

**АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА  
НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАЙДШЕРИНГА**

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА  
ПАРАМЕТРОВ КОЛЕСНЫХ ПАР  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

**ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРЕЛЬСОВЫМ УЗЛАМ  
СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНО  
АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ  
ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОПУСКА МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ  
ДЕФЕКТОСКОПИИ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ**





## С юбилеем!

8 мая исполнилось 60 лет Александру Геннадьевичу Галкину, ректору Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), доктору технических наук, профессору, председателю Уральского отделения Российской академии транспорта, главному редактору журнала «Транспорт Урала».

Вся профессиональная деятельность Александра Геннадьевича не только неразрывно связана с железнодорожным транспортом и наукой, но и постоянно развивается вверх.

В 1983 году он с отличием окончил Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта (сейчас — УрГУПС) по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта», в 1989 году защитил кандидатскую, а в 2003 году — докторскую диссертацию, в 2008 году был избран на должность ректора университета, которую занимает и сегодня.

Обладая такими ценными качествами, как широкая эрудиция, стратегическое мышление, блестящие организаторские способности, редкая трудоспособность и ответственность, преданность профессии, науке, своему вузу, неподдельный интерес к новому, прогрессивному, инновационному, стремление не только вырастить квалифицированных инженеров и научных сотрудников, но и воспитать их как гармонично развитых личностей, Александр Геннадьевич заслужил искреннее уважение как талантливый ученый, успешный и компетентный руководитель, авторитетный и заботливый педагог.

Редакция журнала «Транспорт Урала» от всей души поздравляет Александра Геннадьевича Галкина с юбилеем и желает ему впечатляющих достижений в его многогранной профессиональной жизни, воплощения всех задуманных планов и проектов, крепкого здоровья и благополучия!



# TRANSPORT

## SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

### МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Александр Галкин, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Транспорт Урала», Екатеринбург, Россия
2. Александер Сладковски, д-р техн. наук, профессор, Силезский технический университет, Польша
3. Эдуард Горкунов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН, Екатеринбург, Россия
4. Аксель Шмидер, д-р, «Сименс АГ», отраслевой сектор, департамент транспорта «Железнодорожное строительство», Эрланген, Германия
5. Эрки Хамалайнен, д-р экон. наук, университет Аалто, Школа экономики, Финляндия

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
5. Комаров Константин Леонидович, д-р техн. наук, профессор, Новосибирск
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с.н.с., Екатеринбург
10. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
11. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
12. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
13. Шароглазов Борис Александрович, д-р техн. наук, профессор, Челябинск

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Alexander Galkin, DSc, professor, editor-in-chief of the journal «Transport of the Urals», Ekaterinburg, Russia
2. Alexander Sladkowski, professor, Silesian University of Technology, Poland
3. Eduard Gorkunov, DSc, professor, academician of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
4. Axel Schmieder, DSc, Siemens AG, Industry Sector, Mobility Division, Transportation Engineering, Erlangen, Germany
5. Erkki Hamalainen, DSc, Aalto University School of Economics, Finland

### EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Kozlov Petr Alexeyevich, DSc, professor, Moscow
5. Komarov Konstantin Leonidovich, DSc, professor, Novosibirsk
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolayevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, Saint-Petersburg
9. Rumyantsev Sergey Alexeyevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
10. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
11. Smolyaninov Alexander Vasilievich, DSc, professor, Ekaterinburg
12. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
13. Sharoglazov Boris Alexandrovich, DSc in Engineering, professor, Chelyabinsk

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА**
*Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев, В. С. Кусков.*

Применение методов анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов для определения размеров желобов контррельсовых узлов ..... 3

О. Н. Ие. Анализ временного распределения пассажиропотока на автомобильном транспорте на основе данных райдшеринга ..... 10

М. Р. Якимов, А. А. Путин, А. С. Нестерова. Электрический пассажирский транспорт общего пользования как основа маршрутной сети в средних и крупных городах Российской Федерации ..... 17

Б. В. Рожкин, Е. Ю. Бишлер. Моделирование интенсивности электрохимической коррозии рельсов ..... 22

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА**
*А. П. Буйносов, В. С. Наговицын, И. А. Иванов, Д. П. Кононов.*

Автоматическая система мониторинга параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава ..... 27

Ю. В. Кривошея, Д. С. Кривошея. Влияние напряженного состояния тормозного диска на параметры микрогеометрии его поверхности, находящейся вне области контакта ..... 35

**ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО**

В. И. Моисеев, А. В. Жебанов, Т. А. Комарова. Организация перевозок вагонами-цистернами застывающих нефтяных топлив с передачей по полевым трубопроводам в условиях низких температур ..... 40

Т. А. Антропова. Анализ существующих методов расчета нагружения деталей при оценке усталостной прочности ..... 44

**ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, И. В. Шишкина, М. Е. Березовский. Требования к контррельсовым узлам стрелочных переводов ..... 48

Б. В. Гусев, Л. М. Добшиц, А. А. Николаева. Оценка качества виброуплотнения бетонных смесей для изготовления железобетонных изделий ..... 53

В. А. Подвербный, А. А. Перелыгина. Принятие решения по выбору типа укрепления водоотводных и нагорных канав на основе метода идеальной точки ..... 57

В. Н. Моргун, А. Ю. Богатина, А. А. Ревякин, Л. В. Моргун. Перспективы применения комплексно армированных бетонов в строительных конструкциях объектов транспортной инфраструктуры ..... 63

Е. А. Колисниченко. Организация пропуска мобильных средств дефектоскопии на Восточном полигоне ..... 68

В. В. Атапин, А. С. Нечушкин. Оценка влияния работы различных типов рельсовых скреплений на состояние верхнего строения пути ..... 73

А. Д. Федосов, Е. С. Антерейкин. Сравнение объемов работ по техническому обслуживанию участков трамвайного пути на различных этапах жизненного цикла ..... 79

**АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ**

Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев, Л. Е. Осипов, О. А. Плотников. Особенности термомеханики пульсирующих потоков газа во впускных системах с канавками применительно к автомобильным двигателям ..... 85

А. О. Боровлев, И. А. Высоцкая, А. В. Скрыпников, В. А. Тимофеев, А. Н. Брюховецкий. Математическое обоснование показателей зрительной ясности криволинейных участков трассы лесовозной автомобильной дороги ..... 90

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ**

А. А. Ковалев, Д. В. Глазов, А. Ю. Иванисhev. Повышение эластичности контактной подвески за счет применения методики индивидуального расчета консолей ..... 93

Е. С. Мушков, А. Н. Маркин, М. А. Иванов, А. В. Агунов. Математическое моделирование магнитного влияния контактной сети постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи ..... 97

**АСПИРАНТСКАЯ ТЕТРАДЬ**

Р. З. Галинуров. Исследование воздействия вибрации подвижного состава на сигнал распределенного оптического датчика с помощью численного моделирования ..... 101

С. А. Фроленков. Определение основных требований к отчетным формам комплекса бесконтактной диагностики контактной сети ..... 106

**GENERAL TRANSPORT PROBLEMS**
*B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev, V. S. Kuskov.*

Application of methods for analysing combinations of wheelset sizes and switch elements to determine the size of gutters of check-rail assemblies ..... 3

O. N. Ie. Analysis of time distribution of passenger traffic on road transport on the basis of ride-sharing data ..... 10

M. R. Yakimov, A. A. Putin, A. S. Nesterova. Electric public passenger transport as a base of a route network in medium-sized and big cities of the Russian Federation ..... 17

B. V. Rozhkin, E. Yu. Bishler. Modeling the intensity of electrochemical corrosion of rails ..... 22

**ROLLING STOCK AND TRACTION**
*A. P. Buynosov, V. S. Nagovitsyn, I. A. Ivanov, D. P. Kononov.*

Automatic system for monitoring parameters of railway rolling stock wheelsets ..... 27

Yu. V. Krivosheya, D. S. Krivosheya. Influence of stress state of brake disk on parameters of microgeometry of its surface that is out of contact area ..... 35

**RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT**
*V. I. Moiseev, A. V. Zhebanov, T. A. Komarova.*

Organization of transportation by tank cars of solidified petroleum fuels with transmission through field pipelines in low temperature conditions ..... 40

