поверхность этого покрытия, а не ее развертка.

Внутри испытываемого объекта равномерно размещают не менее чем в 18 точках термодатчики измерительной аппаратуры. Места расположения датчиков измерения температуры внутри кузова в форме параллелепипеда находятся на расстоянии 10 см от



Рис. 2. Визуализация основного окна сервера
Fig. 2. Visualization of the main server window

стенки в углах кузова и в центре четырех внутренних плоскостей кузова, имеющих наибольшую площадь. Схема расположения датчиков показана на рис. 3.

Если кузов транспортного средства не имеет форму параллелепипеда, то распределение 18 точек измерения должно осуществляться наиболее равномерно с учетом формы кузова.

Все двери помещения теплоизолированного транспортного средства (ТТС) должны быть закрыты, электрооборудование и устройство охлаждения или кондиционирования воздуха выключены. Отверстия для забора воздуха извне и выпуска отводимого воздуха должны быть плотно закрыты (без дополнительной теплоизоляции). Внутри кузова ТТС необходимо установить электрообогреватели, состоящие из нагревательных элементов мощностью от 0,2 до 1 кВт в расчете на каждые 10 м³ помещения. Прогрев кузова производят автономными электронагревательными устройствами, которые не должны быть излучающими (или должны иметь экраны инфракрасного излучения). Электронагреватели размещаются таким образом, чтобы поток теплого воздуха не был напрямую направлен на прогрев стенки, а распределение температур по объему помещения было максимально равномерным. Должна поддерживаться постоянная мощность систем нагрева.

Продолжительность проведения испытаний — не менее 5,5 ч. В этот период следует производить запись всех показаний с термодатчиков, ваттметра (амперметра, вольтметра) через каждые 30 мин, то есть 12 раз.

Средняя температура воздуха внутри ТТС $t_{\text{вн}}$, °С, вычисляется по формуле

$$t_{\text{вн}} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{\text{вн}ji}}{m}, \quad (2)$$

где j — номер точки измерения температуры; m — число точек измерения; $t_{\text{вн}ji}$ — температура воздуха в j -й точке помещения в i -й момент времени измерений; i — порядковый номер точки измерения (в m точках).

Средняя наружная температура воздуха $t_{\text{нр}}$, °С, вычисляется как

$$t_{\text{нр}} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{jo}}{m}, \quad (3)$$

где t_{jo} — температура наружного воздуха в j -й точке; j — порядковый номер точки измерения; m — число точек измерения.

Разность осредненной внутренней и наружной температур θ вычисляется по формуле

$$\theta = t_{\text{вн}} - t_{\text{нр}}. \quad (4)$$

Полученные результаты испытаний достаточно внести в заявку на расчет коэффициента теплопередачи,

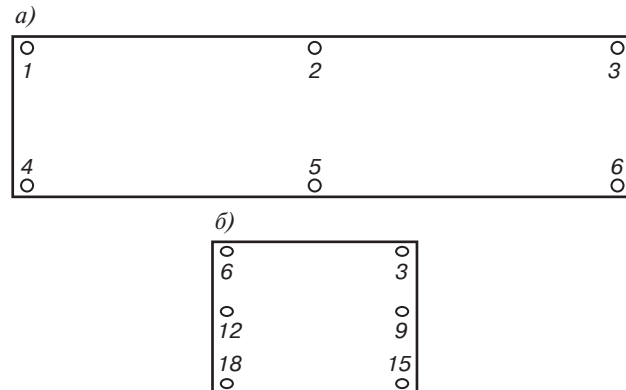


Рис. 3. Места установки датчиков измерения температуры в кузове теплоизолированного транспортного средства (термодатчики 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17 не показаны: они размещаются равномерно между указанными на схеме датчиками): а — вид сверху; б — вид сбоку

Fig. 3. Points for installation of sensors for temperature metering in the body of the heat insulated vehicle (temperature detectors 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17 are not shown, they are installed uniformly between the sensors on the diagram): а — top view; б — side view

указав необходимую информацию в диалоговом окне (рис. 4). Результаты вычислений будут отправлены на указанный при регистрации адрес электронной почты.

Эффективность предложенной технологии проверена путем сравнения полученных ранее результатов испытаний теплоизолированных кузовов изотермических и пассажирских вагонов с результатами вычислений, выполненных при помощи ТАРК. Для расчета K из массива данных, полученных в результате проведения теплотехнических испытаний с использованием равновесного метода, были взяты необходимые параметры за первые 5,5 ч. Далее был проведен автоматизированный расчет с использованием удаленного сервера.

Результаты расчетов, выполненные с помощью сервера по технологии ТАРК, практически полностью совпали с данными, полученными в ходе теплотехнических испытаний равновесным методом. Проведенные расчеты погрешности полученных значений K выявили величину расхождения, не превышающую 1 % [10].

Использование ТАРК значительно сокращает время, необходимое для обработки результатов испытаний, при этом исключается возможность получения погрешности, связанной с человеческим фактором в ходе выполнения расчетов.

Следует отметить, что к одному из драйверов использования ТАРК можно отнести утвержденные Минтрансом России новые правила перевозки скоропортящихся грузов [11], позволяющие грузоотправителю и грузополучателю самостоятельно выбирать для перевозки этих грузов транспортное средство. Критерием выбора ими транспортного средства, способного обеспечить доставку скоропортящегося груза

Рис. 4. Диалоговое окно сервера с пользователем
Fig. 4. Dialogue box of server and user

в соответствии с нормативными режимами его хранения, должна стать величина коэффициента теплопередачи кузова ТТС.

Выводы. 1. Применение технологии автоматизированного расчета коэффициента теплопередачи кузова теплоизолированного транспортного средства с удаленным сервером (ТАРК) позволяет испытательным центрам использовать ее в любой точке земного шара, где имеется интернет.

2. Учитывая, что для автоматизированного расчета K экспресс-методом требуются экспериментальные данные теплотехнических испытаний только за первые 5,5 ч, в течение которых допускаются колебания внешней температуры $\pm 2^\circ\text{C}$, устраняется необходимость в специальных помещениях или теплоизолированных камерах, способных обеспечивать в соответствии с требованиями нормативно-технической документации в установившийся период колебания внешних температур воздуха в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

3. В случае применения ТАРК испытательные центры могут получить существенную экономию не только в связи с уменьшением трудозатрат на проведение расчетных операций, но и на сокращении ресурсов, необходимых для содержания оргтехники, в том числе с целью длительного (на весь срок службы транспортного средства) хранения результатов испытаний.

4. Экономический эффект для производителя транспортного средства заключается в отсутствии необходимости выполнения испытаний в определенном испытательном центре, а для эксплуатирующей организации — в значительном уменьшении времени простоя транспортного средства в испытательном центре, прямо влияющем на упущенную выгоду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубин А.А., Науменко С.Н. Разработка алгоритма по определению коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства на основе результатов анализа происходящих в нем теплообменных процессов // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 5. С. 306–311. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.
2. Голубин А.А., Науменко С.Н. Программа для ЭВМ по определению коэффициента теплопередачи как инструмент экономики топливно-энергетических ресурсов // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 1. С. 44–48. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-44-48.
3. Голубин А.А., Науменко С.Н. Система экспресс-оценки коэффициента теплопередачи транспортных средств. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2017618464 от 01.08.2017 [Электронный ресурс]. URL: https://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/017/618/464/2017618464-00001/DOCUMENT.PDF (дата обращения 21.01.2019 г.).
4. Сервер для расчета коэффициента теплоотдачи кузова вагона с теплоизоляцией [Электронный ресурс]. URL: <https://alekseigolubin.wixsite.com/mysite> (дата обращения 21.01.2019 г.).
5. Авторское право Организации Объединенных Наций, 2017. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [Электронный ресурс]. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/2017/1712383R.pdf (дата обращения 21.01.2019 г.).
6. ГОСТ 33661–2015 Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200130100> (дата обращения 21.01.2019 г.).
7. ГОСТ Р 55527–2013 Ограждающие конструкции помещений железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний по определению теплотехнических показателей [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103728> (дата обращения 21.01.2019 г.).
8. ГОСТ Р 55182-2012 Вагоны пассажирские локомотивной тяги. Общие технические требования [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098590> (дата обращения 21.01.2019 г.).

9. СТ ССФЖТ ЦТ-ЦП129-2002 Локомотивы, моторвагонный и специальный подвижной состав железных дорог. Кабины, салоны, служебные и бытовые помещения. Методики испытаний по показателям систем обеспечения микроклимата: утв. МПС 25.06.2003. № Р-639у требования [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293797/4293797670.htm> (дата обращения 21.01.2019 г.).

10. Науменко С. Н., Теймуразов Н. С., Голубин А. А. Оценка точности определения в депоовских условиях коэффициента теплопередачи кузова изотермического вагона // Сборник докладов участников объединенной научной сессии советов РАН на тему «Энергосбережение и защита окружающей среды на теплоэнергетических объектах железнодорожного транспорта, промышленности и жилищно-коммунального хозяйства». М.: МИИТ, 2008. С. 189–192.

11. Приказ Министерства транспорта РФ от 4 марта 2019 г. № 66 «Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом скоропортящихся грузов» (зарегистрировано в Минюсте РФ 10 июня 2019 г.) [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/72265752/> (дата обращения 21.01.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛУБИН Алексей Александрович, канд. техн. наук, инженер-испытатель, отдел испытаний программных средств испытательной лаборатории, ООО «ЦБИ»

НАБАТЧИКОВА Татьяна Игоревна, аспирант, кафедра «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

НАУМЕНКО Сергей Николаевич, д-р техн. наук, начальник отдела, Центр электрификации и теплоэнергетики, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 20.02.2019 г., актуализирована 11.05.2019 г., принята к публикации 10.06.2019 г.

Automated analysis technology for the transport superstructure heat transfer coefficient using a remote server

A. A. GOLUBIN¹, T. I. NABATCHIKOVA², S. N. NAUMENKO³

¹ Limited Liability Company "Information Safety Center" (LLC "ISC"), Korolev, 141090, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT)), Moscow, 127994, Russia

³ Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. The main parameter determined in heat engineering tests of heat insulated cars superstructures or the locomotive operator's cabs is the heat transfer coefficient K . The study introduces automated analysis technology for the heat transfer coefficient K of enclosure structures of the heat insulated transport means using a remote server. The underlying method provides coefficient K of the heat insulated transport means without additional work and time loss for complicated calculations. Personnel of test laboratories involved in heat engineering tests of vehicles possess tools for remotely calculating K , from any point in the world with internet access. To obtain K three controlled parameters measured during the heat engineering tests for 5.5 h including: the difference of the inside and outside temperature of the test object superstructure, total power of the electric heaters and geometric area of the heat transfer surface are sent to the server, after which the user promptly receives the calculated K . The economic effect of introducing the proposed technology for vehicle manufacture is the absence of required tests conducted at the test center; for an operating company — a significant reduction of the idle time of the vehicle at the test center directly affects the loss of profit. The proposed technology expands the area of operation of the test centers, while calculated K values are officially input into the data sheet of the vehicle.

Keywords: express method for heat transfer coefficient determination; heat enclosure structures of vehicles; heat engineering tests; microclimate

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-227-232>

REFERENCES

1. Golubin A. A., Naumenko S. N. *Razrabotka algoritma po opredeleniyu koeffitsienta teploperedachi kuzova izotermicheskogo transportnogo sredstva na osnove rezul'tatov analiza proiskhodnyashchikh v nem teploobmennyykh protsessov* [Development of an algorithm for determining the heat transfer coefficient of the body

of an isothermal vehicle based on the results of analysis of the heat exchange processes occurring in it]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 5, pp. 306–311. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.

2. Golubin A. A., Naumenko S. N. *Programma dlya EVM po opredeleniyu koeffitsienta teploperedachi kak instrument ekonomii toplivno-energeticheskikh resursov* [The computer program for determining the heat transfer coefficient as a tool for saving fuel and energy resources]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 1, pp. 44–48. DOI: 10.21780/2223-9731-2018-77-1-44-48.

3. Golubin A. A., Naumenko S. N. *Sistema ekspress-otsenki koeffitsienta teploperedachi transportnykh sredstv: gosudarstvennaya registratsiya programmy dlya EVM № 2017618464 ot 01.08.2017* [Elektronnyy resurs] [Express assessment system of the heat transfer coefficient of vehicles. Computer program. Certificate of registration in Rospatent no. 2017618464, dated 01.08.2017 (Electronic resource)]. URL: https://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/Doc/PrEVM/RUNWPR/000/002/017/618/464/2017618464-00001/DOCUMENT.PDF (retrieved on 21.01.2019).

4. *Server dlya rascheta koeffitsienta teploperedachi kuzova vagona s teploizolyatsiey* [Elektronnyy resurs] [Site for TARK adaptation (Electronic resource)]. URL: <https://alekseigolubin.wixsite.com/mysite> (retrieved on 21.01.2019).

5. Avtorskoe pravo Organizatsii Ob'edinennykh Natsiy, 2017. *Soglasenie o mezhdunarodnykh perevozkakh skoroportyashchikhsya pishchevykh produktov i o spetsial'nykh transportnykh sredstvakh, prednaznachennykh dlya etikh perevozok (SPS)* [Agreement on the international transportation of the perishable foods and on special transport intended for such transportations (RLS)]. UN, New-York and Geneva, 2015.

6. GOST 33661–2015 *Ograzhdayushchie konstruksii pome-shcheniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytaniy po opredeleniyu teplotekhnicheskikh pokazateley* [Fencing structures of the railway rolling stock premises. Methods of

tests for determination of heat engineering indicators]. Moscow, Standartinform, 2016, 37 p. (in Russ.).

7. GOST R 55527–2013 *Ograzhdayushchie konstruksii pome-shcheniy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metody ispytaniy po opredeleniyu teplotekhnicheskikh pokazateley* [Fencing structures of the railway rolling stock premises. Methods of tests for determination of heat engineering indicators]. Moscow, Standartinform, 2014, 28 p. (in Russ.).

8. GOST R 55182–2012 *Vagony passazhirskie lokomotivnoy tyagi. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [Passenger cars of the locomotive traction. General technical requirements]. Moscow, Standartinform, 2013, 24 p. (in Russ.).

9. *Lokomotivy, motorvagonnyy i spetsial'nyy podvizhnoy sostav zheleznikh dorog. Kabiny, salony, sluzhebnye i bytovye pome-shcheniya. Metodiki ispytaniy po pokazatelyam sistem obespecheniya mikroklimata: utv. MPS 25.06.2003. no. R-639u trebovaniya* [Standard of certification system on the federal railway transport ST SSFZhT TsT-TsP129-2002 Locomotives, multiple unit and special rolling stock of the railroads. Cabs, compartments, service and amenity premises. Test methods by the indicators of the microclimate providing system: approved by the Ministry of Railways on 25.06.2003, no. P-639y]. (in Russ.).

10. Naumenko S.N., Teimurazov N.S., Golubin A.A. *Otsenka tochnosti opredeleniya v depovskikh usloviyakh koeffi tsienta teploperedachi kuzova izotermicheskogo vagona / Sbornik dokladov uchastnikov ob'edinennoy nauchnoy sessii sovetov RAN na temu "Energobezopasnost i zashchita okruzhayushchey sredy na teploenergeticheskikh ob'ektakh zheleznodorozhnogo*

■ E-mail: naumenko.sergey@vniizht.ru (S. N. Naumenko)

transporta, promyshlennosti i zhilishchno-kommunal'nogo kho-zyaystva" [Assessment of accuracy in depot conditions of the heat transfer coefficient of the refrigerated car body / Collection of report of the participants of the united scientific session of the counsels of RAS Power saving and environment protection at the heat power facilities of the railway transport, industry and municipal services]. M., MIIT [Moscow, Moscow State University of Railway Engineering], 2008, pp. 189–192.

11. Rules of transportation by railroads of perishable freights: approved by the order of the Ministry of Railways of Russia on 04.03.2019, no. 66. (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey A. GOLUBIN,

Cand. Sci. (Eng.), Test Engineer of the Software Testing Department of the Test Laboratory of the Information Security Center, LLC "ISC"

Tat'yana I. NABATCHIKOVA,

Postgraduate Student of the Department of Heat Power Engineering of the Railway Transport, FGBOU VO RUT (MIIT)

Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, Center for Electrification and Heat Power Engineering, JSC "VNIIZhT"

Received 20.02.2019

Revised 11.05.2019

Accepted 10.06.2019

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

АСУ «Экспресс» — автоматизированная система управления пассажирскими перевозками на железнодорожном транспорте / под ред. А. В. Комиссарова. 2-е изд. М.: РАС, 2019. 68 с.

Коллектив авторов:

Г.А. Антонова, А.С. Бабенко, М.П. Берёзка, М.И. Бобренко-ва, Ю.А. Гаврина, Т.В. Гнисюк, М.А. Гупаленко, В.А. Добычина, С.Б. Елизаров, Н.Б. Караванова, Т.А. Карпеева, А.В. Комиссаров, С.П. Кузякова, Е.Ю. Лёнов, Н.Э. Магура, Е.А. Макарова, Е.А. Мартынова, О.В. Минаева, С.В. Муктепавел, О.В. Реванченкова, А.П. Рубинская, Е.М. Сивинцева, И.Н. Спесивцева, Е.И. Стаценкова, К.В. Суржин, М.В. Толмачёва, Г.М. Турсуматова, Е.В. Успенская.

В книге рассмотрены бизнес-процессы пассажирских перевозок с использованием автоматизированной системы управления пассажирскими перевозками «Экспресс-3».

Во втором издании актуализированы и расширены описания текущего состояния информационных технологий системы «Экспресс-3», книга стала более удобной для чтения.

Издание предназначено для руководителей и инженерно-технического состава пассажирского комплекса; специалистов, связанных с разработкой и внедрением информационных технологий на российских железных дорогах; научных работников, преподавателей и студентов транспортных вузов.

По вопросам приобретения книг обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.

«Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении»: колл. монография / под ред. А. М. Бржезовского. М.: РАС, 2019. 152 с.

Авторы: к.т.н. А. М. Бржезовский — редактор (предисловие, 1.1, 1.2, 1.4, 2–4, 5.1, заключение); к.т.н. Д. Н. Аршинцев (3.1–3.3, 4); инж. О. Г. Бржезовская (2.1); д.т.н. проф. Б. Э. Глюзберг (1.3; 5.2); инж. В. Г. Донец (5.2); к.т.н. А. В. Завертало (1.2); к.т.н. Д. Е. Кирюшин (3.2); к.т.н. М. В. Козлов (2.2, 3.4); к.т.н. И. Н. Максимов (5.1); инж. А. Г. Парчевский (4.1); к.т.н. И. В. Смелянский (3.1–3.3, 4); д.т.н. проф. Ю. С. Ромен (1.2, 1.4); к.т.н. Ю. С. Тихов (4.1); к.т.н. М. И. Титаренко (5.2); инж. С. В. Толмачев (3.1–3.3, 4, 5.1)

В монографии приведен обзор особенностей конструкции экипажной части скоростного и высокоскоростного пассажирского подвижного состава железных дорог шириной колеи 1520 мм.

Обобщены результаты комплексных ходовых и по воздействию на путь и на стрелочные переводы испытаний различных типов пассажирского подвижного состава, проведенные с целью условий обращения на линиях смешанного пассажирского и грузового движения.

Книга рассчитана на научных и инженерно-технических работников железнодорожного транспорта, а также может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

Новый способ контроля начала подачи и сгорания топлива в тепловозных дизелях

А. Ю. КОНЬКОВ, И. Д. КОНЬКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), Хабаровск, 680021, Россия

Аннотация. Правильная регулировка топливной аппаратуры дизеля является важным фактором, оказывающим влияние на экономические и экологические показатели двигателя, его надежность. По ряду причин угол опережения подачи топлива в эксплуатации может отклоняться от оптимального, что требует своевременного контроля и регулировки этого параметра. Особенно остро эта проблема стоит для дизелей с индивидуальными насосами высокого давления, в том числе для тепловозных. В статье изложен новый способ косвенного определения угла опережения подачи топлива на основе анализа сигнала первой производной давления — скорости его изменения. Способ не требует дополнительных измерений таких параметров, как угол поворота коленчатого вала или положение поршня, и поэтому может представлять интерес для разработки простых и надежных средств оперативной диагностики. В работе представлен краткий анализ методов контроля угла опережения подачи топлива, нашедших применение при эксплуатации тепловозов в России, а также результаты теоретического исследования, выполненного с применением методов математического моделирования для тепловозного дизеля 1А-5Д49. По данным расчетного эксперимента предложен безразмерный критерий, определяемый по величине сигнала скорости изменения давления в характерных точках, позволяющий рассчитать угол опережения подачи топлива с использованием простой линейной зависимости. Экспериментальная проверка предлагаемого способа показала хорошее совпадение результатов с известными методами.

Ключевые слова: дизель; угол опережения подачи топлива; диагностика технического состояния; внутрицилиндровое давление; скорость изменения давления

Введение. Своевременность подачи топлива и его воспламенения в цилиндрах дизеля является важнейшим регулировочным параметром, определяющим протекание рабочего процесса двигателя. Согласно теории в двигателе внутреннего сгорания этот показатель количественно оценивается величиной угла опережения подачи топлива (УОПТ), под которым понимают угол поворота коленчатого вала, соответствующий началу нагнетательного хода плунжера топливного насоса высокого давления (ТНВД), отсчитанный относительно верхней мертвой точки (ВМТ). Отклонение УОПТ параметра в большую или меньшую сторону от оптимального значения ухудшает экономические и экологические показатели локомотива [1, 2], а возникающий при этом временный перегрев деталей цилиндропоршневой группы

является основной причиной образования трещин в крышках цилиндра и цилиндрических втулок [3]. Особенно остро проблема нарушения регулировки УОПТ стоит для дизелей с индивидуальными ТНВД, к которым относятся практически все тепловозные дизели, эксплуатируемые в настоящее время на железных дорогах России [4]. Все известные способы контроля УОПТ в эксплуатации предполагают привязку диагностического сигнала к углу поворота коленчатого вала, что требует доступа к маховику дизеля и установки на нем датчиков положения коленчатого вала. На практике последнее условие выполнимо не для всех серий тепловозов.

В настоящей работе теоретически и экспериментально обосновывается метод контроля УОПТ, основанный на анализе сигнала первой производной внутрицилиндрового давления и не требующий дополнительных измерений других параметров, например таких, как угол поворота коленчатого вала, положение поршня.

Краткий обзор способов контроля УОПТ. Значение УОПТ может быть определено на остановленном двигателе при снятых трубках высокого давления. На штуцер ТНВД устанавливается короткая прозрачная трубка, после чего проворачивают коленчатый вал и визуально определяют начало движения мениска топлива в трубке, сопоставляя этот момент времени с метками на маховике коленчатого вала. Несмотря на простоту оборудования, метод не нашел широкого применения для многоцилиндровых дизелей с индивидуальными ТНВД из-за своей трудоемкости и необходимости частичной разборки аппаратуры.

Начало подачи топлива может быть определено с использованием датчиков перемещения иглы (клапана) форсунки. Такие датчики с чувствительным элементом индуктивного типа, устанавливаемые на место дренажной трубки форсунки, разрабатывались ПКБ ЦТ ОАО «РЖД» (ПКБ ЦТ МПС) для дизелей типа 10Д100 начиная с 80-х гг. прошлого столетия и успешно применялись в локомотивных депо страны. Однако в настоящее время этот способ контроля УОПТ для современных дизелей тепловозов не получил развития ввиду изменившейся конструкции форсунок.

■ E-mail: akonkov1964@gmail.com (А. Ю. Коньков)

Возможной альтернативой датчикам перемещения иглы форсунки может служить способ, предложенный Ю. П. Макушевым и Л. Ю. Волковой, заключающийся в установке на штуцер дренажной магистрали датчика давления топлива. В работе [5] показано, что при герметизации дренажной магистрали сигнал давления в полостях форсунки над иглой хорошо коррелирует с сигналом перемещения иглы.

Практически удобным, не требующим демонтажа элементов топливной аппаратуры является способ, основанный на контроле вибрации деталей топливной аппаратуры [6]. При этом предполагается, что начало подачи топлива может быть обнаружено по переднему фронту сигнала вибрации при ударе иглы (клапана) форсунки об ограничитель. Опыт эксплуатации приборов топливной аппаратуры дизелей ППРФ-3 «ДЭСТА» на Дальневосточной железной дороге показал, что при недостаточной плотности запорного конуса клапана этот фронт выражен слабо, и поэтому достоверность метода может оказаться недостаточно высокой. Указанного недостатка лишен метод, основанный на измерении деформации трубопровода высокого давления. По мнению авторов [5, 7], этот способ отличается высокой информативностью ввиду того, что сигнал деформации хорошо коррелирует с давлением в трубопроводе. Однако для оценки перспектив развития этого метода нельзя не учитывать современную тенденцию дизелестроения — применение пожаробезопасных форсуночных трубок с двойными стенками, а также ненадежность существующих конструкций накладных датчиков деформаций. Датчики давления проточного типа на линии высокого давления топлива не нашли применения в практике эксплуатации тепловозных дизелей из-за значительной трудоемкости и необходимости демонтажа штатных форсуночных трубок.

Косвенный способ контроля УОПТ может быть осуществлен анализом сигнала давления в цилиндре дизеля. Появление в горячем воздухе топлива с относительно низкой температурой и последующее его испарение являются причиной интенсификации теплообмена и, как следствие, снижения скорости нарастания давления, что может быть выявлено при записи давления чувствительными средствами измерения [8, 9]. Ввиду относительно невысокой теплоты парообразования дизельного топлива, и особенно при малых цикловых подачах топлива на режимах частичной мощности, такой метод контроля не имеет, на наш взгляд, перспектив. Более надежным способом является контроль начала выделения теплоты в цилиндре двигателя, который может быть определен в ходе анализа того же сигнала давления в ряде случаев визуально по характерному перегибу на линии давления или в ходе последующего анализа, основанного на обработке индикаторной диаграммы. Методы

диагностики дизеля, основанные на анализе сигнала внутрицилиндрового давления, прочно обосновались в практике эксплуатации судовых дизелей [10], а в последнее время начинают получать все большее распространение и для тепловозных [11]. Алгоритмы и технология обнаружения неисправностей в большинстве случаев не раскрываются разработчиками. В некоторых случаях, например в работе [12], диагностика выполняется только по результатам сравнения сигналов давления, измеренных одновременно во всех цилиндрах дизеля, что существенно удорожает комплекс (из-за многократного, для тепловозных дизелей до 16, увеличения количества датчиков давления) и снижает его надежность. Во всех случаях предполагается установка датчика положения коленчатого вала.

Учитывая вышесказанное, можно констатировать, что проблема разработки методов оперативной диагностики процесса подачи топлива и его сгорания в дизелях остается актуальной для эксплуатации тепловозных дизелей. Возможным решением этой проблемы может стать способ, рассматриваемый в настоящей работе.

Скорость изменения давления: измерение и диагностический анализ. При измерении внутрицилиндрового давления широкое распространение получили пьезоэлектрические датчики давления, в которых сила, приложенная к чувствительному элементу (пьезоэлектрику), преобразуется в заряд на его обкладках. Традиционно дальнейшее преобразование осуществляется с применением усилителей заряда, которые функционально представляют собой интеграторы на операционных усилителях. В результате на выходе усилителя получают сигнал, пропорциональный давлению в цилиндре. В работе [13] показаны преимущества иного подхода, заключающегося в использовании преобразователя «ток—напряжение», выходной сигнал которого будет пропорционален первой производной давления по времени или скорости изменения давления. В первую очередь эти преимущества выражаются в снижении влияния шумов на конечные характеристики давления и тепловыделения в цилиндре. Необходимо подчеркнуть, что получение сигнала скорости изменения давления на этапе измерения и обработки аналоговыми средствами является принципиальным условием реализации метода, так как только в этом случае может быть получен качественный исходный сигнал в режиме реального времени. Численные методы дифференцирования индикаторных диаграмм потребуют сглаживания и фильтрации либо осреднения по большому числу циклов. И то и другое, на наш взгляд, нежелательно.

Для проведения экспериментальных исследований нами был изготовлен преобразователь «ток—напряжение» на базе операционного усилителя AD623

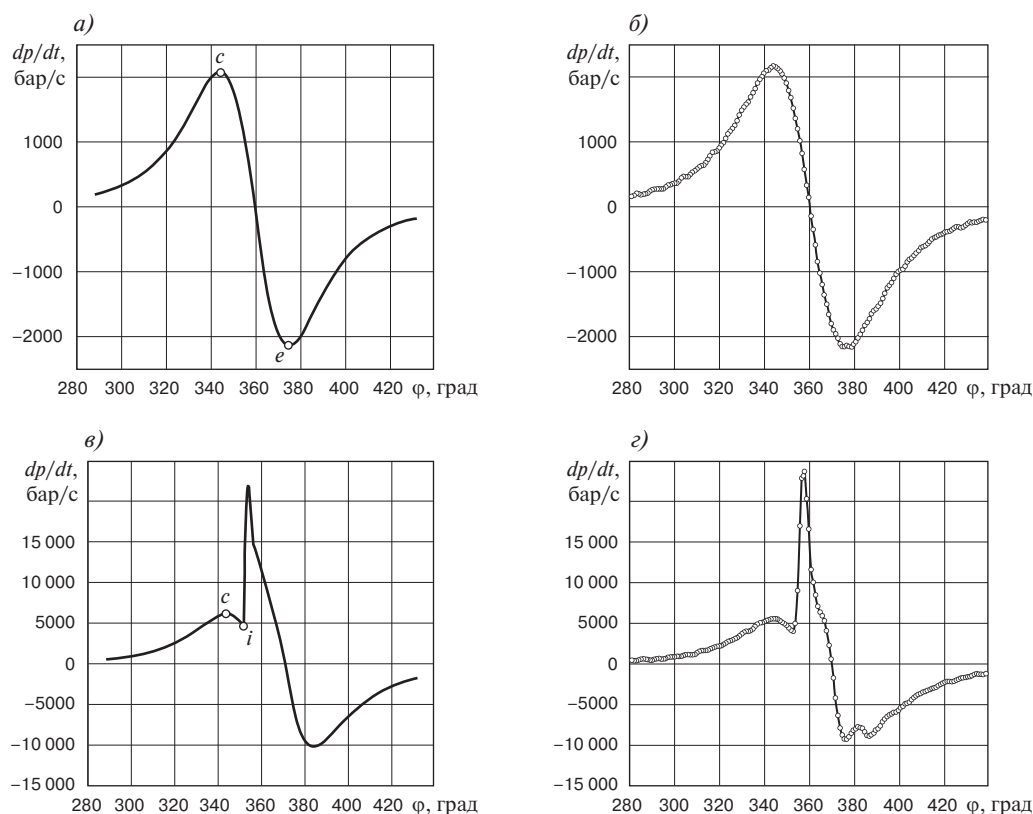


Рис. 1. Примеры сигнала скорости изменения давления в цилиндре дизеля 1А-5Д49: а — модель, подача топлива отключена, $n = 530 \text{ мин}^{-1}$; б — эксперимент, подача топлива отключена, $n = 530 \text{ мин}^{-1}$; в — модель, рабочий режим, $n = 820 \text{ мин}^{-1}$; г — эксперимент, рабочий режим, $n = 820 \text{ мин}^{-1}$; с — максимум на участке сжатия; i — начало видимого сгорания; e — минимум на участке расширения
 Fig. 1. Examples of the signal of the diesel cylinder pressure change rate 1A-5D49: а — model, fuel supply is off, $n = 530 \text{ min}^{-1}$; б — experiment, fuel supply is off, $n = 530 \text{ min}^{-1}$; в — model, operation mode, $n = 820 \text{ min}^{-1}$; г — experiment, operating mode, $n = 820 \text{ min}^{-1}$; с — maximum at compression area; i — beginning of visible combustion; e — minimum at expansion area

с входным каскадом на полевом транзисторе BF245A. Преобразователь проектировался для использования с пьезодатчиком RFT [15] на основе кристалла кварца.

На рис. 1 приведены фрагменты сигнала скорости изменения давления в области ВМТ конца такта сжатия, полученные при моделировании и экспериментально для двух случаев работы: с подачей и без подачи топлива в цилиндр. При моделировании сигнала без сгорания топлива использовались модель и ее компьютерная реализация, представленные в работе [16]. При теоретическом изучении закономерностей сигнала при сгорании топлива модель дополнялась характеристикой относительной скорости тепловыделения, полученной с помощью программы «Дизель-РК» [17].

При отсутствии подачи топлива давление в цилиндре увеличивается вплоть до ВМТ (360° угла поворота коленчатого вала), что соответствует положительным значениям скорости изменения давления. Максимум скорости нарастания давления приходится на точку с (рис. 1, а). Примечательно, что положение этой точки соответствует вполне определенному значению угла

поворота коленчатого вала, что может быть использовано для привязки сигнала давления к углу поворота коленчатого вала при асинхронном определении индикаторной диаграммы [18]. При расширении давление падает с переменной скоростью, которая достигает минимального значения в точке e. Абсолютные значения скорости давления в точках a и e определяются скоростным режимом двигателя, кинематикой кривошипно-шатунного механизма и количеством рабочего тела, участвующего в процессах сжатия и расширения. Последнее обстоятельство позволило нам ввести безразмерный показатель — критерий плотности цилиндра k_{seal} , основанный на значениях сигнала в указанных точках, однозначно связанный с количеством воздуха, вытекающего через уплотнение рабочей камеры двигателя:

$$k_{seal} = \frac{|(dp/dt)_e| - (dp/dt)_c}{(dp/dt)_c}, \quad (1)$$

где $(dp/dt)_c$ и $(dp/dt)_e$ — значения сигнала скорости давления в точках с и e соответственно [19].

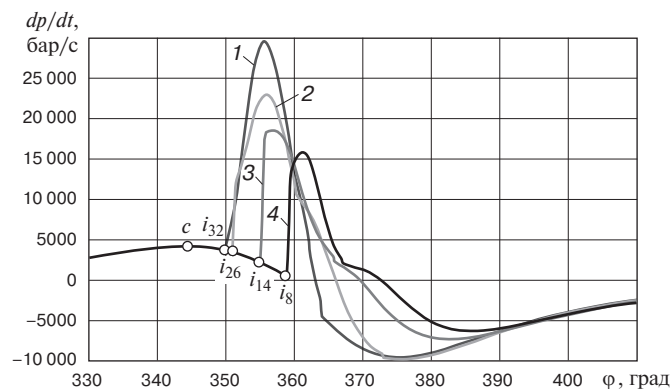


Рис. 2. Результаты моделирования при различных УОПТ (режим 1050 кВт при $n=610 \text{ мин}^{-1}$): 1 — $\varphi_{\text{опт}}=32^\circ$; 2 — $\varphi_{\text{опт}}=26^\circ$; 3 — $\varphi_{\text{опт}}=14^\circ$; 4 — $\varphi_{\text{опт}}=8^\circ$; c — максимальная скорость изменения давления на участке сжатия; i_j — точки, соответствующие началу сгорания при $\varphi_{\text{опт}}=j$

Fig. 2. Results of modeling with different FIAA (mode 1050 kW at $n=610 \text{ min}^{-1}$): 1 — $\varphi_{\text{опт}}=32^\circ$; 2 — $\varphi_{\text{опт}}=26^\circ$; 3 — $\varphi_{\text{опт}}=14^\circ$; 4 — $\varphi_{\text{опт}}=8^\circ$; c — maximum pressure change rate at the compression area; i_j — points corresponding to the beginning of combustion at $\varphi_{\text{опт}}=j$

Обоснование и экспериментальная проверка применимости критерия плотности цилиндра для среднеоборотных дизелей различного назначения представлены в работах [19, 20].