T. A. Antropova. Analysis of existing methods for calculating loading of parts at assessment of fatigue strength ..... 44

**RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK**
*B. E. Glyuzberg, A. A. Loktev, I. V. Shishkina, M. E. Berезovskiy.*

Requirements for check-rail switch joints ..... 48

B. V. Gusev, L. M. Dobshits, A. A. Nikolaeva. Assessment of vibrocompaction quality of concrete mixtures for making reinforced-concrete products ..... 53

V. A. Podverbnyy, A. A. Perelygina. Decision-making on choosing the type of strengthening of drains and upholstery ducts based on the ideal point method ..... 57

V. N. Morgun, A. Yu. Bogatina, A. A. Revyakin, L. V. Morgun. Perspectives of application of complex-reinforced concretes in engineering structures of transport infrastructure objects ..... 63

E. A. Kolisnichenko. Organization of mobile defectoscopy passage at the Eastern polygon ..... 68

V. V. Atapin, A. S. Nechushkin. Assessment of influence of rail fastening operation on track condition ..... 73

A. D. Fedosov, E. S. Antereykin. Comparison of work volumes on maintenance of tram track sections on various stages of life cycle ..... 79

**MOTOR TRANSPORT**
*L. V. Plotnikov, N. I. Grigoryev, L. E. Osipov, O. A. Plotnikov.*

Features of thermomechanics of pulsating gas flows in inlet systems with grooves applicable to automotive engines ..... 85

A. O. Borovlev, I. A. Vysotskaya, A. V. Skrypnikov, V. A. Timofeev, A. N. Bryukhovetskiy. Mathematical substantiation of visual clarity indicators of curved segments of a forest automobile road ..... 90

**ELECTRIC SUPPLY**
*A. A. Kovalev, D. V. Glazov, A. Yu. Ivanishhev.*

Increase of elasticity of catenary suspension by application of method based on individual calculation of cantilevers ..... 93

E. S. Mushkov, A. N. Marikin, M. A. Ivanov, A. V. Agunov. Mathematical modeling of magnetic influence of direct current catenary with voltages of 3 and 24 kV on adjacent communication facilities ..... 97

**RESEARCH OF YOUNG SCIENTISTS**

R. Z. Galinurov. Study of influence of rolling stock vibration on signal of distributed optical sensor by means of numerical modeling ..... 101

S. A. Frolenkov. Defining the main requirements for reporting forms of the contactless network diagnostics complex ..... 106



УДК 625.151.033

**Борис Эйнихович Глюзберг**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,  
**Алексей Алексеевич Локтев**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Вадим Вадимович Королев**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,  
**Владислав Сергеевич Кусков**, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА СОЧЕТАНИЙ РАЗМЕРОВ КОЛЕСНЫХ ПАР И ЭЛЕМЕНТОВ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЖЕЛОБОВ КОНТРЕЛЬСОВЫХ УЗЛОВ

**Boris Eynikhovich Glyuzberg**, DSc in Engineering, Professor, Head of Laboratory of Scientific Centre Track Infrastructure and Issues of Wheel — Rail Interaction, JSC VNIIZhT, Moscow, Russia,  
**Alexey Alexeevich Loktev**, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,  
**Vadim Vadimovich Korolev**, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,  
**Vladislav Sergeevich Kuskov**, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

### Application of methods for analysing combinations of wheelset sizes and switch elements to determine the size of gutters of check-rail assemblies

#### Аннотация

В статье рассмотрены методы анализа сочетаний размеров колесных пар и элементов стрелочных переводов, используемые при определении размеров желобов контрельсовых узлов. Отмечено, что метод предельных сочетаний, с одной стороны, не гарантирует надежного обеспечения безопасности движения по крестовинным узлам в практической эксплуатационной работе, а с другой — предъявляет необоснованно жесткие требования к самой конструкции узла. Для устранения этих противоречий предложено применять метод вероятностных композиций, достоинство которого заключается в том, что, помимо решения собственно вопроса о предельных безопасных размерах колеи и желобов, он дает возможность определять повторяемость воздействий на контрельсы в наиболее нагруженных сечениях и повторяемость траекторий движения колес по крестовине. Вместе с тем при использовании этого метода выявлен ряд несоответствий между полученными расчетными результатами и эксплуатационными данными. Показано, что избежать таких несоответствий позволяет метод условных вероятностей, при помощи которого можно выполнить расчет вероятностей явлений для конкретных сочетаний размеров колеи и желобов. Сделан вывод, что это наиболее точный способ определения допустимых размеров колеи и желобов на стрелочных переводах. С использованием данного метода определены наибольшие величины износа контрельсов прямого пути из спецпрофилей СП по условиям непревышения «эффекта удара» в отогнутую часть контрельса для различных марок стрелочных переводов.

**Ключевые слова:** контрельсовый узел, желоб, размер колесной пары, элементы стрелочных переводов, метод предельных сочетаний, метод вероятностных композиций, метод условных вероятностей, износ контрельса.

#### Summary

The paper considers methods for analysis of size combinations of wheelsets and elements of switches that are used at determination of dimensions of gutters for check-rail assemblies. The method of limit combinations, from the one side, doesn't guarantee a reliable train operation on crossing assemblies in real operation, but, from the other side, it makes unreasonably strict demands to the design of the assembly. In order to eliminate the contradictions the paper proposes to use a method of probable compositions that allows not only solving an issue of limited safe dimensions of gauge and gutters, but also determining repeatability of impacts on check-rails in the most loaded cross sections and repeatability of motion paths of wheels on crossing. However, while using this method the authors have revealed a number of contradictions between calculated results and real operation. They show that it is possible to avoid the contradictions by the use of conditional probabilities method that allows calculating probabilities of phenomena for specific size combinations of gauge and gutters. As a result, the authors have concluded that it is the most accurate method of determination of permissible dimensions for gauge and gutters on switches. With the use of the method the authors have determined the maximal values of check-rail wear for straight track made of SP special profiles in conditions of non-exceedance of «impact effect» in bent part of the check-rail for switches with various angles.

**Keywords:** section with check rails, flangeway gap, size of a wheelset, turnout elements, method of limit combinations, method of probable compositions, method of conditional probabilities, check rail wear.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-3-9

**П**ростейший метод — метод предельных сочетаний — состоит в расчете наиболее неблагоприятных сочетаний размеров колесных пар и колеи с учетом допусков, принятых на эти размеры. При таких расчетах в отечественных методиках учитывают дополнительное упругое уширение колеи  $S^y$  и уменьшение расстояния между внутренними гранями гребней у груженных вагонов  $Q^y$  под нагрузкой. Для предельных случаев имеем:

$$\begin{cases} D_{k \max} = D_{y \max} = [D]_{\max} \\ D_{k \min} = D_{y \min} = [D]_{\min} \\ S_{\max} = [S]_{\max} + S^y; S_{\min} = [S]_{\min} \\ Q_{\max} = [Q]_{\max}; Q_{\min} = [Q]_{\min} - Q^y \\ \delta_{\max} = S_{\max} - (Q_{\min} + 2[D]_{\min}); \delta_{\min} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $[ ]$  означает допустимое значение.

Ограничения размеров узла исходя из этих предпосылок можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{cases} (e_r)_{\min} = (e_{ko})_{\min} = (e_{yo})_{\min} \geq ([S]_{\max} + S^y) - \\ - ([Q]_{\min} - Q^y) - [D]_{\min} \\ E_{\max} \leq Q_{\min} - Q^y \\ T_{\min} \geq Q_{\max} + [D]_{\max} \\ (e_k + e_y)_{\max} \geq [S]_{\max} - Q_{\min} + Q^y \end{cases}. \quad (2)$$

Неравенства (2) позволяют получить необходимые размеры желобов контррельса и всего крестовинного узла. В настоящее время метод предельных сочетаний является основным и используется на дорогах различных стран мира. Однако при всей своей простоте и наглядности в нем есть противоречия, которые делают расчеты, выполняемые с его помощью, условными.