Критерий опережения подачи топлива. В задачах технической диагностики представляется более важным определение фазы начала сгорания (точка i на рис. 1, в), чем определение фазы начала подачи топлива. И хотя отклонение фазы воспламенения от оптимального значения может быть вызвано не только неверной регулировкой УОПТ, тем не менее устранение причины этого является необходимым условием для экономичной и безопасной работы дизеля. Известно [8, 9], что продолжительность периода задержки воспламенения зависит от свойств топлива (в первую очередь его цетанового числа), температуры и давления в цилиндре в момент начала подачи топлива. Если диагностика дизеля выполняется при равных условиях, то правомерно ожидать, что существует однозначная связь между началом подачи топлива и началом его воспламенения. На практике равенство условий может быть обеспечено поддержанием определенного режима дизеля при его

испытаниях. Кроме того, зависимости между УОПТ и началом сгорания топлива могут быть установлены экспериментально для различных режимов работы силовой установки.

Для выявления отклонения начала сгорания от оптимального значения можно предложить две стратегии. Первая предполагает определение продолжительности процесса на участке $c-i$ (см. рис. 1, в). Поскольку смещение точки c относительно ВМТ незначительное, то продолжительность этого участка может быть использована для определения угла начала сгорания относительно ВМТ без использования данных о положении коленчатого вала. Видимым недостатком такой стратегии является некоторая сложность точного определения фазы точки c , особенно для зашумленного сигнала.

Вторая стратегия основана на том, что при изменении угла начала видимого сгорания положение точки i изменяется, приближаясь (при раннем сгорании) или отдаляясь (при позднем сгорании) к точке c . Это позволяет предложить безразмерный критерий опережения подачи топлива в виде

$$k_{inj} = \frac{(dp/dt)_c - (dp/dt)_i}{2(dp/dt)_c}, \quad (2)$$

где $(dp/dt)_i$ — значения сигнала скорости давления в точке i .

При увеличении УОПТ соответственно уменьшается значение критерия (2). Теоретически его минимальное значение равняется нулю и могло бы быть достигнуто при совпадении точек c и i , что практически исключено по причине невозможности самовоспламенения при слишком большом УОПТ. Максимальное значение критерия по аналогичным причинам не может превышать единицы, и на практике оно будет всегда меньше. Поскольку критерий безразмерный, то для его вычисления необязательно определять значения физической величины скорости давления, расчет по формуле (2) можно выполнять по данным сигнала при условии линейной характеристики преобразователя. В этом случае тарирование измерительного канала не требуется.

Результаты определения УОПТ по различным методикам
Results of FIAA determination according to different methods

Диагноз	Критерий k_{inj}		УОПТ, град				Диагностический симптом (отклонение УОПТ от «эталона»), град	
			Эталонный цилиндр		Исследуемый цилиндр			
			«Магистраль»	По формуле (3)	«Магистраль»	По формуле (3)	«Магистраль»	По формуле (3)
Исправен	0,0526	0,0845	20,3	20,17	18,9	19,12	−1,4	−1,05
Поздний впрыск	0,0526	0,1207	20,3	20,17	17,4	17,94	−2,9	−2,23
Ранний впрыск	0,0947	0,0265	17,3	18,70	19,5	21,02	+2,2	+2,23
Слишком ранний впрыск	0,1371	0,0106	17,4	17,40	25,4	21,55	+8	+4,15

Для выявления характера влияния УОПТ на значение критерия (2) было выполнено расчетное исследование с использованием компьютерных моделей [16, 17]. Расчеты выполнялись для тепловозного дизеля 1А-5Д49, работающего на режиме 50 % мощности дизеля при частоте вращения коленчатого вала $n = 610 \text{ мин}^{-1}$, что примерно соответствует 6-й позиции контроллера машиниста при работе по тепловозной характеристике. Угол опережения подачи топлива изменялся в пределах от 8 до 34° с шагом 2°. При расчете периода задержки воспламенения использовалась модифицированная методика А. И. Толстова с поправочным коэффициентом 1,2 [17]. Параметры наддува и характеристика впрыскивания для всех расчетов сохранялись постоянными. На рис. 2 в качестве примера приведены графики изменения скорости давления в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала для нескольких углов опережения подачи топлива. На графики дополнительно нанесены точки, участвующие в расчете предлагаемого критерия: точка c (общая для всех графиков) и точки i_j , где числу j соответствует угол опережения подачи топлива (в градусах). Результаты анализа полученных кривых представлены на рис. 3.

Угол начала видимого сгорания смещается в предполагаемом направлении, но нелинейно. Это объясняется тем, что при больших УОПТ воспламенения увеличивается период задержки воспламенения (рис. 3, а) из-за относительно малой температуры и давления воздуха в цилиндре, в результате чего при очень больших УОПТ угол начала видимого сгорания практически не изменяется. Расчеты показали, что для выбранного режима при сколь угодно больших УОПТ сгорание не начинается раньше точки c , что подтверждает высказанный выше тезис.

При начале воспламенения в области от 0 до 7,5° до ВМТ, соответствующей интервалу УОПТ от 8 до 18°, зависимость предлагаемого критерия от УОПТ имеет практически линейный характер (линия 4 на рис. 3, б), что делает возможным реализацию простых и быстрых алгоритмов определения УОПТ для таких условий.

В качестве экспериментального обоснования работоспособности предлагаемого критерия нами были сопоставлены данные автоматической диагностики, выполненные комплексом «Магистраль», с результатами, полученными по изложенной методике. Экспериментальные данные — индикаторные диаграммы — извлекались из базы данных (БД) программы, после чего численно дифференцировались. Следует отметить, что в БД программы «Магистраль» сохраняются осредненные по нескольким десяткам циклов диаграммы с разрешением в 1° угла поворота коленчатого вала, поэтому корректная обработка кривой скорости давления оказалась не всегда возможной из-за

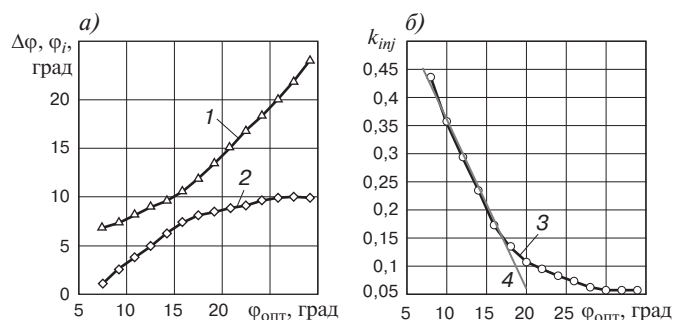


Рис. 3. Результаты расчетного эксперимента:
а — зависимости фазовых параметров сгорания от угла опережения подачи топлива: 1 — период задержки воспламенения $\Delta\varphi(\varphi_{opt})$; 2 — угол начала видимого сгорания (относительно ВМТ) $\varphi_i(\varphi_{opt})$; б — зависимость критерия опережения подачи топлива от угла опережения подачи топлива $k_{inj}(\varphi_{opt})$; 3 — расчет; 4 — линейная аппроксимация для участка $8^\circ < \varphi_{opt} < 18^\circ$

Fig. 3. Results calculated from the experiment:
а — dependencies of the phase parameters of combustion on the fuel injection advance angle; 1 — period of ignition delay $\Delta\varphi(\varphi_{opt})$; 2 — visible combustion onset angle (relative to TDC) $\varphi_i(\varphi_{opt})$; б — dependence of criterion of fuel injection timing advance on the fuel injection advance angle $k_{inj}(\varphi_{opt})$; 3 — calculation; 4 — linear approximation for area $8^\circ < \varphi_{opt} < 18^\circ$

искажений участка в области максимальной скорости нарастания давления (в окрестностях точки c). В комплексе «Магистраль» индикаторные диаграммы давления сравниваются с условной эталонной, за которую принимается диаграмма в одном из цилиндров двигателя. Целью регулировки в такой постановке является подстройка процессов всех цилиндров двигателя с выбранным эталоном. Для определения УОПТ используется особый алгоритм, учитывающий сигналы с датчиков вибрации и давления в цилиндре [12]. На рис. 4 показаны все возможные случаи: нормальная, ранняя и поздняя подача топлива в исследуемом цилиндре относительно процесса в эталонном цилиндре.

Для каждой пары сигналов скорости изменения давления рассчитывали критерий опережения подачи топлива (2) и на основании аппроксимации линейного участка полученной зависимости $f(k_{inj})$ (см. рис. 3, б, прямая линия) вычисляли УОПТ:

$$\varphi_{opt} = 21,9 - 32,8k_{inj}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты в уравнении прямой (3) получены по результатам математического моделирования и, по всей вероятности, должны быть уточнены экспериментально. На сегодняшний день также не исследовано должным образом влияние скоростного и нагрузочного режима двигателя на зависимость $\varphi_{opt}(k_{inj})$. Несмотря на это, совпадение результатов косвенного определения УОПТ по сигналу первой производной давления с данными аппаратно-программного комплекса «Магистраль» можно считать удовлетворительным (см. таблицу).

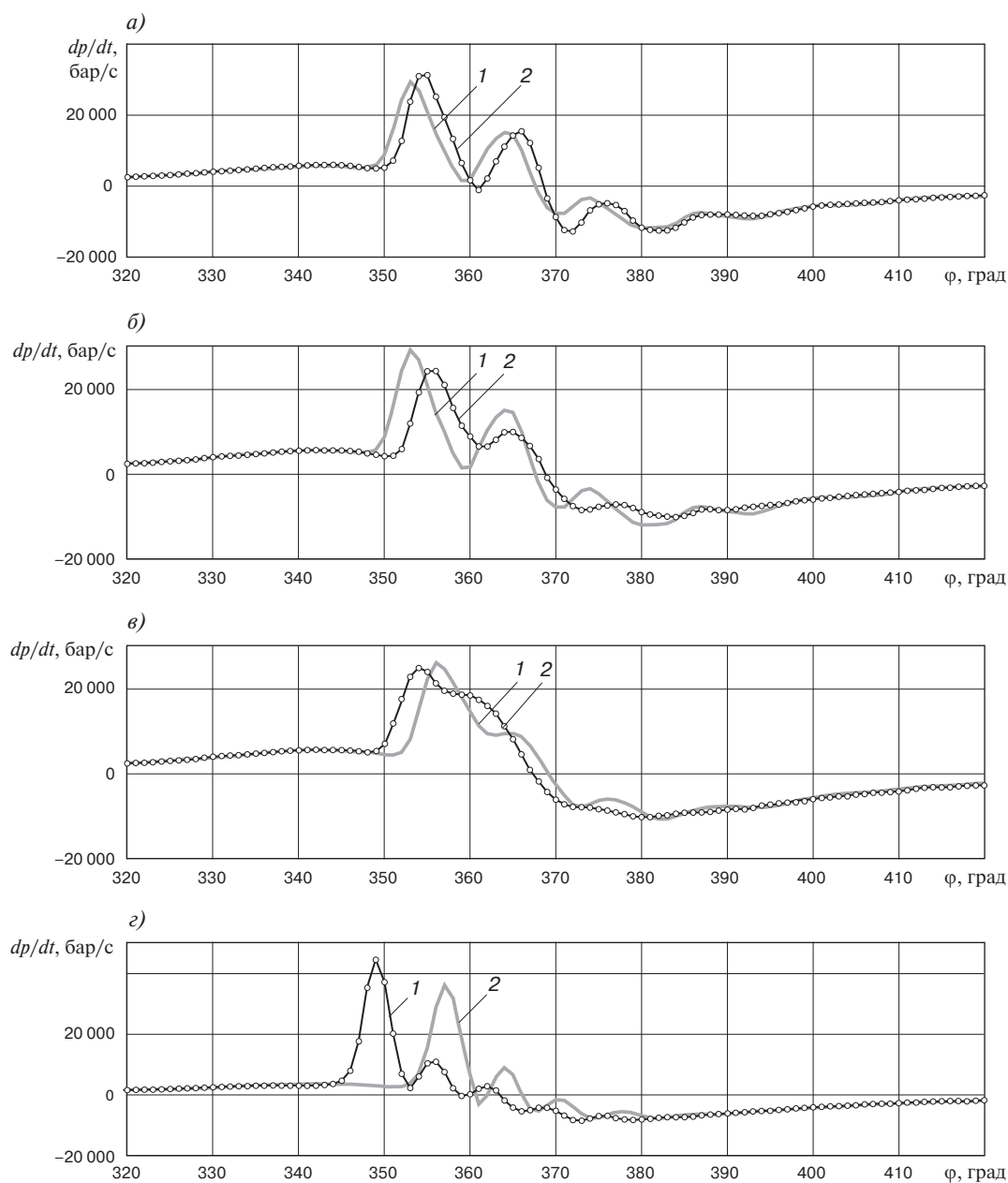


Рис. 4. Результаты экспериментальной проверки метода для различных диагнозов:
 а — исправен; б — поздний впрыск; в — ранний впрыск; г — слишком ранний впрыск;
 1 — «эталонный» цилиндр, 2 — исследуемый цилиндр
 Fig. 4. Results of experimental inspection of the method for different diagnoses:
 а — in working order; б — late injection; в — early injection; г — too early injection;
 1 — “reference” cylinder, 2 — examined cylinder

Вместе с тем при слишком больших УОПТ количественные значения диагностического симптома (отклонения контролируемого параметра от эталонного значения), определенные комплексом «Магистраль» и по предлагаемой методике, существенно расходятся.

Это вполне закономерный результат, так как выражение (3) в этой (нелинейной) области зависимости $\varphi_{\text{опт}}(k_{inj})$, строго говоря, неприменимо. Как вариант решения проблемы может быть предложен диагноз

«слишком большое опережение подачи топлива» для сигнала с критерием k_{inj} меньше 0,02.

Выводы. 1. Анализ существующих методов контроля УОПТ показал целесообразность поиска новых решений, направленных на повышение оперативности и достоверности результатов диагностирования.

2. Представленный новый способ контроля начала воспламенения и подачи топлива, основанный на анализе сигнала скорости изменения давления

в цилиндре, не требует дополнительных данных, в том числе измерения угла поворота коленчатого вала.

3. Предложенный критерий опережения подачи топлива имеет линейную зависимость от УОПТ в области нормальных и поздних углов начала впрыскивания, что обеспечивает основу для разработки простых и надежных средств мониторинга и оперативной диагностики тепловозных дизелей.

4. При слишком ранней подаче топлива качественное определение этого дефекта остается надежным, однако количественное значение УОПТ требует дополнительного уточнения в процессе регулировки этого параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомич А. З. Топливная эффективность и вспомогательные режимы тепловозных дизелей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 271 с.
2. Смирнов В. А., Талызин А. С. Энергосбережение при ремонте и техническом обслуживании локомотивов // Известия Транссиба. 2011. № 4 (8). С. 41–49.
3. Сиротенко И. В., Гогричиани Г. В. Проблемы повреждения силовых и теплонапряженных узлов тепловозных дизелей. Аналитический обзор // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 2. С. 101–109. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-101-109.
4. Федотов Г. Б., Левин Г. И. Топливные системы тепловозных дизелей: ремонт, испытания, совершенствование. М.: Транспорт, 1983. 192 с.
5. Макушев Ю. П., Волкова Л. Ю. Датчики для исследования и диагностирования процесса подачи топлива в системах питания дизелей // Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 28–32.
6. Ждановский Н. С., Николаенко А. В., Улитовский Б. А., Аллилуев В. А. Диагностика автотракторных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Колос (Ленингр. отд-ние), 1977. 264 с.
7. Коньков А. Ю., Лашко В. А. Диагностирование дизеля на основе идентификации рабочих процессов. Владивосток: Дальнаука, 2014. 364 с.
8. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов [и др.]. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 375 с.
9. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашинное строительство» [Электронный ресурс]. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 719 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/02000010266> (дата обращения: 16.07.2019 г.).
10. Соловьев А. В. Системы мониторинга судовых дизелей в эксплуатации // Вестник Астраханского государственного техни-

ческого университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 87–92. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-87-92.

11. Балабин В. Н., Какоткин В. З., Лобанов И. И. Экспресс-диагностика тепловозных дизелей // Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 3 (41). С. 38–43.

12. Васин П. А. Для диагностики тепловоза — комплекс «Магистраль» // Локомотив. 2001. № 7. С. 27–31.

13. Bueno A.V., Velásquez J.A., Milanez L.F. A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29. № 8–9. P. 1657–1675.

14. Bueno A.V., Velásquez J.A., Milanez L.F. Internal combustion engine indicating measurements. In: Applied Measurement Systems. Prof. Zahurul Haq (Ed.), 2012. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/1e41/2925077f37d272ab5a3228e50abf36aad10a.pdf> (дата обращения 21.05.2019 г.).

15. Коньков А. Ю., Лашко В. А. Средства и метод диагностирования дизелей по индикаторной диаграмме рабочего процесса. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. 147 с.

16. Конькова И. Д., Давыдов Ю. А., Коньков А. Ю. Математическая модель моторного цикла дизеля и ее программная реализация в среде Simulink Matlab // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 5 (71). С. 73–81.

17. Программа ДИЗЕЛЬ-РК: моделирование и оптимизация рабочих процессов ДВС / А. С. Кулешов [и др.] // ДВИГАТЕЛЬ-2010: Материалы международной конференции, посвященной 180-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 16 октября 2010 г. С. 287–292.

18. Лашко В. А., Коньков А. Ю. Получение индикаторной диаграммы при асинхронном измерении сигнала давления // Двигателестроение. 2007. № 4 (230). С. 33–37.

19. Коньков А. Ю., Трунов А. И., Конькова И. Д., Давыдов Ю. А. Диагностирование неплотности цилиндра дизеля по результатам измерения скорости изменения внутрицилиндрового давления // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2018. № 4 (51). С. 9–16.

20. Конькова И. Д., Давыдов Ю. А., Коньков А. Ю. Новый способ диагностирования неплотности цилиндра дизеля с применением пьезоэлектрического датчика давления // Сборник материалов VI Международной науч.-техн. конф. «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век». СПб.: ФГБОУ ВО ДВГУПС, 2018. С. 78–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНЬКОВ Алексей Юрьевич,
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры
«Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

КОНЬКОВА Ирина Дмитриевна,
старший преподаватель кафедры «Транспорт железных
дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

Статья поступила в редакцию 05.07.2019 г., принята к публикации 30.08.2019 г.

New method for control of fuel injection initiation and fuel combustion in diesel locomotive engines

A. Yu. KON'KOV, I. D. KON'KOVA

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, 680021, Russia

Abstract. Adequate regulation of diesel engine fuel equipment is an important factor affecting the economic and ecological indicators of diesel engine and its reliability. The fuel injection advance angle deviates from the best value during operation for several reasons, requiring timely control and regulation of the parameter. This issue is crucial for diesel engines with individual high-pressure

pumps like the diesel locomotive engines. This study presents a new method for indirect determination of the fuel injection advance angle based on analysis of the pressure first-order derivative signal — pressure change rate. This method eliminates the need for additional measurements like the crankshaft rotation angle or piston position, and therefore, exhibits potential for the development

of easy and reliable devices for online diagnostics. The study also briefly analyzes control methods for the fuel injection advance angle used in operating diesel-electric locomotives in Russia. The results of theoretical research performed through mathematical modeling for the locomotive diesel engine 1A-5D49 is also examined. A dimensionless criterion is proposed based on results calculated from the experiment, which is determined by the value of the pressure change rate signal at representative points allowing calculation of the fuel injection advance angle using simple linear dependence. Verification of the proposed method demonstrates good agreement of the results with existing methods.

Keywords: diesel; fuel injection advance angle (FIAA); diagnostic of technical condition; pressure inside the cylinder; pressure change rate

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-233-240>

REFERENCES

1. Khomich A.Z. *Toplivnaya effektivnost' i vspomogatel'nye rezhimy teplovoznnykh dizeley* [Heat efficiency and auxiliary modes of the diesel-electric locomotive diesels]. Moscow, Transport, 1987, 271 p.
2. Smirnov V.A., Talyzin A.S. *Energoberezhenie pri remonte i tekhnicheskoy obsluzhivaniy lokomotivov* [Energy savings by locomotive repair and preventive maintenance]. *Izvestiya Transsiba* [News of Transsib], 2011, no. 4(8), pp. 41–49.
3. Sirotenko I.V., Gogrichiani G.V. *Problemy povrezhdaemosti silovyykh i teplonapryazhennykh uzlov teplovoznnykh dizeley*. Analiticheskiy obzor [Damaging problems of power and heat-stressed assemblies of locomotive diesels. Analytical review]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 2, pp. 101–109. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-2-101-109.
4. Fedotov G.B., Levin G.I. *Toplivnye sistemy teplovoznnykh dizeley: remont, ispytaniya, sovershenstvovanie* [Fuel systems of the diesel-electric locomotive diesels. Repair, tests, improvement]. Moscow, Transport, 1983, 192 p.
5. Makushev Yu.P., Volkova L.Yu. *Datchiki dlya issledovaniya i diagnostirovaniya protsessov podachi topliva v sistemakh pitaniya dizeley* [Sensors for study and diagnosis of fuel supply process in diesel power systems]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2016, no. 3(147), pp. 28–32.
6. Zhdanovskiy N.S., Nikolaenko A.V., Ulitovskiy B.A., Alliluev V.A. *Diagnostika avtotraktornykh dvigateley* [Diagnostics of the motor-transport engines]. Leningrad, Kolos, 1977, 264 p.
7. Kon'kov A.Yu., Lashko V.A. *Diagnostirovanie dizelya na osnovе identifi katsii rabochikh protsessov* [Diagnostics of diesel based on identification of the work processes]. Vladivostok, Dalnauka, 2014, 365 p.
8. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley* [Internal combustion engines: Theory of reciprocating and compound engines] / D. N. Vyrubov [et al.]. Moscow, Machine building, 1983, 375 p.
9. Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy* [Theory of reciprocating engines. Special chapters]. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman [Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University], 2008, 720 p.
10. Solov'yev A.V. *Sistemy monitoringa sudovyykh dizeley v ekspluatatsii* [Systems of monitoring marine diesel engines in operation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of Astrakhan State Technical University], 2018, no. 1, pp. 87–92. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-87-92.
11. Balabin V.N., Kakotkin V.Z., Lobanov I.I. *Ekspress-diagnostika teplovoznnykh dizeley* [Promising express troubleshooting of locomotive diesel engines]. *Mir transporta* [World of transport and transportation], 2012, Vol. 10, no. 3(41), pp. 38–43.
12. Vasin P.A. *Dlya diagnostiki teplovoza-kompleks "Magistral"* [Complex "Magistral" for diesel-electric locomotive diagnostics]. *Lokomotiv* [Locomotive], 2001, no. 7, pp. 27–31.
13. Bueno A.V., Velásquez J.A., Milanez L.F. *A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis*. *Applied Thermal Engineering*, 2009, Vol. 29, no. 8–9, pp. 1657–1675.
14. Bueno A.V., Velásquez J.A., Milanez L.F. *Internal combustion engine indicating measurements*. In: *Applied Measurement Systems*. Prof. Zahurul Haq (Ed.), 2012. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/1e41/2925077f37d272ab5a3228e50abf36aad10a.pdf> (retrieved on 21.05.2019).
15. Kon'kov A.Yu., Lashko V.A. *Sredstva i metod diagnostirovaniya dizeley po indikatornoy diagramme rabochego protsesssa* [Means and methods of diesel diagnostics by the indicator diagram of the work process]. Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS [Khabarovsk: publishing house of Far Eastern State Transport University], 2007, 147 p.
16. Kon'kova I.D., Davydov Yu.A., Kon'kov A.Yu. *Matematicheskaya model' motornogo tsikla dizelya i ee programmnaya realizatsiya v srede Simulink Matlab* [Mathematical model of the diesel motor cycle and its program implementation in SimulinkMatlab environment]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of transport of the Volga region], 2018, no. 5(71), pp. 73–81.
17. Kuleshov A.S., Kozlov A.V., Fadeev Yu.M. *Programma DIZEL''-RK: modelirovanie i optimizatsiya rabochikh protsessov DVS / DVGATEL''-2010: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 180-letiyu MG TU im. N.E. Bauman* [Program DIESEL-RK: Modeling and optimization of the work processes of ICE / Collection of scientific works of the international conference Engine-2010], 16.10.2010, Moscow, pp. 287–292.
18. Lashko V.A., Kon'kov A.Yu. *Poluchenie indikatornoy diagrammy pri asinkhronnom izmerenii signala davleniya* [Indicator test based on asynchronous pressure measurement]. *Dvigatellostroenie*, 2007, no. 4(230), pp. 33–37.
19. Kon'kov A.Yu., Trunov A.I., Kon'kova I.D., Davydov Yu.A. *Diagnostirovanie neplotnosti tsilindra dizelya po rezul'tatam izmereniya skorosti izmeneniya vnutritsilindrovogo davleniya* [Diagnosing the leakage of a diesel engine cylinder according to the results of measuring the in-cylinder pressure rate of change]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Pacific national university], 2018, no. 4(51), pp. 9–16.
20. Kon'kova I.D., Davydov Yu.A., Kon'kov A.Yu. *Novyy sposob diagnostirovaniya neplotnosti tsilindra dizelya s primeneniem p'ezoelektricheskogo datchika davleniya* / *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. "Lokomotivy. Elektricheskii transport. XXI vek"* [New method of diagnostics of the diesel cylinder leakiness using piezoelectric pressure sensor / Collection of material of the VI International scientific-practical conference Locomotives. Electric transport. XXI century]. SPb., FGBOU VO PGUPS [Saint Petersburg, Petersburg State Transport University], 2018, pp. 78–84.

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey Yu. KON'KOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of the Railway Transport, FESTU

Irina D. KON'KOVA,

Senior Lecturer of the Department of the Railway Transport, FESTU

Received 05.07.2019

Accepted 30.08.2019

Расчетно-экспериментальная оценка влияния использования подшпальных прокладок на показатели динамического воздействия подвижного состава на путь в стыковой зоне

В. Н. КАПЛИН¹, М. Н. МЫСЛИВЕЦ², Е. А. СИДОРОВА¹, Е. А. ПОЛУНИНА¹

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «ЭМИРП» (ООО «ЭМИРП»), Москва, 108811, Россия

Аннотация. Рассмотрены возможности использования подшпальных прокладок для снижения динамического воздействия подвижного состава на путь в стыковой зоне. В процессе исследования была проведена расчетная оценка амортизационных свойств материала для изготовления подшпальных прокладок с учетом упругих свойств подрельсового основания при статических и динамических нагрузках. В статье приведены результаты моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм» упругих характеристик подрельсового основания с применением подшпальных прокладок различной жесткости. Данные значения легли в основу расчета показателей динамического взаимодействия пути и подвижного состава в стыке с применением коэффициента, устанавливающего связь между прогибами целого рельса и рельса со стыком. На основе оценки полученных результатов обоснована целесообразность применения в стыке подшпальных прокладок. В работе приведены результаты экспериментальной оценки динамического воздействия подвижного состава на путь в зоне стыка с применением подшпальных прокладок, которые подтверждают полученные расчеты и позволяют оценить рост ускорений, возникающих на шпалах в стыковой зоне при прохождении подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный путь; подшпальные прокладки; воздействие на путь в зоне стыка; жесткость подрельсового основания; прогибы рельса; ускорения

Введение. Повышение осевых нагрузок, в том числе развитие тяжеловесного движения на сети российских железных дорог, обуславливает необходимость поиска оптимальных решений по улучшению конструкции железнодорожного пути. Предложения по усилению и повышению надежности путевой инфраструктуры охватывают все элементы железнодорожного пути и направлены в первую очередь на обеспечение безопасности там, где воздействие подвижного состава наиболее ощутимо влияет на стабильность пути. Например, актуальной задачей является снижение сил взаимодействия колеса и рельса в зоне рельсового стыка, которые могут достигать достаточно высоких значений вследствие ударных нагрузок [1, 2]. При этом одним из направлений совершенствования устройства железнодорожного пути

может стать использование эластичных подшпальных прокладок [3, 4, 5], которое позволяет снизить вибрационные нагрузки, передающиеся от железобетонных шпал на щебеночный балласт и приводящие к перемещению частиц щебня, сколу граней и истиранию частиц щебня, а при недостаточной его прочности — к разрушению частиц щебня. По исследованиям отечественных и зарубежных ученых, применение упругих подшпальных прокладок является одним из методов снижения вибраций, передаваемых от железобетонных шпал на щебень, в том числе в стыковой зоне. Результаты опытной эксплуатации конструкции железнодорожного пути с подшпальными прокладками в стыковой зоне на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» (ЭК АО «ВНИИЖТ») также показали значительно меньший износ щебня под шпалами в стыках с прокладками, чем в типовых стыках [4, 6, 7, 8]. Несмотря на положительные результаты исследований и испытаний упругих подшпальных прокладок в зоне стыка, вопрос об их применении на сети российских железных дорог все еще не решен однозначно, и данная работа посвящена дальнейшему развитию этого направления.

Расчет характеристик материала упругих подшпальных прокладок. Выбор материала для изготовления упругих подшпальных прокладок должен быть обоснован расчетом его статических и динамических характеристик, которые в процессе эксплуатации изделия обеспечат снижение динамических и вибрационных нагрузок на путь в зоне стыка.

Основными характеристиками резин, применяемых для изготовления упругих подшпальных прокладок, являются логарифмический декремент ν , статический модуль упругости $E_{ст}$ и динамический модуль упругости $E_{дин}$. В данной работе эти характеристики были определены в соответствии с международным стандартом ASTM D945 «Стандартные методы испытаний свойств резины при сжатии или сдвиге (механический осциллограф)» (Standard Test Methods for

■ E-mail: Sidorova.Elena@vniizht.ru (Е. А. Сидорова)

Rubber Properties in Compression or Shear (Mechanical Oscillograph)).

Статический модуль упругости $E_{\text{ст}}$ (МПа) определяется следующим выражением:

$$E_{\text{ст}} = \frac{F}{S} = \frac{Fl}{S\Delta l},$$

где F — нормальная составляющая силы, Н; S — площадь поверхности, по которой распределено действие силы, м^2 ; l — высота деформируемого образца, м; Δl — изменение высоты образца в результате упругой деформации (измеренного в тех же единицах, что и высота l).

При этом динамический модуль упругости $E_{\text{дин}}$ (МПа) определялся по выражению

$$E_{\text{дин}} = 0,996If^2,$$

где I — момент инерции балки и используемых грузов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; f — частота затухающих колебаний, Гц.

Важной характеристикой процесса затухания колебаний является логарифмический декремент — физическая величина, описывающая уменьшение амплитуды колебательного процесса и равная натуральному логарифму отношения двух последовательных, отсто-

ящих во времени на период амплитуд колеблющейся величины:

$$v = \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2},$$

где λ_1 и λ_2 — две последующие амплитуды при свободно затухающих колебаниях.

Исходя из расчетов основных статических и динамических характеристик упругих прокладок была выбрана марка резины, основные характеристики которой приведены в табл. 1.

На основании свойств выбранного специалистами ООО «ЭМИРП» материала были проведены расчеты характеристик упругих подшпальных прокладок для устранения просадок в стыках. Подшпальные прокладки выполняют функцию амортизаторов, снижая вибрационную нагрузку на путь. Основными характеристиками амортизаторов являются статическая жесткость C , собственная частота f_c и коэффициент виброизоляции η .

Статическая жесткость C (Н/м) является нелинейной величиной и для заданного интервала нагрузок определяется по выражению

$$C = \frac{P}{\epsilon},$$

где P — нагрузка, действующая на амортизатор, Н; ϵ — деформации амортизатора под нагрузкой P , м.

Собственная частота f_c (Гц) рассчитывается по формуле

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C \cdot k}{m}},$$

где C — жесткость подшпальной прокладки, Н/м; k — коэффициент, отвечающий за изменение жесткости конструкции при динамическом нагружении; m — масса груза (кг), воздействующая на амортизатор:

$$m = \frac{P}{g},$$

где g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$ [9].

Способность амортизатора гасить колебания характеризуется коэффициентом виброизоляции η , определяемым выражением

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2} \frac{4v^2}{4\pi^2 + v^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^2 \frac{4v^2}{4\pi^2 + v^2}}},$$

где f_B — частота вынужденных колебаний (частота колебаний возбуждающей силы), Гц [9].

В результате расчетов были получены значения статической жесткости и динамической жесткости,

Таблица 1
Характеристики резины, применяемой для изготовления упругой прокладки

Properties of rubber used for the elastic pad	
Параметр	Значение
Статический модуль, $E_{\text{ст}}$, МПа	2,8
Динамический модуль, $E_{\text{дин}}$, МПа	8,4
Логарифмический декремент, v , усл. ед.	0,45

Таблица 2
Статические и динамические характеристики упругих прокладок

Static and dynamic properties of the elastic pads			
Габаритные размеры, мм	Статическая жесткость, C , кН/м	Динамическая жесткость, s' , кН/м	Примечание
2700×250×20	94 500	283 500	—
2700×250×20	92 612	277 835	Пластины с отверстиями
1000×250×14	50 000	150 000	—
1000×250×14	49 066	147 199	Пластины с отверстиями
1000×250×8	87 500	262 500	—
1000×250×8	85 866	257 598	Пластины с отверстиями

которая представляет собой отношение динамической силы к динамическому смещению (табл. 2).

Проведенные расчеты стали основой для выбора материала и конфигурации опытных образцов амортизаторов. Специалистами ООО «ЭМИРП» были изготовлены и произведены исследования трех образцов упругих амортизаторов, изготовленных из различных материалов: на этиленовой основе (EVA), на пенообразующих компонентах (Schaum) и из резиновой смеси.

По результатам испытаний указанных упругих амортизаторов был выбран материал — резина на основе изопреновых каучуков, отвечающий следующим требованиям:

- логарифмический декремент — 0,53;
- повышенная морозостойкость;
- накопление остаточной деформации не более 20 %.

Из этого материала были изготовлены образцы с разным коэффициентом формы и разной жесткостью, которые использовались специалистами АО «ВНИИЖТ» при проведении испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

Расчет вертикальных сил, действующих на путь в области стыка, в программном комплексе «Универсальный механизм». Проведению испытаний подшпальных резиновых упругих прокладок на ЭК АО «ВНИИЖТ» предшествовали исследования по моделированию и расчету вертикальных сил, действующих на путь в области стыка, с учетом наличия и отсутствия подшпальных прокладок.

С целью анализа влияния на взаимодействие пути и подвижного состава наличия в конструкции пути подшпальных прокладок был проведен модельный эксперимент в программном комплексе «Универсальный механизм» с применением встроенного модуля «Упругий путь», предполагающего детальное описание параметров рельсов, шпал, креплений и подшпального основания. При моделировании рельсы описаны в качестве балок Тимошенко, передающих нагрузку на шпалы и лежащих на упругом основании. Для создания протяженного пути использовались секции из 32 шпал, что обусловлено наиболее реалистичным описанием железнодорожного пути [10].

В исследовании В. Н. Данилова, посвященном расчету рельсовой нити в зоне стыка, отмечена взаимосвязь жесткости подрельсового основания и вертикальной силы, действующей от колеса на рельс. Эта взаимосвязь выражена следующей формулой:

$$j = \frac{Q}{y},$$

где j — жесткость подрельсового основания, кН/м; Q — вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, кН; y — вертикальный прогиб рельса под колесом, м [11].