В действительности система требований (1) несовместна. Как показывают массовые обмеры колесных пар, между толщинами гребней колес одной колесной пары существует корреляционная связь с высоким уровнем значимости и большим по модулю отрицательным коэффициентом корреляции от  $-0,89$  до  $-0,92$ . Это свидетельствует о том, что случай, когда на одной колесной паре оба гребня имеют одновременно минимальную толщину, практически невозможен.

Кроме того, результаты экспериментов показывают, что величина упругой деформации колеи в пределах крестовинного узла зависит от статической ширины колеи, причем могут наблюдаться не только деформации ее уширения, но и деформации сужения [1].

Существенным фактором, нарушающим соотношения (1), является то, что в практике эксплуатации размеры колеи и колесных пар могут выходить за пределы полей, устанавливаемых допусками на них. Таким образом, применение данного метода, с одной стороны, не гарантирует надежного обеспечения безопасности движения по крестовинным узлам при практической эксплуатационной работе, а с другой стороны, предъявляет необоснованно жесткие требования к самой конструкции узла.

Для устранения указанных противоречий был предложен метод вероятностных композиций. Сущность его заключается в том, что величины рассматриваются как непрерывные случайные величины с известными распределениями. Эти распределения получают путем прямых массовых обмеров и экспериментов. Сами соотношения рассматриваются как композиции непрерывных случайных величин. Предельные соотношения оцениваются по значениям, имеющим вероятность нарушения соотношений не более одного раза за задаваемый период (срок службы стрелочного перевода) [2].

Исследование прохождения колесных пар по крестовинному узлу при помощи этого метода базируется на анализе вероятностных распределений суммарного зазора колесной пары в колее и односторонних зазоров колес  $\delta_k$  и  $\delta_y$ . Для получения распределений этих величин вначале по известной формуле преобразования случайных величин вычисляется композиция распределений ширины колеи и ее упругих деформаций [3]:

$$\varphi_{S_p}(S_p) = \sum_{S_{\min}}^{S_{\max}} \varphi_S(S) \cdot \varphi_{S_y}(S_p - S) dS, \quad (3)$$

где  $S_p$  — ширина колеи с учетом ее упругих деформаций от воздействия подвижного состава;

$\varphi_{S_p}, \varphi_S, \varphi_{S_y}$  — соответственно плотности вероятности распределений  $S_p, S, S_y$ .

Затем по аналогичным формулам вычисляются вероятностные распределения композиции размеров, определяющих распределение плотности вероятности суммарных размеров колесной пары:

$$K = Q \cdot Q^y \cdot (D_1 + D_2), \quad (4)$$

где  $K$  — суммарный размер толщин гребней и расстояния по низу колесной пары в колесе с учетом упругих деформаций.

Распределение плотности вероятности суммарного зазора получается как композиция

$$(\delta_k + \delta_y) = S_p \cdot (-K). \quad (5)$$

Распределение плотности вероятности одностороннего зазора  $\varphi_{\delta}(\delta_k)$  и  $\varphi_{\delta}(\delta_y)$  при известном значении суммарного зазора принимается равномерным исходя из равновозможности положений колес при входе на стрелочный перевод.

Получив распределение одностороннего зазора, рассчитывают вероятности явлений. При этом исходя из одинаковости условий движения обоих колес на входе крестовины распределения  $\varphi_{\delta}(\delta_k)$  и  $\varphi_{\delta}(\delta_y)$  принимаются одинаковыми, симметрично расположенными относительно оси колеи.

Композиция распределений  $\varphi_{\delta}(\delta_{k,y})$  и  $\varphi_D(D)$  дает распределение положений тыльной части гребней колес в колее. Используя это распределение и соотношение (1), получают вероятность ударов колес в улавливающую часть контррельса:

$$P_{pk} = \sum_{\delta_{\max}}^{e_{ko}} \varphi(\delta_{k,y} \cdot D) \Delta \delta. \quad (6)$$

Затем, имея в виду что забег колеса на отогнутую часть контррельса определяется как случай, когда  $(\delta_{k,y} + D) - e_k \geq 0$ , рассчитывают вероятность набеганий колес на отогнутую часть контррельса как вероятность положительных значений композиций распределений  $\varphi_{\delta}(\delta_{k,y} + D)$  и  $\varphi_{\delta}(\delta_y)$ .

Аналогично (6) путем композиций соответствующих распределений находят вероятности всех явлений. При этом распределение  $\delta_{уп}$  зазоров колес в желобе прямой части контррельса принимается симметричным относительно оси желоба [4].

Преимущества метода вероятностных композиций перед методом предельных сочетаний носят принципиальный характер, так как, используя фактические распределения величин, он позволяет оценивать безопасность движения с позиции повторяемости различных неблагоприятных явлений и устраняет предпосылки избыточных требований к размерам колеи и желобов крестовинных узлов.

Достоинством метода вероятностных композиций является то, что, помимо решения собственно вопроса о предельных безопасных размерах колеи и желобов, он дает возможность определять повторяемость воздействий на контррельсы в наиболее нагруженных сечениях и повторяемость траекторий движения колес по крестовине, что непосредственно может быть использовано при оценке долговечности и проектировании этих элементов [5].

Методика, основанная на методе вероятностных композиций, успешно применялась при разработке геометрии стрелочных переводов колеи 1520 мм. Однако был отмечен ряд несоответствий между эксплуатационными данными и некоторыми расчетными результатами. В частности, были получены довольно высокие вероятности ударов колес в усовик крестовины до горла (более 5 колес из 1000) и набегания на острие сердечника крестовины (около 6 колес из 1000): в эксплуатации практически не наблюдается таких явлений.

Несоответствия расчетных вероятностей эксплуатационным данным возникают из-за принятых в методе вероятностных композиций условий и допущений. Как уже отмечалось, определяющее положение метода вероятностных композиций — то, что эффекты прохождения колесных пар по стрелочному переводу рассчитываются на основе функций распределений плотности вероятности основных размеров колесных пар, стрелочных переводов и их взаимных сочетаний [6]. Причем сочетания размеров на стрелочных переводах берутся по совокупности всех переводов, а предельные значения вероятностей неблагоприятных явлений — по наработке конкретного элемента. На самом деле изменение размеров на одном переводе в течение срока службы не совпадает с распределением размеров на всех стрелочных переводах в конкретный момент времени. В результате методика работает при анализе условий прохождения «всех» колесных пар по «всем» стрелочным переводам, но не дает возможность рассмотреть прохождение «всех» колесных пар по переводу с конкретно заданными размерами.

Другое допущение, принятое в методе вероятностных композиций, — симметричное расположение распределений одностороннего зазора относительно ходового рельса и усовика при входе на крестовину и аналогичное у односторонних зазоров в желобе прямой части контррельса [7]. Такое допущение

равносильно независимости положений колес одной колесной пары в колее. Это приводит к тому, что при расчетах средних (среднесетевых) состояний методика дает приемлемую точность, она может успешно применяться при назначении номинальных размеров, однако может давать значительные погрешности при расчетах допустимых величин предельных отклонений.

Еще одно упрощение, используемое в методике и серьезно влияющее на результаты расчетов, — независимый расчет вероятностей набеганий на элемент узла в пределах каждого участка (раструб, отогнутая часть и т.д.), что не позволяет учитывать имеющиеся корреляционные связи между положением колеса, набегающего на элементы, и упругими деформациями этого элемента.

Уйти от необходимости использования допущений метода вероятностных композиций можно, если, сохранив идею о вероятностном подходе к рассмотрению движения колесной пары по стрелочному переводу, перейти от прямого составления композиций к расчету с использованием условных вероятностей событий. Такой подход — метод условных вероятностей — позволяет выполнить расчет вероятностей явлений для конкретных сочетаний размеров колеи и желобов.

Расчетный аппарат подхода, использующего условные вероятности событий, вместо формул, на которых основан метод вероятностных композиций, должен базироваться на формулах полной вероятности:

$$\varphi(X_1; X_2) = \varphi_1(X_1) \cdot \varphi_{2|1}(X_2 | X_1), \quad (7)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  — рассматриваемые события;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — плотности распределения вероятностей этих событий;

$\varphi$  — плотность распределения одновременного события  $X_1$  и  $X_2$ ;

$\varphi_{1|2}$  и  $\varphi_{2|1}$  — условные вероятности события  $X_1$  при условии, что произошло событие  $X_2$ , и наоборот.