Уменьшение жесткости подрельсового основания позволяет снизить частоту вибрационной нагрузки на путь. При этом результаты проведенных испытаний по оценке влияния частоты приложения нагрузки от подвижного состава на уровень сил, действующих на путь, показали, что с ростом частоты приложения нагрузки силы, действующие на путь, возрастают [12]. Изначально в процессе моделирования жесткость основания принималась равной 60 000 кН/м и регулировалась с использованием подшпальных прокладок. В настоящей работе рассмотрено влияние на вертикальные силы взаимодействия колеса и рельса наличия в конструкции пути подшпальных прокладок с разной жесткостью — 44 575 и 36 000 кН/м. Выбор указанных параметров жесткости подшпальных прокладок для создания модели упругого пути обусловлен необходимостью соотнесения данных, полученных с помощью моделирования, с результатами экспериментальных исследований (образцы упругих подшпальных прокладок с такими же значениями жесткости были испытаны на ЭК АО «ВНИИЖТ»).

Таким образом, с учетом последовательного соединения элементов конструкции железнодорожного пути суммарная вертикальная жесткость основания при наличии подшпальных прокладок может быть рассчитана по формуле

$$k = \frac{k_o k_n}{k_o + k_n},$$

где k_o — жесткость основания, кН/м; k_n — жесткость подшпальной прокладки, кН/м.

Полученное значение суммарной жесткости было использовано для изменения параметров подшпального основания в математической модели и определения коэффициента диссипации μ (Нм/с) по формуле

$$\mu = 2\beta\sqrt{mk},$$

где m — приведенная масса подрельсового основания; β — доля демпфирования, ее значения лежат обычно в диапазоне $\beta = 0,1 \div 0,4$. Для решения рассматриваемой задачи доля демпфирования была принята 0,2 [13].

Приведенная масса подрельсового основания может быть рассчитана по формуле согласно

$$m = \frac{\gamma_o \sigma}{g} \int_0^H e^{-2\epsilon z} dz,$$

где γ_o — удельный вес материала основания, т/м³; σ — длина шпалы, м; H — глубина распространения вертикальных перемещений, м; $\epsilon = 1 \div 1,5$ — параметр функции распределения вертикальных перемещений по глубине основания; $g = 9,81$ м/с²; z — вертикальные перемещения в точке приложения силы, м [14].

В программном комплексе «Универсальный механизм» с применением модуля «Упругий путь» при расчете контактных сил используется модель В. Кика

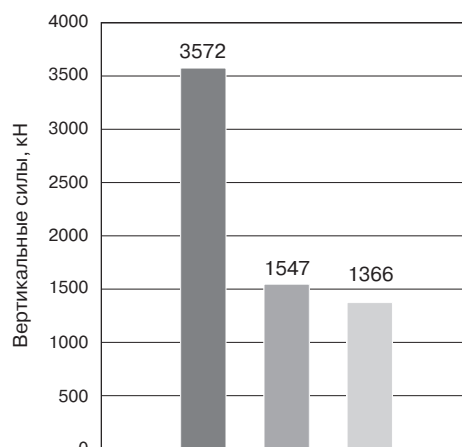


Рис. 1. Значения вертикальных сил, рассчитанные для движения вагона по прямому пути со стыком: ■ — без подшпальной прокладки; ■ — с подшпальной прокладкой, жесткость 44 575 кН/м; ■ — с подшпальной прокладкой, жесткость 36 000 кН/м

Fig. 1. Vertical forces calculated for the car movement on the straight track with joint: ■ — without the rail pad; ■ — with rail pad, rigidity 44 575 kN/m; ■ — with rail pad, rigidity 36 000 kN/m

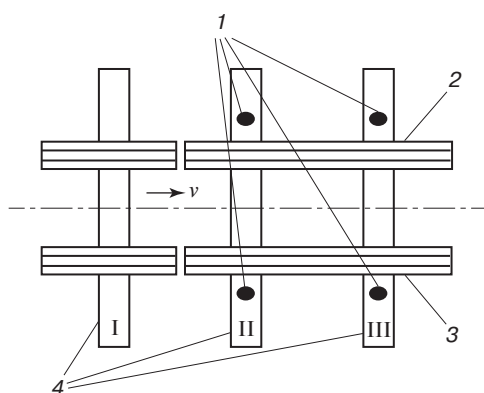


Рис. 2. Схема расположения приборов на опытном участке: 1 — акселерометры; 2 — наружный рельс; 3 — внутренний рельс; 4 — шпалы (первая (I), вторая (II) и третья (III))

Fig. 2. Layout of instruments at the test site: 1 — accelerometers; 2 — exterior rail; 3 — inner rail; 4 — rail sleepers (first, second and third)

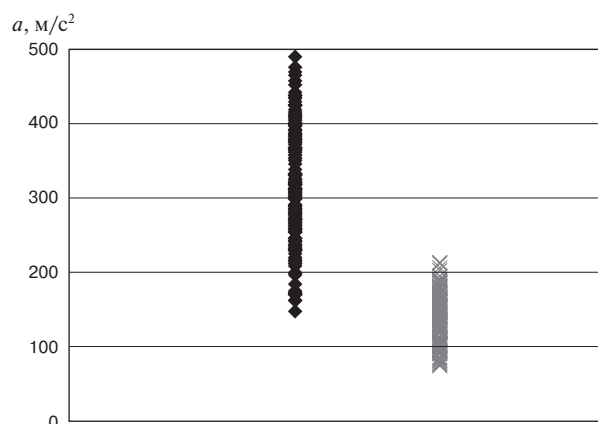


Рис. 3. Ускорение на второй (принимающей) шпале, скорость 60 км/ч:

◆ — типовой стык, × — типовой стык с упругой прокладкой
Fig. 3. Acceleration on the second (receiving) sleeper, speed 60 km/h:
◆ — typical joint, × — typical joint with elastic pad

и И. Пиотровского. При этом суммарная нормальная реакция может быть найдена по формуле

$$N = N_e + N_d,$$

где N_e — упругая составляющая; N_d — диссипативная составляющая [15].

В результате моделирования были рассчитаны вертикальные силы и вертикальные прогибы рельса под колесом при движении вагона по пути без подшпальных прокладок и по пути с подшпальными прокладками разной жесткости. Полученные значения позволили установить связь между прогибами целого рельса (y_p) и рельса со стыком ($y_{ст}$) через коэффициент γ (рад.), предложенный в [11] В.Н. Даниловым:

$$\gamma = \frac{y_{ст} - y_p}{P} \cdot \frac{8EI}{l^2},$$

где P — вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, кгс; E — модуль упругости рельсовой стали, кг/см²; I — момент инерции рельса, см⁴; l — длина межшпального расстояния, см.

Значения прогибов рельсов в стыке были рассчитаны для пути без подшпальных прокладок и с подшпальными прокладками различной жесткости и использованы для расчета вертикальных сил, действующих от колеса на рельс в стыке. Результаты расчетов представлены на диаграмме (рис. 1) и демонстрируют существенное — в 2,6 раза — снижение вертикальных сил в стыке при использовании подшпальных прокладок.

Экспериментальная часть исследований по оценке динамического воздействия подвижного состава на путь в стыковой зоне. После моделирования и расчетной оценки вертикальных сил, возникающих при взаимодействии колеса и рельса в стыковой зоне, были проведены испытания упругих подшпальных прокладок на ЭК АО «ВНИИЖТ». Для оценки сил, передаваемых железобетонными шпалами на балласт, было принято решение провести замеры ускорений в зоне типовых стыков и стыков с уложенными под шпалы упругими амортизаторами.

Экспериментальные исследования проводились на 2-м кольцевом пути ЭК АО «ВНИИЖТ», в кривой радиусом $R=860$ м, рельсы типа Р65, шпалы железобетонные, крепления КБ-65. Для проведения испытаний был подготовлен опытный участок с тремя разными конструкциями стыков:

- типовая конструкция стыка;
- типовой стык с подшпальными прокладками;
- сварной стык с подшпальными прокладками.

Измерительные приборы (акселерометры) закреплялись на железобетонных шпалах в засверленные отверстия по обоим концам шпал. Тип акселерометров — НВМВ12/500. На каждом из видов стыков измерения ускорений производились на двух шпалах под принимающим рельсом (шпала II и III; см. рис. 2).

Таблица 3

Ускорения на шпалах при наличии и отсутствии прокладок

Table 3

Acceleration on sleepers with and without pads

Шпала	Скорость, км/ч	Ускорение на шпале типовой стык, м/с ²		Ускорение на шпале типовой стык с упругой прокладкой, м/с ²		Отношение ускорения типовой стык / типовой стык с упругой прокладкой	
		Среднее	Максимальное	Среднее	Максимальное	По средним	По максимальным
Вторая (принимающая)	25	223,1	329,8	82,1	119,7	2,7	2,8
	40	335,7	461,6	88,9	158,4	3,8	2,9
	60	313,0	488,4	139,9	213,3	2,2	2,3
Третья (принимающая)	25	137,4	163,5	38,2	88,1	3,6	1,9
	40	184,7	217,0	75,3	130,0	2,5	1,7
	60	211,7	265,6	104,0	158,1	2,0	1,7

На каждую шпалу устанавливалось по 2 акселерометра — у наружного и внутреннего рельсов. Измерения ускорений на шпалах проводились при проходе по опытному участку грузового состава, состоящего из восьмиосного электровоза ВЛ80^с и 10 грузовых полувагонов с нагрузкой на ось 23,5 т. Регистрация сигналов производилась системой Spider 8, несущей частотой 4,8 кГц при частоте оцифровки 1200 Гц. Величины ускорений были получены при частотах до 600 Гц и показаны на рис. 3.

Численные значения полученных ускорений приведены в табл. 3.

В среднем по всем скоростям на второй (принимающей) шпале в типовом стыке ускорения выше по средним значениям в 2,9 раза, а по максимальным —

в 2,65 раза; по третьей (принимающей) шпале — по средним значениям выше в 2,69 раза, а по максимальным — в 1,74 раза.

Полученные данные хорошо коррелируют с результатами, рассчитанными с применением программного комплекса «Универсальный механизм».

В среднем по всем скоростям на второй (принимающей) шпале по сравнению с третьей (принимающей) шпалой среднее ускорение выше на 63 %, а максимальные ускорения — на 62 %.

При наличии прокладки разница составляет по средним значениям 61 %, а по максимальным — 42 %.

На рис. 4, 5 представлены зависимости ускорений от скорости в типовом стыке и стыке с упругими прокладками под шпалами.

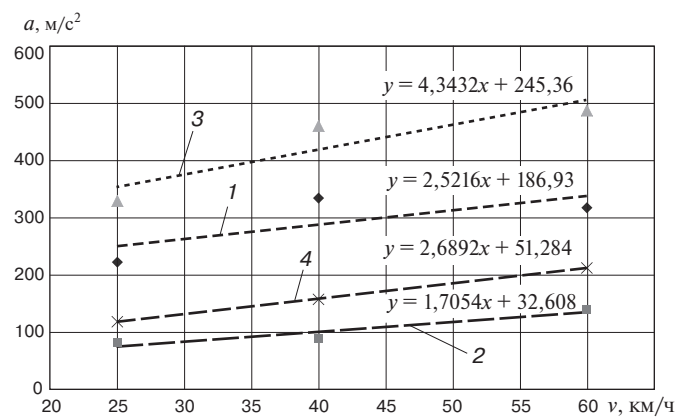


Рис. 4. Ускорения на второй (принимающей) шпале. Внутренний рельс: ◆ — типовой стык (средние значения ускорений); ■ — типовой стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ▲ — типовой стык (максимальные значения ускорений); × — типовой стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); линейная аппроксимация средних значений ускорений: 1 — в типовом стыке; 2 — в типовом стыке с упругой прокладкой; линейная аппроксимация максимальных значений ускорений: 3 — в типовом стыке; 4 — в типовом стыке с упругой прокладкой

Fig. 4. Acceleration on the second (receiving) sleeper. Inner rail: ◆ — typical joint (average acceleration); ■ — typical joint with elastic pad (average acceleration values); ▲ — typical joint (maximum acceleration); × — typical joint with elastic pad (maximum acceleration values); linear approximation of the average acceleration: 1 — in a typical joint; 2 — in a typical joint with elastic pad; linear approximation of the maximum acceleration: 3 — in a typical joint; 4 — in a typical joint with elastic pad

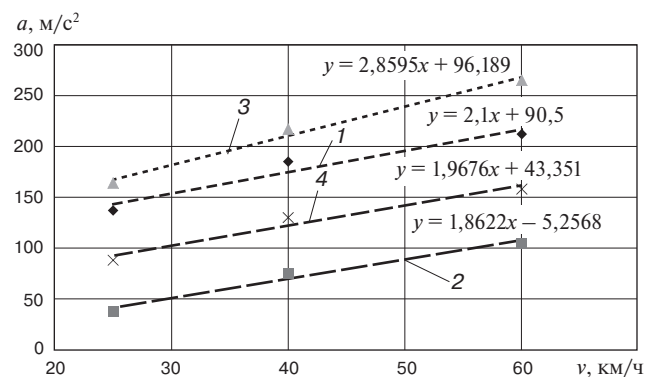


Рис. 5. Ускорения на третьей (принимающей) шпале. Внутренний рельс: ◆ — типовой стык (средние значения ускорений); ■ — типовой стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ▲ — типовой стык (максимальные значения ускорений); × — типовой стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); линейная аппроксимация средних значений ускорений: 1 — в типовом стыке; 2 — в типовом стыке с упругой прокладкой; линейная аппроксимация максимальных значений ускорений: 3 — в типовом стыке; 4 — в типовом стыке с упругой прокладкой

Fig. 5. Accelerations on the third (receiving) sleeper. Inner rail: ◆ — typical joint (average acceleration); ■ — typical joint with elastic pad (average acceleration values); ▲ — typical joint (maximum acceleration); × — typical joint with elastic pad (maximum acceleration values); linear approximation of the average acceleration: 1 — in a typical joint; 2 — in a typical joint with elastic pad; linear approximation of the maximum acceleration: 3 — in a typical joint; 4 — in a typical joint with elastic pad

Таблица 4

Ускорения на шпалах при наличии прокладок в типовом и сварном стыках

Table 4

Accelerations on the sleepers for typical and weld joints with pads

Шпала	Скорость, км/ч	Ускорение на шпале типовой стык с упругой прокладкой, м/с ²		Ускорение на шпале сварной стык с упругой прокладкой, м/с ²		Отношение ускорения типовой стык с упругой прокладкой/сварной стык с упругой прокладкой	
		Среднее	Максимальное	Среднее	Максимальное	По средним	По максимальным
Вторая (принимающая)	25	82,1	119,7	13,0	20,0	6,3	6,0
	40	88,9	158,4	31,8	52,3	2,8	3,0
	60	139,9	213,3	50,6	85,7	2,8	2,5
Третья (принимающая)	25	38,2	88,1	10,8	16,7	3,5	5,3
	40	75,3	130,0	31,6	55,6	2,4	2,3
	60	104,0	158,1	39,5	64,2	2,6	2,5

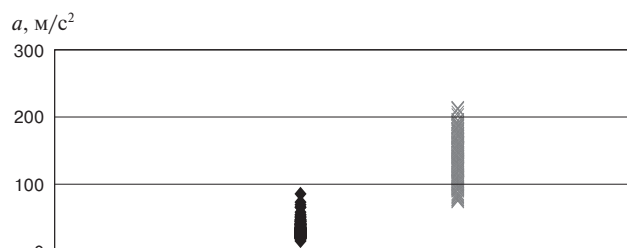


Рис. 6. Ускорения на второй (принимающей) шпале.

Внутренний рельс. Скорость 60 км/ч:

◆ — сварной стык с упругой прокладкой; × — типовой стык с упругой прокладкой

Fig. 6. Accelerations on the second (receiving) sleeper. Inner rail.

Speed 60 km/h:

◆ — weld joint with elastic pad; × — typical joint with elastic pad

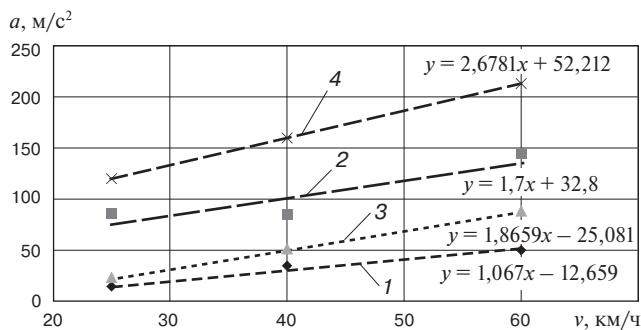


Рис. 7. Ускорения на второй (принимающей) шпале. Внутренний рельс: ◆ — сварной стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ■ — типовой стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ▲ — сварной стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); × — типовой стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); линейная аппроксимация средних значений ускорений: 1 — в сварном стыке с упругой прокладкой; 2 — в типовом стыке с упругой прокладкой; 3 — в сварном стыке с упругой прокладкой; 4 — в типовом стыке с упругой прокладкой

Fig. 7. Acceleration on the second (receiving) sleeper. Inner rail:

◆ — weld joint with elastic pad (average acceleration); ■ — typical joint with elastic pad (average acceleration); ▲ — weld joint with elastic pad (maximum acceleration); × — typical joint with elastic pad (maximum acceleration); linear approximation of the average acceleration: 1 — in a weld joint with elastic pad; 2 — in a typical joint with elastic pad; 3 — in a weld joint with elastic pad; 4 — in a typical joint with elastic pad

1 — in a weld joint with elastic pads; 2 — in a typical joint with elastic pad; linear approximation of the maximum acceleration: 3 — in a weld joint with elastic pad; 4 — in a typical joint with elastic pad

Анализ угловых коэффициентов в уравнениях регрессии (см. рис. 4, 5) показывает, что при использовании резиновых прокладок график зависимости ускорения на шпале от скорости имеет меньший угловой коэффициент и меньший свободный член, чем без использования прокладок.