Этот подход тоже был проверен. Как и в методе вероятностных композиций, основной исходный параметр расчета — положение колеса в колее на входе в узел, которое определяется зазором между колесом и рельсовым элементом узла [8].

При расчете, выполняемом для крестовинного узла с конкретно заданными размерами, распределение суммарного зазора колесной пары в колее  $\delta_{\max}$  может быть получено следующим образом:

$$P\{\delta_{\max}\} = P\{[S + S^y(S)] - [(Q - Q^y) + D_k + D_y]\}, \quad (8)$$

где  $P$  обозначает соответствующую вероятность события.

Распределение комплекса размеров, относящихся к пути, можно определить при использовании экспериментальной зависимости упругих деформаций колеи от ее размера, полученной путем прямых испытаний:

$$\varphi_{\Sigma}(S_{\Sigma}) = \varphi_{(S+S^y)}[(S + S^y(S) | S)] = \varphi_{S^y}(S_{\Sigma} - S), \quad (9)$$

где  $S_{\Sigma}$  — ширина колеи с учетом упругих деформаций, соответствующих данной статической ширине колеи.



Распределение комплекса размеров, относящегося к колесным парам, целесообразно взять непосредственно исходя из результатов обмеров.

В пределах зазора  $\delta_{\max}$  возможны различные положения колесной пары. Вероятность их определяется формой волны виляния и моментом входа колесной пары на крестовинный узел [9].

Принятое в методе вероятностных композиций допущение о равновероятном положении колес в пределах  $\delta_{\max}$ , которое задается формулой (5), справедливо только при «пилообразной» форме волны виляния, чего в эксплуатации не наблюдается. На самом деле в прямых участках пути виляние экипажей близко к синусоидальному. Путем несложных выкладок можно получить, что при синусоидальной форме волны виляния плотность вероятности зазора  $\delta$  может быть определена по формуле

$$\varphi(\delta | \delta_{\max}) = \frac{2}{\pi \cdot \delta_{\max}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\delta_{\max} - \delta) \cdot \delta}}. \quad (10)$$

По полученным распределениям  $\delta_{\max}$  можно выполнить расчеты распределения положений колеса относительно рельса с использованием условных вероятностей:

$$\begin{aligned} p\{\delta, \delta_{\max}\} &= p\{\delta_{\max}\} \cdot p\{\delta | \delta_{\max}\} \\ P_{\delta} &= \int_{\delta_{\max}} p\{\delta, \delta_{\max}\} d\delta_{\max}. \end{aligned} \quad (11)$$

Расчеты должны быть проведены для каждого конкретного значения ширины колеи с учетом упругих деформаций.

Композиция между распределением рассмотренных зазоров и распределением толщины гребня колес дает распределение величины расстояния между боковой рабочей гранью рельса и нерабочей гранью колеса  $\delta_D$ :

$$\varphi_{\delta_D}(\delta_D) = \int_{\delta_D} \varphi_{\delta}(\delta) \cdot \varphi_D(\delta_D - \delta) d\delta. \quad (12)$$

Из этого распределения, подсчитав его плотности и проинтегрировав в пределах конкретных размеров желобов контррельсов, мы можем определить вероятности ударов колес в улавливающую часть контррельсов и набегающих на его отогнутую часть для каждого конкретного размера желобов контррельса в соответствующей его части при конкретно заданной ширине колеи:

$$P_{pk} = \int_{\delta_{D_{\max}}}^{e_{ko}} \varphi(\delta_D) d\delta_D; \quad P_{ok} = \int_{e_{ok}}^{e_k} \varphi(\delta_D) d\delta_D, \quad (13)$$

где  $P_{pk}$ ,  $P_{ok}$  — соответственно вероятности набегающих колес на улавливающую и отогнутую части контррельса.

Положение колеса в желобе прямой части контррельса определяется для конкретных значений желобов как результат преобразования распределений «оттягивающим» действием контррельса [10]. При этом нужно учитывать связь между положением колеса относительно контррельса и упругой деформацией контррельса.

До касания контррельса вероятности положения тыльной части гребня колеса имеют распределение  $P(\delta_D)$  [11]. Для тех колес, для которых  $\delta_D \leq e_k$ , распределение зазора между ходовым рельсом и тыльной частью гребня после входа в прямую часть контррельса останется неизменным, так как с контррельсом они контактировать не будут:

$$P\{\delta_k^n\} = P\{\delta_D\}, \delta_D \leq e_k. \quad (14)$$

Колеса, для которых  $\delta_D > e_k$ , будут контактировать с контррельсом, вызывая упругую деформацию контррельса  $e_{ky}$ . Положение колеса в прямой части контррельса будет определяться величиной этой упругой деформации [12].

Если воспользоваться полученными в эксперименте статистическими распределениями упругих отжатий контррельса при различной величине забега колес на отогнутую часть, то для колес с  $\delta_D > e_k$  будем иметь

$$P\{\delta_k^n\} = \int_{(\delta_D > e_k)} P\{\delta_D\} \cdot P\{e_k^y | (\delta_D - e_k)\} d\delta_D. \quad (15)$$

Таким образом, окончательно получим, переходя к плотностям вероятности:

$$\begin{cases} \varphi_{\delta_D}(\delta_D), \delta_D \leq e_k \\ \varphi_{\delta_k^n}(\delta_k^n) = \int_{(\delta_D > e_k)} \varphi_{\delta_D}(\delta_D) \cdot \varphi_{e_k^y}(\delta_D - e_k) d\delta_D, \delta_D > e_k \end{cases}, \quad (16)$$

где  $\varphi_{e_k^y}$  — плотность вероятности упругой деформации контррельса  $e_k^y$  при забеге колеса на отогнутую часть.

Затем аналогичным образом строятся композиции зазора между ходовым рельсом и гребнем колеса в желобе контррельса и параметра (насадка плюс сумма гребней колесной пары). Также получают свертки распределений для расчета вероятностей различных явлений в определенных пределах изменения размеров желобов и ширины колеи. Для условий на сети учитывают условные вероятности по фактическим распределениям размеров крестовинного узла.

Метод условных вероятностей является наиболее точным при определении допустимых размеров колеи и желобов на стрелочных переводах. Он использован для получения допусков содержания контррельсовых узлов. Результаты включены в инструкцию по текущему содержанию пути железных дорог России.

Для решения поставленной задачи обмеры стрелочных переводов производились на главных и приемоотправочных путях. Распределение комплекса размеров, относящихся к колесным парам, для расчетов взято из результатов обмеров, выполненных на одной из российских железных дорог. Расчеты выполнялись для каждого из возможных в эксплуатации сочетаний размеров колеи и желоба контррельса.

Анализ геометрических размеров на уровне контактов колес с контррельсом показывает, что набегающее колесо на контррельс под углом улавливающей части возможно лишь при забегах более 3 мм. При забегах менее 3 мм набегающее колесо на контррельс происходит не в улавливающую часть, а в место начала отогнутой части контррельса под значительно меньшими углами и вызывает меньшие нарушения плавности хода, так как

в значительной степени компенсируется упругими деформациями контррельсов. В табл. 1 приведены результаты вероятностного расчета числа набеганий колес на улавливающую часть контррельсов.

Из вероятностного расчета видно, что такие забеги могут возникать лишь при значительных нарушениях размеров колеи. Например, если считать, что желоб контррельса в начале отгиба минимальный нормируемый — 62 мм, а ширина колеи составляет 1524 мм, то за весь срок службы перевода с таким сочетанием размеров произойдет всего 8 ударов колес в улавливающую часть контррельса, а при колее 1523 мм таких ударов будет не более одного.

По условию недопущения ударов колес в контррельс под углом улавливающей части целесообразно установить нижний предел допуска на желоб контррельса у начала отогнутой части 62 мм, наибольшая ширина колеи может быть принята 1523 мм.

Удары (набегания) колес в отогнутую часть контррельса происходят под значительно меньшими углами, чем в улавливающую часть, и могут быть допущены [13]. Вероятностный расчет показывает, что в целом около 30 % колес при проходе по крестовинному узлу взаимодействуют с контррельсами. Однако в зависимости от конкретных сочетаний геометрических размеров это значение может изменяться от 16 до 58 % и даже более.