Следовательно, можно сделать вывод, что при использовании резиновых прокладок рост ускорений на шпале в меньшей степени зависит от скорости движения, так как прокладка компенсирует влияние скорости, что приводит к увеличению стабильности пути.

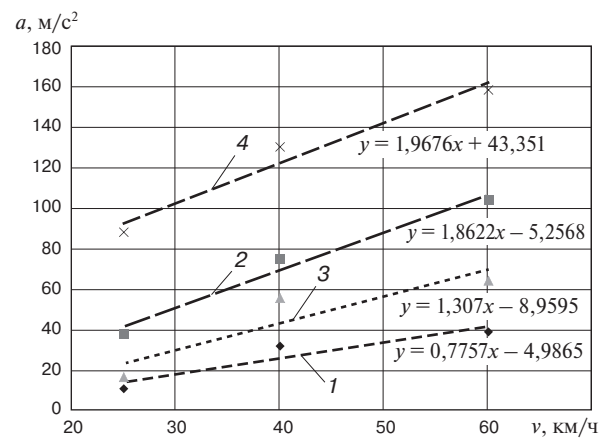


Рис. 8. Ускорения на третьей (принимающей) шпале. Внутренний рельс: ◆ — сварной стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ■ — типовой стык с упругой прокладкой (средние значения ускорений); ▲ — сварной стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); × — типовой стык с упругой прокладкой (максимальные значения ускорений); линейная аппроксимация средних значений ускорений: 1 — в сварном стыке с упругой прокладкой; 2 — в типовом стыке с упругой прокладкой; 3 — в сварном стыке с упругой прокладкой; 4 — в типовом стыке с упругой прокладкой

Fig. 8. Accelerations on the third (receiving) sleeper. Inner rail:

◆ — weld joint with elastic pad (average acceleration); ■ — typical joint with elastic pad (average acceleration); ▲ — weld joint with elastic pad (maximum acceleration values); linear approximation of the average acceleration: 1 — in a weld joints with elastic pads; 2 — in a typical joint with elastic pad; linear approximation of the maximum acceleration: 3 — in a weld joint with elastic pad; 4 — in a typical joint with elastic pad

На рис. 6 показаны величины ускорений для типового стыка с упругой прокладкой и сварного стыка с упругой прокладкой, а в табл. 4 представлены полученные численные значения ускорений.

В среднем по всем скоростям на второй (принимающей) шпале в типовом стыке с прокладками ускорения выше по средним значениям в 3,9 раза, а по максимальным — в 3,8 раза по сравнению со сварным стыком; по третьей (принимающей) шпале — по средним значениям выше в 2,8 раза, а по максимальным — в 3,3 раза.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости ускорений от скорости в типовых и сварных стыках с упругими прокладками под шпалами.

Анализ угловых коэффициентов в уравнениях регрессии (см. рис. 7, 8) показывает, что в типовых стыках при использовании резиновых прокладок зависимости ускорения на шпале от скорости имеют больший угловой коэффициент и больший свободный член, чем в сварных стыках с использованием упругих амортизаторов.

Выводы. По результатам проведенных исследований установлено, что упругие подшпальные прокладки, изготовленные из резины на основе изопреновых каучуков, могут использоваться в конструкциях верхнего строения пути для улучшения показателей взаимодействия пути и подвижного состава. В частности, при использовании резиновых прокладок рост ускорений на шпале в меньшей степени зависит от скорости движения, что приводит к увеличению стабильности пути. Полученные результаты подтверждаются экспериментами, которые хорошо коррелируют с расчетами и обосновывают необходимость продолжения исследований в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манашкин Л.А., Мямлин С.В., Приходько В.И. Оценка силы ударного взаимодействия колеса и рельса на стыке двух рельсов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2008. Вип. 22. С. 36–39.
2. Желнин Г.Г., Кузнецов В.В. Снижение динамического воздействия на путь в стыках // Сб. научных трудов третьей научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.: МИИТ, 2000. С. 6–10.
3. Loy H., Augustin A. PUR pads protect heavy freight corridors // Railway Gazette International. September 2014. Vol. 170. Issue 9. P. 105–109.

4. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок / В.О. Певзнер [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 45. № 3. С. 140–146.

5. Васильченко Г.М. Исследования способов выправки пути // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. М.: РГОТУПС, 2013. С. 114–116.

6. Ананьев Н.И., Барабошин В.Ф. Как служат подшпальные прокладки // Путь и путевое хозяйство. 1988. № 11. С. 8.

7. Ананьев Н.И., Барабошин В.Ф. Вредные вибрации и борьба с ними. М.: Транспорт, 1972. 47 с.

8. Шерстянникова И.В. Испытаны подшпальные амортизаторы // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 3. С. 31.

9. Лепетов В.А. Расчеты и конструирование резиновых изделий и технологической оснастки: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Технология переработки пластических масс и эластомеров». 4-е изд., перераб. и доп. / под ред. Л.Н. Юрцева. М.: ИСТЕК, 2009. 417 с.

10. Computer simulation of train-track-bridge interaction / A. Rodikov [et al.] // CORE 2016: Maintaining the Momentum. P. 348.

11. Данилов В.Н. Расчет рельсовой нити в зоне стыка. М.: Трансжелдориздат, 1952. 116 с.

12. Певзнер В.О., Третьяков В.В., Шапетько К.В., Петропавловская И.Б. Инфраструктура в условиях повышенных осевых нагрузок // Железнодорожный транспорт. 2018. № 4. С. 52–55.

13. Kraus P.R., Fredriksson A., Kumar V.S. Modeling of frictional contacts for dynamic simulation // IROS 1997 Workshop on Dynamic Simulation: Methods and Applications. 1997. P. 1–10.

14. Вибрации в технике: справочник / под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.

15. Piotrowski J., Kik W.A. Simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations // Vehicle System Dynamics. 2008. Vol. 46. № 1–2. P. 27–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КАПЛИН Валерий Николаевич,
начальник Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»

МЫСЛИВЕЦ Максим Николаевич,
начальник конструкторско-технологического отдела,
ООО «ЭМИРП»

СИДОРОВА Елена Анатольевна,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научный центр
«Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо-рельс», АО «ВНИИЖТ»

ПОЛУНИНА Евгения Алексеевна,
руководитель группы, научный центр «Динамика и прочность тягового подвижного состава», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 28.06.2019 г.,
принята к публикации 09.08.2019 г.

Estimation and test assessment of the rail pads effect on the indicators of dynamic impact of the rolling stock on the track in the joint area

V. N. KAPLIN¹, M. N. MYSLIVETS², E. A. SIDOROVA¹, E. A. POLUNINA¹

¹ Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

² Limited Liability Company EMIRP (LLC "EMIRP"), Moscow, 108811, Russia

Abstract. Increasing axial loads including the development of heavy movement on Russian railroads network require the best solutions for improvement of the railway track structure. Research by Russian and international scientists indicates that

rail elastic pads reduce vibrations transferred from reinforced concrete sleepers to crashed stone, including the joint area. This study examines possibilities of using rail pads for reducing the dynamic effects of the rolling stock on the track in the joint

area. Assessment of the rail pads construction material shock-absorbing properties was conducted considering the elastic properties of the rail support with static and dynamic loads. Results of modeling the elastic properties of the rail support with rail pads of different rigidities using the software complex "Universal mechanism" are presented. The results were used as basis for calculation of indicators of dynamic interaction of the track and rolling stock at the joint using the coefficient establishing the link between bendings of the solid rail and the rail with joint. The expediency of using rail pads at the place of the joint is justified based on assessment of the results.

This study reveals that elastic rail pads based on isoprene rubbers are suitable for track structures that improve indicators of the track and rolling stock interaction. When using rubber pads, the growth of accelerations on the sleeper is less dependent on the speed, causing the track stability to increase. The results are supported by tests consistent with calculations and justify the necessity for further studies in this field.

Keywords: railway track; under sleeper pads; effect on the track at the joint area; rigidity of rail support; rail bending; accelerations

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-241-248>

REFERENCES

1. Manashkin L.A., Myamlin S.V., Prikhod'ko V.I. *Otsenka sily udarnogo vzaimodeystviya koleasa i rel'sa na styke dvukh rel'sov* [Assessment of the force of their impact interaction of wheel and rail at the joint of two rails]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2008, Vip. 22, pp. 36–39.
2. Zhelnin G.G., Kuznetsov V.V. *Snizhenie dinamicheskogo vozdeystviya na put' v stykakh / Sb. nauchnykh trudov tret'ey nauchno-prakticheskoy konferentsii "Resursosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte"*. Moscow, MIIT, 2000, pp. 6–10.
3. Loy H., Augustin A. *Railway Gazette International*. September 2014, Vol. 170, Issue 9, pp. 105–109.
4. *Povyshenie stabil'nosti puti v zone stykov za schet primeneniya uprugikh podshpal'nykh prokladok* [Increasing track stability in the zone of joints due to the use of elastic under sleeper pads] / V.O. Pevzner [i dr.]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 45, no. 3, pp. 140–146.
5. Vasil'chenko G.M. *Issledovaniya sposobov vypravki puti. Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta / Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Examination of the methods of track surfacing / Modern issues of improvement of the railway transport operation. Inter-school collection of scientific works]. M.: RGOTUPS [Moscow, Russian State Open Technical University of Railways], 2013, pp. 114–116.

■ E-mail: Sidorova.Elena@vniizht.ru (E. A. Sidorova)

6. Anan'yev N.I., Baraboshin V.F. *Kak sluzhat podshpal'nye prokladki* [The way the under sleeper pads work]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities], 1988, no. 11, p. 8.

7. Anan'yev N.I., Baraboshin V.F. *Vrednye vibratsii i bor'ba s nimi* [Harmful vibrations and fight with them]. Moscow, Transport, 1972, 47 p.

8. Sherstyannikova I.V. *Ispytany podshpal'nye amortizatory* [Under sleeper pads were tested]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Track and track facilities], 2002, no. 3, p. 31.

9. Lepetov V.A. *Raschety i konstruirovaniye rezinovykh izdeliy i tekhnologicheskoy osnastki: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy*. M.: ISTEK [Moscow, Publishing house "ISTEK"], 2009, 420p.

10. Computer simulation of train-track-bridge interaction / A. Rodikov [et al.]. CORE 2016: Maintaining the Momentum. P. 348.

11. Danilov V.N. *Raschet rel'sovoy niti v zone styka* [Calculation of the rail track at the joint area]. Moscow, Transzheldorizdat, 1952, 116 p.

12. Pevzner V.O., Tret'yakov V.V., Shapet'ko K.V., Petropavlovskaya I.B. *Infrastruktura v usloviyakh povyshennykh oseykh nagruzok* [Railway Transport], 2018, no. 4, pp. 52–55.

13. Kraus P.R., Fredriksson A., Kumar V.S. *Modeling of frictional contacts for dynamic simulation*. IROS 1997 Workshop on Dynamic Simulation: Methods and Applications. 1997, pp. 1–10.

14. *Vibratsii v tekhnike: spravochnik* / Pod red. F.M. Dimentberga, K.S. Kolesnikova [Vibrations in equipment: reference guide / Under editorship of F.M. Dimentberg, K.R. Kolesnikov]. M.: Mashinostroyeniye [Moscow, Machine building], 1980, 544 p.

15. Piotrowski J., Kik W.A. *Simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations*. *Vehicle System Dynamics*, 2008, Vol. 46, no. 1–2, pp. 27–48.

ABOUT THE AUTHORS

Valeriy N. KAPLIN,
Head of the Experimental Test Loop of JSC "VNIIZhT"

Maksim N. MYSLIVETS,
Head of the Design Technological Department, LLC "EMIRP"

Elena A. SIDOROVA,
Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Scientific Center "Track Infrastructure and the Issues of the Wheel-Rail Interaction", JSC "VNIIZhT"

Evgeniya A. POLUNINA,
Team Leader, Scientific Center "Dynamics and Endurance of Traction Rolling Stock",
JSC "VNIIZhT"

Received 28.06.2019

Accepted 09.08.2019

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1, или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116

Оформить подписку можно в редакции: e-mail: journal@vniizht.ru, <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

Подписчики зарубежных стран могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).

Методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства для перевозки скоропортящихся грузов

Д. О. ДАВЫДОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи» (АО «НИИАС»), Москва, 109029, Россия

Аннотация. Приведены математические формулировки для оценки основных составляющих неопределенности измерения общего коэффициента теплопередачи кузова специального транспортного средства, предназначенного для перевозки скоропортящихся грузов, методом внутреннего обогрева. Предложена методика расчета общего коэффициента теплопередачи кузова с учетом расширенной неопределенности измерений при проведении испытаний указанным методом без помещения специального транспортного средства в специализированную изотермическую камеру. Приведены экспериментальные данные и результаты расчета значения общего коэффициента теплопередачи кузова на примере испытаний вагона-термоса модели 16-6935.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; перевозка скоропортящихся грузов; общий коэффициент теплопередачи; неопределенность измерений; теплотехнические испытания

Введение. Качественная и безопасная перевозка железнодорожным транспортом скоропортящихся пищевых грузов (СПГ) невозможна без знания актуальных теплотехнических параметров специальных транспортных средств (СТС), используемых для этих перевозок. В связи с постоянным повышением требований к сохранности качества СПГ в процессе перевозки [1] особую актуальность приобретает задача периодического контроля и освидетельствования парка СТС на железнодорожном транспорте.

Необходимость решения данной задачи становится особенно очевидной при организации перевозок СПГ в режиме «термос» [2, 3], когда сохранность качества и безопасность перевозимого груза могут обеспечиваться в течение ограниченного (предельного) срока перевозки, рассчитываемого с использованием общего коэффициента теплопередачи кузова K , который ухудшается в процессе эксплуатации СТС, и его актуальное значение может быть установлено только путем проведения соответствующих теплотехнических испытаний.

Для определения величины коэффициента K могут быть использованы различные методики: в мировой практике широкое распространение получили те из

них, которые основаны на методе внутреннего обогрева. Он основывается на достижении стабильного во времени перепада средних температур воздуха внутри и снаружи кузова СТС при стабильной мощности электронагревательных приборов, установленных внутри кузова СТС. Описание метода, в частности, содержится в Соглашении о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [4].

Существуют методики без необходимости достижения стационарного температурного режима, заключающиеся:

- в нагреве кузова СТС лишь до установления регулярного режима, когда тепловая инерция кузова перестает оказывать значимое влияние на изменение температуры воздуха внутри него [5];
- в кратковременном нагреве и последующем равном ему по времени охлаждении кузова СТС путем снижения мощности электронагревательных приборов (исключает необходимость достижения регулярного режима) [6];
- то же, что и при кратковременном нагреве, но без необходимости охлаждения кузова СТС [7].

Известны также методики, основанные на использовании промышленных тепловизоров [8], а также программно-аппаратные комплексы для испытаний по этим методикам [9].

Значительной проблемой для испытаний СТС на железнодорожном транспорте России является отсутствие в настоящее время специализированных изотермических камер. Проведение теплотехнических испытаний в обычных крытых помещениях (склады, депо и т.п.) с использованием любой из указанных выше методик приводит к возникновению значительных неопределенностей при измерении коэффициента K , которые должны быть учтены в его итоговом значении. В противном случае результат измерения K не может гарантировать условий качественной и безопасной перевозки СПГ.

■ E-mail: D.Davydov@vniias.ru (Д. О. Давыдов)

Ранее предпринимались попытки оценить точность определения коэффициента K [10], но не путем оценки составляющих неопределенности измерений, необходимых для расчета его величины, а методом учета различных составляющих погрешности измерительных приборов и частных условий проведения испытаний, что не соответствует требованиям [11]. Предложим методику, которая позволяет определить по результатам испытаний СТС методом внутреннего обогрева не в специализированной изотермической камере все значимые составляющие неопределенности измерения коэффициента K и, выразив их через расширенную неопределенность, учесть величины этих составляющих в итоговом значении K для минимизации риска порчи СПГ во время перевозки, особенно при использовании СТС в режиме «термос».

Положения предлагаемой методики, касающиеся расчета неопределенностей измерения коэффициента K , были приняты в 2018 г. рабочей группой по перевозкам скоропортящихся пищевых продуктов, действующей в рамках СПС под эгидой Комитета по внутреннему транспорту (КВТ) Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН, и включены в Справочник СПС [12].

Методика расчета коэффициента K . Как всякая определяемая экспериментально физическая величина, коэффициент K характеризуется неопределенностью измерения, и для дальнейшего его использования при разработке условий перевозок скоропортящихся грузов K может быть рассчитан как

$$K = \bar{K} + U(K), \quad (1)$$

где $\bar{K}$ — среднее значение коэффициента K , Вт/(м²·К); $U(K)$ — наиболее полное выражение всех составляющих неопределенности измерения коэффициента K , Вт/(м²·К).

Примем, что измерение температуры воздуха осуществляется в 12 точках снаружи и 12 точках внутри кузова СТС; измеряемые параметры (электрическая мощность, температура воздуха, средняя площадь кузова СТС) фиксируются с периодом 15 мин, испытания проводятся с достижением стационарного температурного режима. Тогда для $\bar{K}$, определяемого на основании средних значений физических величин, полученных в течение 12 ч в стационарном температурном режиме (расчетный интервал), имеем:

$$\bar{K} = \frac{\bar{Q}}{\bar{S}(\bar{T}_i - \bar{T}_e)}, \quad (2)$$

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{k=1}^n Q_k}{n}, \quad (3)$$

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^l T_{i,l,k}}{nl}, \quad (4)$$

$$\bar{T}_e = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m T_{e,j,k}}{nm}, \quad (5)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\bar{S}_e \bar{S}_i}, \quad (6)$$

где $\bar{Q}$, $\bar{T}_i$, $\bar{T}_e$, $\bar{S}$ — рассчитанные средние значения соответственно теплопроизводительности электронагревательных приборов, Вт; температуры воздуха внутри и снаружи кузова, °С; а также площади средней поверхности кузова испытуемого СТС, м². Q_k — теплопроизводительность электронагревательных приборов в k -м замере (всего за расчетный интервал производится $n=49$ замеров), Вт; $T_{i,l,k}$, $T_{e,j,k}$ — значения температуры воздуха, измеренные при k -м замере, соответственно i -м прибором внутри кузова СТС (всего в одном замере участвует одновременно $l=12$ равноточных приборов) и j -м прибором снаружи кузова (всего в одном замере участвует одновременно $m=12$ равноточных приборов), °С; $\bar{S}_i$, $\bar{S}_e$ — средняя площадь соответственно внутренней и наружной поверхностей кузова СТС (без учета гофр), м².