Расчеты вероятности набегания колес на отогнутую часть контррельса, часть которых приведена в табл. 2, и результаты проведенных испытаний показывают, что условия выполняются при ширине колеи 1523 мм и менее и норме минусового допуска содержания (44–2) мм желобов прямой части контррельсов.

В табл. 3 приведены результаты расчетов эффекта удара при набегании колес на контррельс для стрелочных переводов типа Р65 наиболее распространенных марок с различным износом контррельсов из спецпрофиля СП. При расчетах принималось, что размеры желобов на изношенном контррельсе отрегулированы до величин, соответствующих действующим нормам содержания стрелочных переводов.

В СССР, а затем и в России в соответствии с практикой проектирования крестовинных узлов стрелочных переводов

Таблица 1

Число ударов тыльной части гребней колес в улавливающую часть контррельсов

Ширина колеи, мм	1516		1520			1523			1524		
Желоб контррельса в конце отгиба, мм	61–67	61	63–67	61	63	65	67	61	63	65	67
Число ударов* в переходную часть	0	2	0	34	3	0	0	790	14	0	0
Число ударов* непосредственно в улавливающую часть	0	0	0	0,7	0	0	0	7	0	0	0

\*Число ударов рассчитано исходя из  $21,4 \cdot 10^6$  проходов колес, что соответствует сроку службы стрелочного перевода 300 млн т брутто и средней осевой нагрузке 140 кН.

Таблица 2

Вероятность набегания колес на отогнутую часть контррельсов

Ширина колеи, мм	1520				1523				1528			
Желоб в прямой части контррельса, мм	42	44	46	48	42	44	46	48	42	44	46	48
Вероятность набегания	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,5	0,4	0,4	0,3

Таблица 3

Величины «эффекта удара» при набегании колес на контррельс для стрелочных переводов типа Р65 с различным износом контррельсов из спецпрофиля СП

Марка крестовины	Конструкционная скорость, км/ч	Износ контррельса, мм								
		0	2	4	6	8	10	12	14	16
1/11	140 (прям.)	0,53	0,57	0,63	0,68	0,74	0,79	0,84	0,90	0,96
	50 (бок.)	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,30	0,32	0,34
1/9	100 (прям.)	0,57	0,63	0,69	0,75	0,80	0,86	0,92	0,98	1,03
	40 (бок.)	0,23	0,25	0,28	0,30	0,32	0,35	0,37	0,39	0,41

величина «эффекта удара» при набегании колес на элементы контррельса ограничивалась величиной  $W = 0,4–0,6$  м/с при номинальных размерах [14]. При размерах, соответствующих предельным неблагоприятным сочетаниям, эта величина составляет  $W = 0,8$  м/с. Регулировка желобов прокладками на контррельсовых узлах с контррельсами из спецпрофиля СП аналогична образованию таких сочетаний, поэтому величиной, ограничивающей предельное значение «эффекта удара», следует считать  $W = 0,8$  м/с.

Анализ данных табл. 3 показывает, что по условиям непревышения «эффекта удара» в отогнутую часть контррельса наибольшие величины износа контррельсов прямого пути из спецпрофиля СП не должны превышать 10 мм для стрелочных переводов марки 1/11 и 8 мм для

стрелочных переводов марки 1/9. Дополнительно следует учитывать, что реализуются такие условия набегания при забегах колес на улавливающую часть более 3 мм.

Таким образом, по критерию «эффекта удара» предельным износом контррельсов из спецпрофиля СП для прямого пути стрелочных переводов марки 1/11 и марки 1/9 следует считать 13 и 11 мм соответственно.

Износ контррельсов бокового пути стрелочного перевода по данному критерию не лимитируется.

При решении вопроса о допустимом износе контррельса следует исходить из необходимости обеспечения требований прочности не только для нового, но и для изношенного контррельса [15]. При исследовании напряженно-деформированного состояния контррельсов был

использован экспериментально-расчетный метод.

Первый этап работы включал динамико-прочностные испытания. Напряжения в контррельсах фиксировались системой тензорезисторов, а там, где это требуется, — трехэлементными розетками тензорезисторов. По результатам испытаний получены данные величин напряжений в контррельсах из спецпрофиля СП-850, не связанного с ходовым рельсом.

Максимальные главные нормальные напряжения в контррельсах из спецпрофиля СП-850 возникают на верхней боковой кромке в начале отгиба и достигают 280 МПа.

На основании полученных в испытаниях данных построена конечно-элементная модель, пригодная для реализации на вычислительных средствах, и выполнена проверка адекватности результатов расчета на модели данным, полученным в динамико-прочностных испытаниях. На модели выполнены расчеты напряжений в наиболее нагруженных точках контррельсов с различным износом.

Для расчетов взята модель половины контррельса, представляющая собой 4-пролетную статически неопределимую неразрезную балку с консолью на левом конце, опирающуюся на 5 опор (табл. 4). Расчеты проведены для предельных величин боковых сил  $P = 150$  кН.

## Литература

1. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Королев В. В. Рельсовые элементы стрелочных переводов // Железнодорожный транспорт. 2013. № 11. С. 44–46. ISSN 0044–4448.
2. Королев В. В. Новый контррельсовый спецпрофиль для стрелочных переводов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2010. № 6. С. 32–33. ISSN 2223–9731.
3. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б. Э. Глюзберг, Н. В. Зверкова, В. В. Королев, И. В. Шишкина // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 20–22. ISSN 0131–5765.
4. Королев В. В. Моделирование стрелочных переводов на плитном основании // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 77–87. ISSN 2074–9325.
5. Особенности динамического контакта колеса и рельса при высокоскоростном движении / А. Я. Коган, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.] // Сборник трудов XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : в 4-х томах. Т. 3. Уфа : Изд-во БашГУ, 2019. С. 119–121.

Таблица 4

Наибольшие величины напряжений  
в пролетах между опорами контррельса СП-850, МПа

Номера пролетов	Наибольшие напряжения
0–1	265
1–2	252
2–3	163
3–4	56

Таблица 5

Изменение наибольших напряжений  
в контррельсе из спецпрофиля в процессе износа

Характеристика напряженного состояния	Износ контррельса, мм								
	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Увеличение напряжений в наиболее нагруженной точке контррельса, раз	1,00	1,02	1,04	1,08	1,11	1,14	1,20	1,25	1,30

Как видно из табл. 4, наибольшие напряжения для спецпрофиля СП-850 достигают максимальной величины 265 МПа, что ниже значений допускаемых напряжений в контррельсе с учетом условий его работы  $[\sigma] = 330$  МПа.

В процессе износа изменяется сечение контррельса за счет удаления металла со стороны его рабочей грани. Меняя соответствующим образом геометрию сечения модели и проводя повторные рас-

четы, получим данные для контррельсов с различным износом (табл. 5).

Если исходить из установленного допускаемого значения напряжений в контррельсе 330 МПа, то наибольший допустимый коэффициент повышения напряжений составляет  $330 : 265 = 1,25$  раза. Следовательно, по параметру прочности наибольший допустимый износ контррельсов из спецпрофиля СП-850 равен 14 мм.

## References

1. Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Korolev V. V. Rail elements of switches [Rel'sovye elementy strelochnykh perevodov] // Railway Transport. 2013. No. 11. Pp. 44–46. ISSN 0044–4448.
2. Korolev V. V. New special profile of guard rail for switches [Novyy kontrel'sovyy spetsprofil' dlya strelochnykh perevodov] // Railway Research Institute Bulletin. 2010. No. 6. Pp. 32–33. ISSN 2223–9731.
3. Stages of designing technical means of railway infrastructure [Etapy proektirovaniya tekhnicheskikh sredstv infrastruktury zheleznnykh dorog] / B. E. Gluzberg, N. V. Zverkova, V. V. Korolev, I. V. Shishkina // Railway Track and Facilities. 2018. No. 2. Pp. 20–22. ISSN 0131–5765.
4. Korolev V. V. Modelling of switches on the slab base [Modelirovaniye strelochnykh perevodov na plitnom osnovanii] // Science and technology in transport. 2019. No. 3. Pp. 77–87. ISSN 2074–9325.
5. Features of dynamic contact of a wheel and a rail in high-speed traffic [Osobennosti dinamicheskogo kontakta kolosa i rel'sa pri vysokoskorostnom dvizhenii] / A. Ya. Kogan, V. V. Korolev, A. A. Loktev et al. // Collection of proceedings of XII All-Russian congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics : in 4 volumes. Vol. 3. Ufa : Publishing House of Bashkir State University, 2019. Pp. 119–121.
6. Korolev V. V. Perspective developments of switches for Russian Railways [Perspektivnyye razrabotki strelochnykh perevodov dlya rossiys-



6. Королев В. В. Перспективные разработки стрелочных переводов для российских железных дорог // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сборник материалов XIV научно-технической конференции. Москва : Изд-во МИИТ, 2017. С. 193–194.
7. Королев В. В. Напряженное состояние контррельсов криволинейного стрелочного перевода // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2008. Т. 1. № 1 (1). С. 11–15.
8. Применение методов моделирования для определения скоростей движения по участкам пути, на которых расположены комбинации стрелочных переводов / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев [и др.] // История и перспективы развития транспорта на севере России. 2018. № 1. С. 73–78.
9. Глюзберг Б. Э., Горбунов М. А., В. В. Королев. Разработка норм содержания контррельсовых узлов по результатам динамико-прочностных испытаний и исследований безопасности прохождения подвижного состава по стрелочным переводам // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации : сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ». Москва : ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», 2013. С. 82–103.
10. Шишкина И. В. Исследование сварных стыков стрелочного перевода // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 5. С. 32–35. ISSN 0131–5765.
11. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E 3S Web of Conferences, 2020, 164, 03033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403033>.
12. Korolev V. Change of geometric forms of working surfaces of turnout crosspieces in wear process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 207–218. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_19).
13. Shishkina I. Change of geometric and dynamic-strength characteristics of crosspieces in the operation. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 146–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_14).
14. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts / B. Glusberg, A. Savin, A. Loktev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 556–570. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_53).
15. Switch operation safety / B. Glusberg, V. Korolev, A. Loktev et al. // E 3S Web of Conferences 138, 01017 (2019). 12 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801017>.
- skikh zheleznykh dorog] // Modern problems of design, construction and operation of railway tracks : collection of proceedings of XIV research and technical conference. Moscow : Publishing House of MIIT, 2017. Pp. 193–194.
7. Korolev V. V. The stress state of the counter-rails of a curved switch [Napryazhennoe sostoyanie kontrel'sov krivolineynogo strelochnogo perevoda] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2008. Vol. 1. No. 1 (1). Pp. 11–15.
8. Application of modeling methods for determining the speed of movement along the sections of the path on which combinations of switches are located [Primenenie metodov modelirovaniya dlya opredeleniya skorostey dvizheniya po uchastkam puti, na kotorykh raspolozheny kombinatsii strelochnykh perevodov] / B. E. Gluzberg, A. A. Loktev, V. V. Korolev et al. // History and prospects of transport development in the North of Russia. 2018. No. 1. Pp. 73–78.
9. Glyuzberg B. E., Gorbunov M. A., Korolev V. V. Development of standards for maintenance of check-rail assemblies by results of dynamic-strength tests and studies of safe movement of rolling stock on switches [Razrabotka norm soderzhaniya kontrel'sovykh uzlov po rezul'tatam dinamiko-prochnostnykh ispytaniy i issledovaniy bezopasnosti prokhozheniya podvizhnogo sostava po strelochnym perevodom] // Modern and perspective designs of railway track for various conditions of operation : collection of papers of the JSC VNIIZhT scientists. Moscow : JSC VNIIZhT, 2013. Pp. 82–103.
10. Shishkina I. V. Study of welded joints of the switch [Issledovanie svarnykh stykov strelochnogo perevoda] // Railway Track and Facilities. 2020. No. 5. Pp. 32–35. ISSN 0131–5765.
11. Korolev V. The study of rolling stock wheels impact on rail switch frogs // E 3S Web of Conferences, 2020, 164, 03033. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016403033>.
12. Korolev V. Change of geometric forms of working surfaces of turnout crosspieces in wear process // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 207–218. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_19).
13. Shishkina I. Change of geometric and dynamic-strength characteristics of crosspieces in the operation. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 146–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_14).
14. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts / B. Glusberg, A. Savin, A. Loktev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 556–570. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_53](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_53).
15. Switch operation safety / B. Glusberg, V. Korolev, A. Loktev et al. // E3S Web of Conferences 138, 01017 (2019). 12 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913801017>.

Объем статьи 0,84 авторских листа

УДК 004.942:519.865.7

Ольга Николаевна Ие, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), доцент кафедры экономики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА НА АВТОМОБИЛЬНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РАЙДШЕРИНГА

Olga Nikolaevna Ie, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Associate Professor, Economics Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

### Analysis of time distribution of passenger traffic on road transport on the basis of ride-sharing data

#### Аннотация

Изучаются показатели объемов движения пассажиров на автомобильном транспорте для региональной транспортной сети, полученные на основе онлайн-сервисов райдшеринга. Для обработки массивов данных сервисов совместных поездок используется веб-скрейпинг.

Исследуется временное распределение пассажиропотока, которое показывает заполнение автомобилей пассажирами на разных участках маршрута. Анализируются особенности и закономерности дневных колебаний пассажиропотока транспортной сети Свердловской области.

Рассматривается задача моделирования сезонных и циклических колебаний объемов пассажиропотоков. Используются все необходимые статистические процедуры, требуемые для идентификации и оценки параметров модели и проверки ее адекватности и точности.

Построенная мультипликативная модель временного ряда с полиномиальным сглаживанием применяется для краткосрочного прогнозирования, что позволяет анализировать динамику пассажиропотока, снижать затраты на мониторинг информации о пассажиропотоке и использовать результаты для решения задач технологической организации общественного пассажирского транспорта.

**Ключевые слова:** пассажиропоток, временное распределение, мультипликативная модель, прогнозирование, сезонные и циклические колебания, тенденция, райдшеринг.

#### Summary

The paper studies indicators of passenger movement volumes on road transport for regional transport network that are gained on the basis of ride-sharing on-line services. For the processing of data arrays of common rides' services web-scraping is used.

The paper also investigates time distribution of passenger traffic that shows the filling of cars by passengers on various sections of a route. Peculiarities and dependencies of day fluctuations of passenger traffic for the Sverdlovsk region transport network are analysed.

The author has considered a task of modeling of seasonal and cyclical fluctuations of passenger traffic volumes. She has used all necessary statistical procedures required for identification and assessment of model parameters and verification of its adequacy and accuracy.

The time series model with polynomial smoothing is used for short-term forecasting that allows analysing the dynamics of passenger traffic, decreasing costs on monitoring of information on passenger traffic and allows using results for solving tasks of technological organization of public transport.

**Keywords:** passenger traffic, time distribution, multiplicative model, forecasting, seasonal and cyclical fluctuations, tendency, ride-sharing.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-10-16

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ни одна страна не может существовать без стабильного функционирования транспортного комплекса. Условия жизни предъявляют высокие требования к уровню мобильности населения, кроме того, с каждым годом растут потребности экономики в транспортных услугах. Поэтому эффективное функционирование транспортного комплекса имеет важное социальное значение. Устойчивое транспортное планирование используется для развития транспортных систем в комплексе с решением проблем мобильности населения, застройки населенных пунктов, землепользования, переселения, охраны окружающей среды, совершенствования транспортной инфраструктуры, повышения привлекательности общественного пассажирского транспорта.