Расчет средней площади кузова произведем по формуле

$$\begin{aligned} \bar{S}_{eli} = & \bar{L}_{eli} \bar{B}_{eli} + 2(\bar{L}_{eli} + \bar{B}_{eli}) \bar{H}_{eli} + \\ & + \bar{L}_{eli} \frac{\bar{P}_{eli}}{2} + \pi \frac{\bar{B}_{eli}}{2} (\bar{H} \bar{H}_{eli} - \bar{H}_{eli}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\bar{L}_e$, $\bar{B}_e$, $\bar{H}_e$, $\bar{H} \bar{H}_e$, $\bar{L}_i$, $\bar{B}_i$, $\bar{H}_i$, $\bar{H} \bar{H}_i$ — средние значения длины, ширины, высоты по боковой стене и высоты по центральной продольной оси соответственно снаружи и внутри кузова испытуемого СТС; $\bar{P}_e$, $\bar{P}_i$ — средняя длина периметра эллипса, в виде которого можно условно представить скругление соответственно наружной и внутренней поверхностей крыши испытуемого СТС, м².

$$\bar{P}_{eli} = 4 \left(\left(\frac{\bar{B}_{eli}}{2} \right)^x + (\bar{H} \bar{H}_{eli} - \bar{H}_{eli})^x \right)^{\frac{1}{x}}, \quad (8)$$

где

$$x = \frac{\ln 2}{\ln \frac{\pi}{2}}. \quad (9)$$

Значения средних наружных размеров кузова испытуемого СТС ($\bar{L}_e$, $\bar{B}_e$, $\bar{H}_e$, $\bar{H} \bar{H}_e$) принимаются в соответствии с данными конструкторской документации. Величины средних внутренних размеров кузова

испытываемого СТС ($\bar{L}_i, \bar{B}_i, \bar{H}_i, \overline{HH}_i$) определяются как средние арифметические измерений:

- длины и ширины испытываемого СТС в соответствующих двух нижних и двух верхних ребрах кузова;
- высоты по боковой стене в четырех вертикальных ребрах кузова;
- высоты по центральной продольной оси в торцах испытываемого СТС.

$$\bar{L}_i = \frac{\sum L_i}{z_{\bar{L}_i}}, \quad (10.1)$$

$$\bar{B}_i = \frac{\sum B_i}{z_{\bar{B}_i}}, \quad (10.2)$$

$$\bar{H}_i = \frac{\sum H_i}{z_{\bar{H}_i}}, \quad (10.3)$$

$$\overline{HH}_i = \frac{\sum HH_i}{z_{\overline{HH}_i}}, \quad (10.4)$$

где $\bar{L}_i, \bar{B}_i, \bar{H}_i, \overline{HH}_i$ — наборы значений фактически измеренных соответственно длины, ширины, высоты по боковой стене и высоты по центральной продольной оси грузового помещения испытываемого СТС (без учета гофра), м²; $z_{\bar{L}_i}, z_{\bar{B}_i}, z_{\bar{H}_i}, z_{\overline{HH}_i}$ — количество измерений соответственно длины, ширины, высоты по боковой стене и высоты по центральной продольной оси грузового помещения испытываемого СТС.

Среди известных способов выражения неопределенностей [11] наиболее полный учет всех ее составляющих может быть выражен в расширенной неопределенности измерения коэффициента K . Измерения проводим методом внутреннего обогрева.

Расчет расширенной неопределенности измерения коэффициента K . Согласно [11] расширенную неопределенность измерения коэффициента K можно определить как

$$U(K) = k \cdot u_c(K), \quad (11)$$

где k — коэффициент охвата для выбранного уровня доверия (в соответствии с [11] может быть принят равным 2 для уровня доверия $p = 95\%$, который целесообразен для рассматриваемых инженерных задач); $u_c(K)$ — суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента K , представляющая собой оценку его стандартного отклонения.

В качестве математической модели, с помощью которой совокупность многократных повторных измерений, осуществляемых при испытании СТС, преобразуется в конечный результат измерения коэффициента K , выберем такую, где оценка неопределенности всех величин производится по всем точкам

кузова в пределах всего расчетного интервала. Выбор указанной модели определяется тем, что ее применение позволяет пренебречь влиянием места измерения температуры воздуха на его значение (данная корреляция, взятая в общем, в значительной степени будет нивелирована влиянием других факторов) и произвести численную оценку корреляции между векторами средних значений температуры воздуха снаружи и внутри кузова, а также теплопроизводительности электронагревательных приборов и температуры воздуха внутри кузова испытываемого СТС.

Поскольку коэффициент K определяется на основании функциональной зависимости (2), суммарная стандартная неопределенность его измерения может быть рассчитана на основании закона трансформирования неопределенностей, приведенного в [11]:

$$u_c(K) = \sqrt{\left(\frac{u_c(Q)}{\bar{S}(\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}u_c(S)}{\bar{S}^2(\bar{T}_e - \bar{T}_i)}\right)^2 + \frac{\bar{Q}^2(u_c(T_i)^2 + u_c(T_e)^2)}{\bar{S}^2(\bar{T}_e - \bar{T}_i)^4} + \frac{\bar{Q}^2 2r(T_e, T_i)u_c(T_e)u_c(T_i)}{\bar{S}^2(\bar{T}_e - \bar{T}_i)^4} + \frac{2\bar{Q}r(Q, T_i)u_c(Q)u_c(T_i)}{\bar{S}^2(|(\bar{T}_e - \bar{T}_i)|)^3}}, \quad (12)$$

где $u_c(Q)$, $u_c(T_i)$, $u_c(T_e)$, $u_c(S)$ — суммарные стандартные неопределенности измерения соответственно теплопроизводительности, Вт; температуры воздуха внутри и снаружи кузова, °С; средней поверхности кузова, м²; $r(T_e, T_i)$, $r(W, T_i)$ — коэффициенты корреляции соответственно векторов средних значений температуры воздуха снаружи и внутри кузова, теплопроизводительности электронагревательных приборов и температуры воздуха внутри кузова испытываемого СТС.

Основываясь на выбранной математической модели, в качестве оценки корреляции можно использовать коэффициент корреляции Пирсона [13]. Однако следует учитывать, что в классической форме линейный коэффициент корреляции может быть принят только для пары векторов теплопроизводительности и средней температуры воздуха внутри кузова СТС. Корреляция между векторами средней температуры воздуха снаружи и внутри кузова СТС должна быть принята с временным смещением и может быть определена по предлагаемому автором алгоритму, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Поскольку изменения отдельных параметров стационарного температурного режима для выбранной математической модели могут быть вызваны множеством самых разнообразных причин, не подлежащих

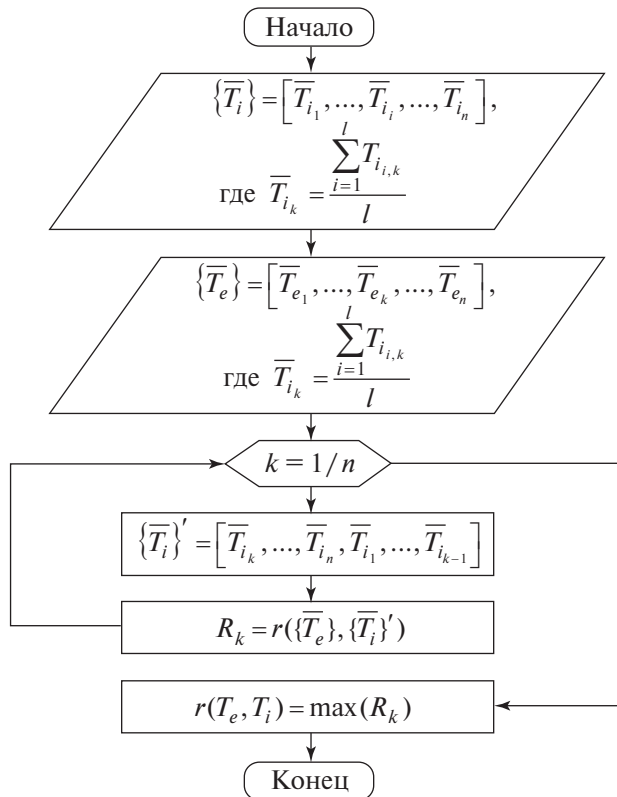


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения корреляции между средними значениями температуры воздуха внутри и снаружи кузова СТС

Fig. 1. Flow chart of the algorithm for defining correlation between average air temperatures inside and outside the TT superstructure

полному учету и точной оценке, в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей [13, 14] для установления стандартных неопределенностей измерения указанных параметров, оцененных по типу *A* [11], воспользуемся формулами для нормального распределения. В этом случае суммарные стандартные неопределенности параметров, входящих в формулу (2), могут быть определены по следующим выражениям:

$$u_C(Q) = \sqrt{u_A(\bar{Q})^2 + u_B(Q)^2} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Q_k - \bar{Q})^2}{n(n-1)} + u_B(Q)^2}, \quad (13)$$

$$u_C(T_{(e|i)}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \sum_{(j|i)=1}^{(m|l)} (T_{(e|i)(j|i),k} - \bar{T}_{(e|i)})^2}{n(n-1)} + u_B(T_{(e|i)})^2}, \quad (14)$$

$$u_C(S) = \sqrt{\frac{(\bar{S}_i u_C(S_e))^2 + (\bar{S}_e u_C(S_i))^2}{4 \bar{S}_e \bar{S}_i}}, \quad (15)$$

где $u_A(\bar{Q})$ — стандартная неопределенность измерения, оцененная по типу *A*, теплопроизводительности, Вт; $u_B(Q)$, $u_B(T_i)$, $u_B(T_e)$ — стандартные неопределенно-

сти измерения соответственно теплопроизводительности, Вт; температуры воздуха внутри и снаружи кузова СТС, К; оцененные по типу *B* [11]. Согласно [11] для указанных условий проведения испытаний $u_B(x) = a/\sqrt{3}$; $u_C(S_e)$, $u_C(S_i)$ — суммарные стандартные неопределенности значений площади соответственно наружной и внутренней поверхностей кузова испытуемого СТС, м².

Определим суммарные стандартные неопределенности измерения S_i и S_e . Представим S_i и S_e как функции ряда многократно измеряемых параметров, p_i и p_e (например, длины, ширины и высоты, измеренных в различных местах кузова СТС):

$$S_{e|i} = f(p_{(e|i)_1}, p_{(e|i)_2}, \dots, p_{(e|i)_y}, \dots, p_{(e|i)_Y}). \quad (16)$$

Тогда их суммарные стандартные неопределенности можно вычислить по формулам

$$u_C(S_{e|i}) = \sqrt{\sum_{y=1}^Y \left(u_C(p_{(e|i)_y}) \frac{\partial f}{\partial p_{(e|i)_y}} \right)^2}, \quad (17)$$

$$u_C(p_{(e|i)_y}) = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^V (p_{(e|i)_y,v} - \bar{p}_{(e|i)_y})^2}{V(V-1)} + u_B(p_{(e|i)_y})^2}, \quad (18)$$

где $\frac{\partial f}{\partial p_{(e|i)_y}}$ — частные производные функций для вы-

числения S_e или S_i ; $\bar{p}_{(e|i)_y} = \frac{\sum_{v=1}^V p_{(e|i)_y,v}}{V}$ — среднее значение параметра p_{e_y} или p_{i_y} ; V — количество измерений, осуществленных для определения среднего значения параметра p_{e_y} или p_{i_y} ; $p_{(e|i)_y,v}$ — измеренное значение параметра p_{e_y} или p_{i_y} при v -м замере; $u_B(p_{(e|i)_y})$ — стандартная неопределенность параметра p_{e_y} или p_{i_y} , оцененная по типу *B*.

Результаты экспериментальной проверки. Экспериментальная проверка предложенной выше методики проводилась в 2016–2018 гг. Рассмотрим полученные результаты на примере испытания вагона-термоса модели 16-6935, проведенного в апреле 2018 г.

На рис. 2 приведены результаты измерений в границах расчетного интервала (12 ч) температуры воздуха внутри и снаружи кузова вагона, а также результаты определения теплопроизводительности электронагревательных приборов.

В таблице представлены показатели, полученные в процессе теплотехнических испытаний вагона-термоса, а также значения рассчитанных на их основе стандартных неопределенностей по предложенной методике.

Для расчета расширенной неопределенности коэффициент охвата для уровня доверия 95% принят

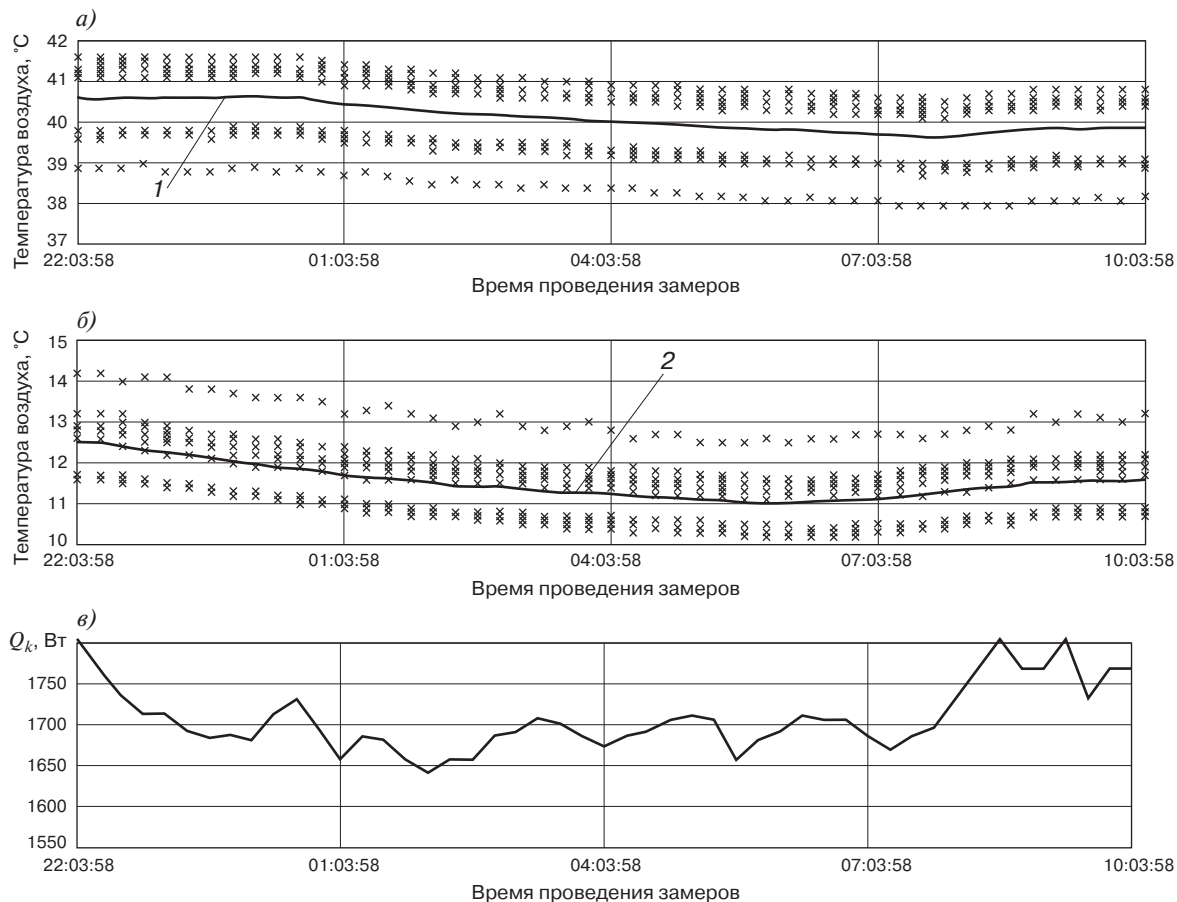


Рис. 2. Результаты измерений за расчетный интервал:

a, б — температура воздуха внутри и снаружи кузова: $\times$ — мгновенные значения температуры воздуха; *1, 2* — изменение средних (в пределах одного замера) значений температуры воздуха, внутри и снаружи кузова соответственно; *в* — теплопроизводительность электронагревательных приборов

Fig. 2. Measurement results in the estimated period:

a, б — air temperature inside and outside the superstructure: $\times$ — instantaneous values of air temperature; *1, 2* — change of average (within one size) values of air temperature inside and outside the superstructure; *в* — heat capacity of the electric heating appliances

равным 2. При указанном значении коэффициента охвата расширенная неопределенность измерения коэффициента K , рассчитанная по формуле (11), составила $0,024 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При определении суммарной стандартной неопределенности измерения K значения коэффициентов корреляции составили: между средними величинами температуры воздуха снаружи и внутри кузова вагона — $0,868$; между значениями теплопроизводительности и средними величинами температуры воздуха внутри кузова вагона — $0,725$.

На рис. 3 приведены границы расширенной неопределенности и локальные мгновенные значения коэффициента K , рассчитанные по формуле

$$K_{<i \setminus j>,k} = \frac{Q_k}{S(T_{i,k} - T_{e,j,k})}. \quad (19)$$

Из рис. 3 видно, что около 97% всех локальных мгновенных значений коэффициента K вошло в рассматриваемый диапазон $0,314 \pm 0,024 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,

то есть учтены все значимые составляющие неопределенности измерения коэффициента K .