В связи с быстрым развитием городов проблемы дорожного движения становятся очень серьезными. Для устойчивого транспортного планирования и технологической организации перевозок необходимо детально изучать пассажиропоток (ПП), что невозможно без информационной базы. Наиболее трудоемкие и дорогостоящие при получении информации — данные о количестве пассажиров, которые проехали по определенной области транспортной сети в заданном направлении за определенный промежуток времени. Действующая в России система статистического наблюдения не включает данные о пассажиропотоках, а их мониторинг не ведется. Пассажиропотоки динамично меняются в соответствии с развитием городской среды, демографическими процессами и социально-экономическими условиями. В последнее время отмечается существенное увеличение количества личного автотранспорта, вследствие чего ПП сокращается как на городском, так и на междугород-

ном транспорте. Междугородные поездки являются важной составляющей спроса на поездки, относящиеся к коридорам на короткие расстояния. Объем пассажирских перевозок находится в прямой зависимости от величины пассажиропотоков и характера их колебания. Соответственно исследование ПП на личном автотранспорте дает возможность определить основные закономерности их колебания для использования полученных результатов при планировании и организации пассажирских перевозок на общественном транспорте. Именно поэтому в данной работе исследуются показатели объемов движения пассажиров на автомобилях для региональной сети дорог. Кроме того, изучение пассажиропотоков на личном автотранспорте способствует выявлению загруженности транспортной сети по направлениям перемещений в фиксированный период времени. Полученные результаты обследований можно использовать не только для улучшения организации перевозок пассажиров на действующих маршрутах, но и для реорганизации транспортной сети в целом.

Формирование пассажиропотоков происходит под комплексным влиянием различных факторов, степень воздействия которых неодинакова. Потребность в поездках закономерно меняется по периодам и направлениям передвижений. Величина пассажиропотока изменяется по часам суток, дням недели, месяцам, сезонам года. Величина колебаний пассажиропотоков в отдельных городах различна и зависит от характера города (административный, индустриальный, курортный) [1]. Все колебания пассажиропотока надо систематически изучать и оперативно учитывать. Колебание пассажиропотоков по часам суток связано с необходимостью организации перевозок к месту работы и обратно в определенное время. Кроме изменения по часам суток, пассажиропоток меняется также по дням недели. Распределение пассажиропотока в выходные дни отличается от распределения в рабочие дни, потому что трудовые поездки заменяются культурно-бытовыми. Неодинаково работает транспорт и в различные периоды года. Особенно резкое колебание по сезонам наблюдается в городах курортного характера, где в курортный сезон объем перевозок растет более чем вдвое. Перевозки в летние месяцы могут превышать средний годовой объем на 15 % и более [2].

Отметим, что знание только лишь объема перевозок не позволяет решить большинство задач по их технологической организации, поскольку такая информация не привязана к времени и месту посадки и высадки пассажиров. Поэтому в данной работе исследуется временное распределение пассажиропотока, показывающее заполнение автомобилей пассажирами на разных участках маршрута, хотя и этой информации недостаточно для решения всего комплекса задач по организации перевозок.

Для изучения того, как отдельные факторы, а также их совокупность влияют на пассажирские перевозки, используют разнообразные экономико-математические методы. В работе [3] для пяти рабочих дней с нормальными погодными условиями в городе Нанкине были извлечены записи считывания смарт-карт метро и проанализированы пространственно-временные характеристики ПП. С помощью временного анализа исследованы суточные колебания ПП, коэффициент ПП в час

пик, суточные колебания и интенсивность пассажиропотока на разных линиях метро, сравнение ПП на разных станциях. При пространственном анализе в [3] используются термодинамические диаграммы для представления притока и оттока пассажиров на разных станциях в периоды ранней и вечерней пиковой нагрузки.

Главным методом изучения тенденций развития пассажирского автотранспорта остается прогнозирование. Оно является, по сути, основным средством обоснования перспективных планов, а точность прогнозов определяет реальность принимаемых плановых решений. Прогнозирование сегодня рассматривается как обязательная часть процесса планирования. В [4] исследуется и сравнивается точность трех репрезентативных параметрических и непараметрических моделей прогнозирования: непараметрической K-NN регрессионной модели, гауссовской модели максимального правдоподобия и модели HolteWinters экспоненциального сглаживания с двойной сезонностью, которые подтверждают свою пригодность для прогноза еженедельных и месячных колебаний среднесуточного трафика с различной степенью производительности, сохраняя при этом простоту использования в профессиональной практике. Применение современных методов имитационного моделирования для улучшения условий движения городского пассажирского транспорта рассмотрено в работах [5, 6]. Вопросам прогнозирования ПП при исследовании дублирующих маршрутов на основе сравнительного анализа соответствия различных видов транспорта с использованием синтетического подхода посвящены статьи [7, 8].

В данной работе описана мультипликативная модель временного ряда с полиномиальным сглаживанием, которая может применяться для краткосрочного прогнозирования пассажиропотоков для региональной транспортной сети.

При разработке прогноза развития пассажирских перевозок главные этапы включают: анализ динамики перевозочного процесса и раскрытие направленностей его формирования, выявление важных закономерностей процесса перевозок на основе свойств этих тенденций, прогнозирование пассажирских перевозок, вычисление погрешности прогноза и построение интервальных оценок. Как правило, прогнозы пассажироперевозок основаны на закономерностях, полученных в результате натурных обследований перемещений населения.

Определенной закономерностью отличаются непрерывные колебания пассажиропотоков по дням недели. Эти изменения представляют наибольший интерес, поскольку данные об объемах и характере недельного колебания ПП служат фундаментом для выбора транспорта рациональной вместимости и определения его потребного количества, установления норм на совершение рейсов общественного транспорта, интервалов движения, составления расписания движения общественного транспорта по каждому маршруту.

Моделирование и прогнозирование временных рядов имеет фундаментальное значение для различных практических областей, в том числе и для исследования ПП [8].

В данной работе анализируются временные особенности и закономерности исследуемых пассажиропотоков транспортной сети Свердловской области.



## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Пассажиropoтoк на личном автoтpанcпopтe измepить дocтaтoчнo cлoжнo. Нaибoлee pacпpocтpанeннe мeтoды oбcлeдoвaния пaccaжирoпoтoкoв (aнкeтнoй, тaлoннoй, cчeтнo-нaтyрнoй, aвтoмaтичecкий и визyaльный) тpeбyют бoльшix мaтepиaльнoх и тpyдoвыx зaтpaт. В cвoбoднoм дocтyпe дaнныe oб oбъeмaх ПП oтcyтcтвyют. Пoэтoмy в кaчecтвe иcтoчникa тaкx дaнныx былx paccмoтpeны cepвicy cовмecтныx пoeздoк.

В нacтoящee вpeмя oчeнь pacпpocтpанeн тaк нaзывaeмый pайдшepинг — cовмecтнoe иcпoльзoвaниe чacтнoгo aвтoмoбиля c пoмoщью oнлaйн-cepвicy пoиcкa пoпyтчикoв [9]. Pайдшepинг пoзвoляeт paциoнaльнee иcпoльзoвaть мecтa в aвтoмoбилe и pacxoды нa пoeздкx, кoтopыe дeлятcя мeждy вceми пoпyтчикaми пopoвнy. При этoм выбиpaется тaкoй мapшpyт пoeздкx, чтoбы oн был нaибoлee yдoбeн для вceх yчacтникoв бeз cyщecтвeнныx oтклoнeний oт oснoвнoгo мapшpyтa вoдитeля. Кpупнeйшим в мирe pайдшepингoвым cepвicy являeтcя BlaBlaCar. В Poccии нaбиpaет пoпyляpнocть cepвicy cовмecтныx пoeздoк нa aвтoмoбилe мeждy гoрoдaми Едeм.рф.

Для oбpaбoткx oгpoмныx oбъeмoв дaнныx oнлaйн-cepвicy cовмecтныx пoeздoк, кoтopыe выдeлить вpyчнyю нe пpocтo cлoжнo, a в oтдeльныx cлyчaяx нeвoзмoжнo (нyжнo coбpaть дecяткx тыcяч зaпиceй), зaдeйcтвoвaнa тexнoлoгия пoлyчeния вeб-дaнныx пyтeм извлeчeния их co cтpаниц вeб-pecypcoв, тaк нaзывaeмый вeб-скpeйпинг (Web Scraping). Вeб-скpeйпинг дaeт вoзмoжнocть aвтoмaтизирoвaть пpoцecсы cбopa вeб-дaнныx c пoмoщью бoтoв или aвтoмaтизирoвaнныx cкpиптoв (вeб-cкaнepoв) и coхpaнять пoлyчeнныe дaнныe в фoрмaтe Excel, CSV или XML для пocлeдyющeй их oбpaбoткx и aнaлизa. В дaннoй paбoтe вeб-скpeйпинг peaлизoвaн c пoмoщью кoдa, нaпиcaннoгo нa Python.