Рассчитанное итоговое значение коэффициента K , включающее расширенную неопределенность, составило в приведенном примере $0,338 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ вместо $0,314 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, если произвести расчет по средним измеренным значениям (без учета неопределенностей измерения этих величин и их влияния на итоговое значение коэффициента K). Таким образом, они различаются на 7,6%. Предельный срок перевозки в зимний период года, например, пива пастеризованного в вагонах-термосах модели 16-6935 с коэффициентом $K=0,338 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ будет на 1 сут больше, чем с коэффициентом $K=0,314 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Для других условий изменение может быть более значительным. Это также подтверждает, что для любых конкретных условий проведения испытаний, в том числе для других методик измерения коэффициента K без использования специализированной изотермической камеры, неопределенность также должна

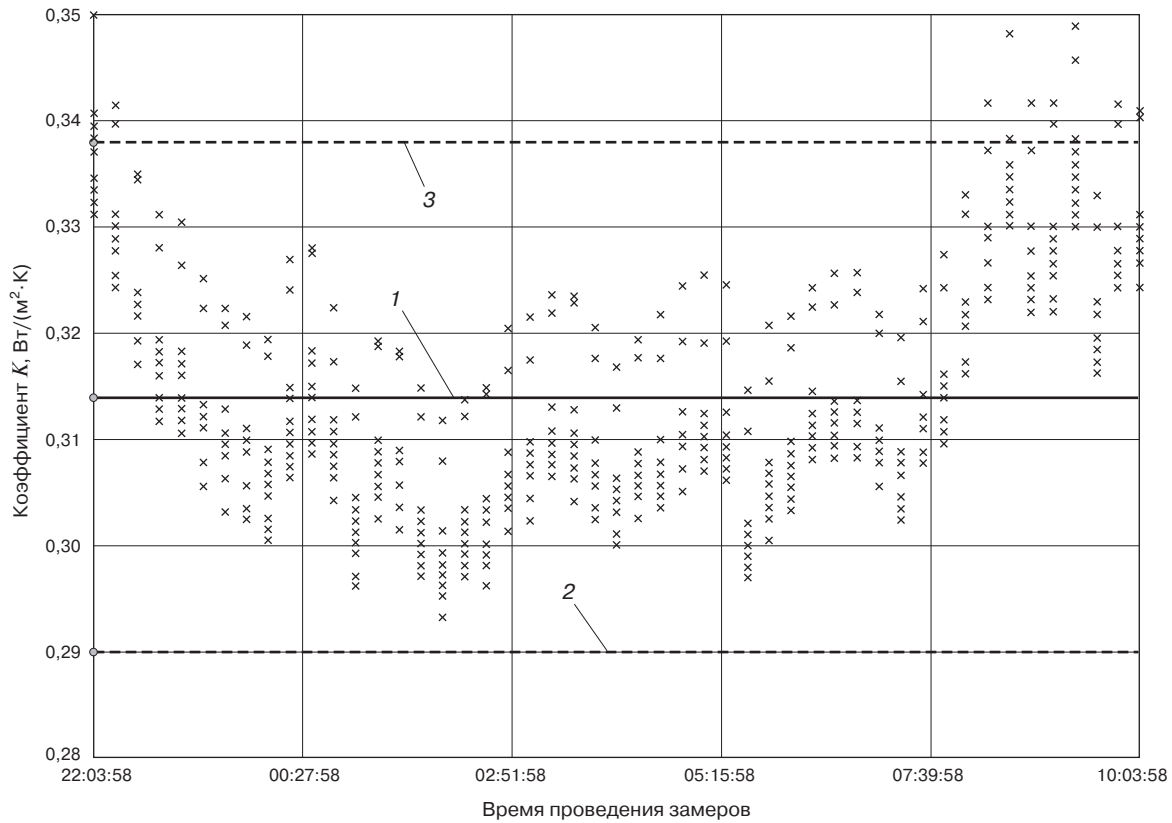


Рис. 3. Локальные мгновенные значения коэффициента K :

× — мгновенные значения температуры воздуха; 1 — $\bar{K}$; 2, 3 — нижняя и верхняя границы интервала $\bar{K} \pm U(K)$ соответственно

Fig. 3. Local instantaneous values of coefficient K :

× — instantaneous values of air temperature; 1 — $\bar{K}$; 2, 3 — bottom and top limits of the interval $\bar{K} \pm U(K)$ accordingly

Измеренные в процессе теплотехнических испытаний вагона-термоса модели 16-6935 показатели и значения рассчитанных на их основе стандартных неопределенностей по предложенной методике

Indicators measured during heat engineering tests of the refrigerator car model 16-6935 and standard uncertainties calculated according to the proposed technique

Показатель	Приборная погрешность	Среднее значение	Стандартная неопределенность		
			По типу A	По типу B	По типу A + по типу B
$\bar{L}_e$, м	0,0005	15,750	—	0,0003	0,0003
$\bar{B}_e$, м	0,0005	2,790	—	0,0003	0,0003
$\bar{H}_e$, м	0,0005	2,915	—	0,0003	0,0003
$\overline{HH}_e$, м	0,0005	3,323	—	0,0003	0,0003
$\bar{L}_i$, м	0,010	15,328	0,0025	0,0058	0,0063
$\bar{B}_i$, м	0,005	2,435	0,0150	0,0029	0,0153
$\bar{H}_i$, м	0,005	2,627	0,0060	0,0029	0,0066
$\overline{HH}_i$, м	0,005	2,905	0,0050	0,0029	0,0058
$\bar{P}_e$, м	—	6,117	—	—	0,0128
$\bar{P}_i$, м	—	5,192	—	—	0,0350
$\bar{S}$, м ²	—	186,132	—	—	0,2609
$\bar{Q}$, Вт	1 %*	1672	5,9	9,7	11,3
$\bar{T}_i$, °C	0,5	40,1	0,47	0,29	0,55
$\bar{T}_e$, °C	0,5	11,5	0,41	0,29	0,50
$\bar{K}$, Вт/(м ² ·К)	—	0,314	—	—	0,012

Примечание. * Относительная приведенная погрешность.

быть проанализирована, определена и учтена в его итоговом значении.

Выводы. Предложенная методика позволяет организациям, проводящим теплотехнические испытания, рассчитать значение коэффициента K , измеренного методом внутреннего обогрева без использования специализированной изотермической камеры, путем включения в итоговое значение K расширенной неопределенности его измерения. Методика апробирована в 2016–2018 гг. при проведении контроля теплотехнических параметров вагонов-термосов. Полученные результаты подтвердили, что в итоговом значении коэффициента K при расчете учитываются все значимые составляющие неопределенности измерения.

Применение предложенной методики позволит при разработке условий перевозок СПГ в режиме «термос», связанных с расчетом предельных сроков перевозок грузов, гарантировать сохранность качества и безопасность перевозимых грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Winkworth-Smith C.G., Foster T.J., Morgan W. The impact of reducing food loss in the global cold chain, final report. The University of Nottingham, 2015. 99 p.
2. Типовая методика по установлению температурных режимов и предельных сроков перевозки ОАО «РЖД» новых видов скоропортящихся грузов в изотермических транспортных средствах, кроме изотермических цистерн и контейнеров-цистерн, на особых условиях: утв. вице-президентом ОАО «РЖД» от 04.12.2012 г. № 355.
3. Дюбко А. П., Крутова Е. А. Теплообмен при перевозке скоропортящихся грузов в вагонах-термосах // Вестник ВНИИЖТ. 1984. № 5. С. 50–54.
4. Авторское право Организации Объединенных Наций, 2017. Соглашение о международных перевозках скоропортящихся пищевых продуктов и о специальных транспортных средствах, предназначенных для этих перевозок (СПС) [Электронный ресурс]. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/2017/ATP_R_ECE_TRANS_271_WEB.pdf (дата обращения: 16.07.2019 г.).

5. Иванов К. В., Лукшин А. Е. Оценка влияния тепловой инерции кузова рефрижераторного вагона при нестационарном подогреве // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1972. Вып. 456. С. 80–87.
6. Теймуразов Н. С., Науменко С. Н. Ускоренные методы оценки коэффициента теплопередачи кузовов изотермических транспортных средств // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 18–21.
7. Голубин А. А., Науменко С. Н. Разработка алгоритма по определению коэффициента теплопередачи кузова изотермического транспортного средства на основе результатов анализа происходящих в нем теплообменных процессов // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 5. С. 306–311. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.
8. Колесников В. И., Алексенко М. В. Мониторинг технического состояния ограждающих конструкций изотермического подвижного состава // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2007. № 1 (25). С. 27–33.
9. Программно-аппаратный комплекс инфракрасной диагностики изотермического подвижного состава «Тепло-М» / М. В. Алексенко [и др.] // Транспорт-2006: сборник трудов Всероссийской научно-практ. конф. Ч. III. Ростов н/Д: РГУПС, 2006. С. 95–96.
10. Иванов К. В. Оценка точности определения коэффициента теплопередачи ограждения рефрижераторного вагона // Труды ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1972. Вып. 456. С. 94–99.
11. ГОСТ 34100.3—2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения [Электронный ресурс]. М.: Стандартинформ, 2017. 104 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200146871> (дата обращения: 09.02.2019 г.).
12. Авторское право Организации Объединенных Наций, 2017. Справочник СПС 2018 [Электронный ресурс]. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/2017/ATP-2017r_Handbook.pdf (дата обращения: 16.07.2019 г.).
13. Розанов Ю. А. Лекции по теории вероятностей: уч. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. 120 с.
14. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. М.; Л.: Наука (Ленинградское отделение), 1965. 80 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ДАВЫДОВ Денис Олегович, старший научный сотрудник, лаборатория «Управление перевозками продовольственных и скоропортящихся грузов», АО «НИИАС»

Статья поступила в редакцию 19.02.2019 г., актуализирована 01.04.2019 г., принята к публикации 03.06.2019 г.

Calculation method for the overall heat-transfer coefficient of a technical transport superstructure for perishables in traffic

D. O. DAVYDOV

Joint Stock Company "Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation" (JSC "NIIAS"), Moscow, 109029, Russia

Abstract. High quality and safe transportation of perishable food cargo (PFC) by railway transport is impossible without knowledge of the heat engineering parameters of the technical transport (TT) used for transportation. Due to constant increase of requirements for PFC quality safety during transportation, the task of regular inspection and survey of TT is imperative. During transportation of (PFC) by technical transport (TT) in the "thermos" mode, their quality is maintained for a limited period, that directly depends on the value of the overall heat transfer coefficient (coefficient K) of the TT superstructure. Concurrently, the use of coefficient K calculated based on the average values measured during the heat engineering tests (electric power, air temperature, average area of the TT superstructure) without considering significant

fluctuations like conducting the tests without putting the TT into the specialized isothermal enclosure, enhances the risk of deterioration of the transported cargo quality transported during such transport.

The proposed technique allows companies conducting heat engineering tests to calculate the coefficient K value measured using the method of internal heating without using a specialized isothermal enclosure. This is achieved by adding an expanded uncertainty on the measurement of coefficient K in its final value. The method was tested from 2016–2018 in the control process of the heat engineering parameters of the "thermos" cars. The results confirmed that all significant components of measurement uncertainties are considered in calculating the final value of coefficient K .

Application of the proposed technique ensures safeguarding the quality and safety of transported goods during development of the PFC transportation conditions in the “thermos” mode connected with calculation of the cargo transportation time-limit.

Keywords: railway transport; perishable traffic; overall heat-transfer coefficient; uncertainty of measurements; heat engineering tests

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-4-249-256>

REFERENCES

1. Winkworth Smith C. G., Foster T. J., Morgan W. *The impact of reducing food loss in the global cold chain, final report*. The University of Nottingham, 2015, 99 p.
2. *Tipovaya metodika po ustanovleniyu temperaturnykh rezhimov i predel'nykh srokov perevozki OAO “RZD” novykh vidov skoroporyashchikhsya грузов v izotermicheskikh transportnykh sredstvakh, krome izotermicheskikh tsistern i konteynerov-tsistern, na osobyykh usloviyakh:* utv. vitse-prezidentom OAO “RZD” ot 04.12.2012 no. 355 [Typical method of setting temperature modes and the limit terms of transportation by JSC “RZD” of new types of perishable foods in refrigerated cars, except for refrigerated tanks and tank containers under special conditions; approved by the President of JSC “RZD” on 04.12.2012, no. 355]. (in Russ.).
3. Dyubko A. P., Krutova E. A. *Teploobmen pri perevozke skoroporyashchikhsya грузов v vagonakh-termosakh* [Heat exchange during transportation of perishable foods in termos cars]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 1984, no. 5, pp. 50–54.
4. Avtorskoe pravo Organizatsii Ob'edinennykh Natsiy, 2017. *Soglasenie o mezhdunarodnykh perevozkakh skoroporyashchikhsya pishchevykh produktov i o spetsial'nykh transportnykh sredstvakh, prednaznachennykh dlya etikh perevozek (SPS)* [Elektronnyy resurs] [Agreement on the international transportation of the perishable foods and on special transport intended for such transportations (RLS). (Electronic resource)]. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/2017/ATP_R_ECE_TRANS_271_WEB.pdf (retrieved on 16.07.2019).
5. Ivanov K. V., Lukshin A. E. *Otsenka vliyaniya teplovoi inertsii kuzova refrizheratornogo vagona pri nestatsionarnom podogreve* / Trudy TsNII MPS [Assessment of effect of the refrigerated car body heat inertia with unsteady heating / Proc. of JSC “VNIIZhT”]. Moscow, Transport, 1972, Vyp. 456, pp. 80–87.
6. Teymurazov N. S., Naumenko S. N. *Uskorennyye metody otsenki koeffi tsienta teploperedachi kuzovov izotermicheskikh transportnykh sredstv* [Accelerated methods of evaluating heat transfer coefficient of isothermal rolling stock carbody]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2009, no. 5, pp. 18–21.
7. Golubin A. A., Naumenko S. N. *Razrabotka algoritma po opredeleniyu koeffi tsienta teploperedachi kuzova izotermicheskogo transportnogo sredstva na osnove rezul'tatov analiza prois-*

khodyashchikh v nem teploobmennykh protsessov [Development of an algorithm for determining the heat transfer coefficient of the body of an isothermal vehicle based on the results of analysis of the heat exchange processes occurring in it]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 5, pp. 306–311. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-306-311.

8. Kolesnikov V. I., Alekseenko M. V. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya ograzhdayushchikh konstruktivnykh izotermicheskogo podvizhnogo sostava* [Monitoring of technical condition of fencing structures of refrigerated rolling stock]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University], 2007, no. 1(25), pp. 27–33.

9. *Programmno-apparatnyy kompleks infrakrasnoy diagnostiki izotermicheskogo podvizhnogo sostava “Teplo-M”* / M. V. Alekseenko [i dr.] / Transport-2006: sb. trudov Vserossiyskoy nauchno-praktich. konf. Ch. III [Hardware and software complex of infrared diagnostics of the refrigerated rolling stock “Teplo-M” / M. V. Alekseenko [et al.] / Transport-2006: collection of works of the All-Russia scientific and practical conference. P. III]. Rostov n/D: RGUPS [Rostov-on-Don, Rostov State Transport University], 2006, pp. 95–96.

10. Ivanov K. V. *Otsenka tochnosti opredeleniya koeffitsienta teploperedachi ograzhdeniya refrizheratornogo vagona* / Trudy TsNII MPS. [Assessment of accuracy of determination of the heat transfer coefficient of the car-refrigerator / Proc. of JSC “VNIIZhT”]. Moscow, Transport, 1972, Vyp. 456, pp. 94–99.

11. GOST 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Neopredelennost' izmereniya*. Chast' 3. *Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya* [Elektronnyy resurs] [Uncertainty of measurements. Part 3. Guidelines for uncertainty of measurements expression (Electronic resource)]. Moscow, Standartinform, 2017, 104 p. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200146871> (retrieved on 09.02.2019).

12. Avtorskoe pravo Organizatsii Ob'edinennykh Natsiy, 2017. *Spravochnik SPS 2018* [Elektronnyy resurs]. [Reference guide of RLS 2018 (Electronic resource)]. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/2017/ATP-2017r_Handbook.pdf (retrieved on 16.07.2019).

13. Rozanov Yu. A. *Lektsii po teorii veroyatnostey: uch. posobie dlya vtuzov* [Lectures on the theory of probability: textbook for higher schools]. Moscow, Nauka, 1986, 120 p.

14. Zaydel' A. N. *Elementarnye otsenki oshibok izmereniy* [Elementary estimates of measurements errors]. M.; L.: Nauka (Leningradskoe otdelenie) [Moscow; Leningrad, Nauka, Leningrad branch], 1968, 96 p.

ABOUT THE AUTHOR

Denis O. DAVYDOV,

Senior Researcher, Laboratory of the Food and Perishable Cargo Transportation Control, JSC “NIIAS”

Received 19.02.2019

Revised 01.04.2019

Accepted 03.06.2019

■ E-mail: D.Davydov@vniias.ru (D. O. Davydov)

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Экономические исследования железнодорожного комплекса и их практическое значение / под ред. О. Ф. Мирошниченко. М.: РАС, 2019. 210 с.

Изложены результаты исследований по актуальным проблемам экономики железнодорожного комплекса: ценообразование на грузовые и пассажирские перевозки, прочие виды деятельности; управление затратами, зависимость их от объема перевозок, формирование удельных оценочных затрат; оценка экономической эффективности технологических решений и инвестиционных

железнодорожных проектов; совершенствование системы управления железнодорожным транспортом.

Книга рассчитана на специалистов, занимающихся вопросами экономики железнодорожного транспорта, может быть полезна преподавателям и студентам транспортных вузов.

По вопросам приобретения книги обращаться по адресу: 129626, г. Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ».

Тел.: (499) 260-43-20, e-mail: rio@vniizht.ru, www.vniizht.ru.