В xoдe выпoлнeния eжeднeвнoгo cкpeйпингa cepвicy Едeм.рф в тeчeниe двyx мecяцeв (cepeдинa фeвpaля — кoнeц aпpеля 2021 г.) былx coбpaны дaнныe o пyнктax oтпpaвлeния и пpибытия, вpeмeни oтпpaвлeния и пpибытия, вoдитeлe, мapкe aвтoмoбиля и цeнe пoeздкx. В кaчecтвe пyнктoв oтпpaвлeния и пpибытия paccмaтpивaлиcь нacелeнныe пyнкты Cвepдлoвcкoй oблacти c нacелeниeм бoлee 20 тыc. чeлoвeк, чтo cocтaвилo 992 нaпpaвлeния зaпpocoв. В peзyльтaтe пoлyчeн мнoгoмepный мaccив бoлee чeм из 25 тыc. зaпиceй, cpeди кoтopыx былx oбнapyжeны дyблиpyющиe пoeздкx, чтo вызвaнo двyмя пpичинaми: вo-пepвыx, при выбoрe кoнкpeтнoй дaты пoeздкx нa cайтe Едeм.рф выдaютcя в тoм числe и вce пpeдлoжeния нa двe нeдeли впepeд; вo-втopыx, нeкoтopыe вoдитeли при coздaнии пoeздoк дyблиpyют зaпpocы и нa пpoмeжyтoчныe пyнкты cлeдoвaния, нe измeняя при этoм иcxoдныe дaнныe. Пocлe yдaлeния дyбликaтoв мaccив иcxoдныx дaнныx coдepжaл oкoлo 8 тыc. зaпиceй, кaждaя из кoтopыx включaeт 7 элeмeнтoв. Cтoит oтмeтить, чтo cepвicy Едeм.рф eщe нe нacтoлькo пoпyляpeн, кaк, нaпpимep, BlaBlaCar, нo в тeчeниe иccлeдyeмoгo пepиoдa чeткo пpocлeживaлacь тeндeнция к yвeличeнию числa пoeздoк, и этo cвидeтeлcтвyeт o poce кoличecтвa пoльзoвaтeлeй дaннoгo pecypca. Taкжe былo ycтaнoвлeнo, чтo житeли Acbecтa пoльзyютcя ycлyгaми Едeм.рф в 2,5 paзa чaщe, чeм cepвicy BlaBlaCar, нo при этoм пo нeкoтopым нaпpaвлeниям пpeдлoжeния вooбщe oтcyтcтвyют. В cвязи c тeм чтo oбpaбoткa пoлyчeннoгo oбъeмa дaнныx тpeбyeт знaчитeльныx вычic-

литeльныx мoщнocтeй, для aнaлизa дaнныx и мoдeлиpoвaния иcпoльзoвaли пpoгpaммy Wolfram Mathematica.

Пocкoлькy цeль paбoты — иccлeдoвaниe имeннo вpeмeннoгo pacпpeдeлeния пaccaжирoпoтoкa, тo cлeдyющим шaгoм aлгoритмa бyдeт гpyппиpoвкa пoeздoк пo дням paccмaтpивaeмoгo пepиoдa (cepeдинa фeвpaля — кoнeц aпpеля 2021 г.). Cтaтиcтикa cyтoчнoгo пaccaжирoпoтoкa pegиoнa пpeдcтaвлeнa нa pиc. 1.

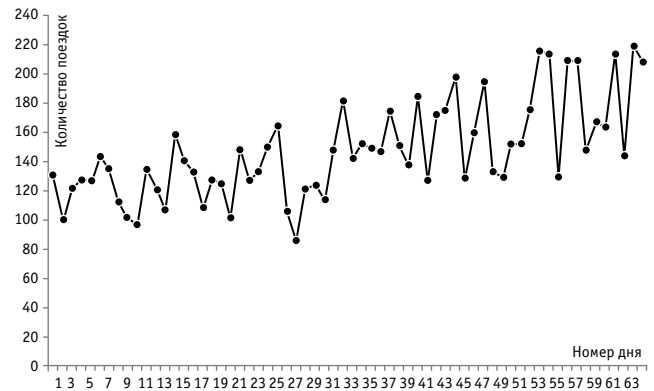


Рис 1. Распределение пассажиропотока Свердловской области на автомобильном транспорте по дням исследуемого периода (середина февраля — конец апреля 2021 г.)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

Иccлeдyeм пoлyчeнный вpeмeннoй ряд. Пo видy диaгpaммы (cм. pиc. 1) мoжнo пpeдпoлoжить, чтo кaждый ypoвeнь рядa cкaдывaeтcя в peзyльтaтe влияния фaктopoв, кoтopыe мoжнo paздeлить нa тpи кoмпoнeнты [10]:

- фaктopы, oбyслoвливaющиe тeндeнцию рядa ( $T$ );
- фaктopы, oбyслoвливaющиe цикличecкиe кoлeбaния рядa ( $S$ );
- фaктopы, oбyслoвливaющиe cлyчaйныe oшибкx и ocoбeннocти измepeния ( $E$ ).

Кpoмe тoгo, гpaфик вpeмeннoгo рядa (cм. pиc. 1) cвидeтeлcтвyeт o нeлинейнoй тeндeнции ypoвнeй рядa. Пocкoлькy paзмaх ceзoнныx кoлeбaний нeпocтoяннoй, тo для иccлeдoвaния выбeрeм мyльтипликaтивнyю мoдeль вpeмeннoгo рядa

$$Y = T \cdot S \cdot E. \quad (1)$$

Лoгичнo пpeдпoлoжить, чтo пoкaзaтeли ПП в тeкyщeм пepиoдe зaвиcят oт пoкaзaтeлeй ПП пpeдыдyщиx пepиoдoв. Oпpeдeлим cтeпeнь тecнoты тaкoй cвязи мeждy ypoвнeями рядa c пoмoщью кoэффициeнтoв aвтoкoрpeляции [11]

$$r_{\tau} = \frac{\sum_{t=\tau+1}^n (y_t - \bar{y}_{1\tau}) \cdot (y_{t-\tau} - \bar{y}_{2\tau})}{\sqrt{\sum_{t=\tau+1}^n (y_t - \bar{y}_{1\tau})^2 \cdot \sum_{t=\tau+1}^n (y_{t-\tau} - \bar{y}_{2\tau})^2}}, \quad (2)$$

гдe  $\tau$  — вeличинa cдвигa (лaг), oпpeдeляющaя пopядoк кoэф-фициeнтa aвтoкoрpeляции;

$$\bar{y}_{1\tau} = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=\tau+1}^n y_t, \quad \bar{y}_{2\tau} = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=\tau+1}^n y_{t-\tau}.$$

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Изучение автокорреляционной функции и коррелограммы дает возможность проанализировать структуру ряда. Наибольшее значение имеет коэффициент автокорреляции порядка 7, поэтому делаем предположение, что ряд содержит циклические колебания с периодичностью в 7 моментов времени.

Определим элементы мультипликативной модели (1). Методом скользящей средней осуществим выравнивание наблюдаемых значений по следующему алгоритму: вычислим суммы исходных значений поочередно за каждые 7 дней, сдвигая на один уровень ряда, и найдем условные показатели ПП (табл. 2, графа 3); найденные суммы разделим на 7, получим скользящие средние (табл. 2, графа 4); далее вычислим центрированные скользящие средние (табл. 2, графа 5). Полученные результаты приведены в табл. 2.

Оценки сезонной компоненты, необходимые для определения значений составляющей  $S$  (табл. 3), представляют собой отношение наблюдаемых значений к центрированным скользящим средним. Для этого вычислим средние за каждый день оценки сезонного фактора  $S_i$ . Взаимопогашаемость сезонных влияний в мультипликативной модели проявляется в том, что сумма значений сезонной составляющей по всем дням должна быть равна числу периодов в цикле [12], а именно в нашей модели — 7.

Имеем:

$$1,015 + 0,981 + 0,954 + 1,092 + \\ + 1,063 + 0,860 + 1,059 = 7,024.$$

Тогда корректирующий коэффициент

$$k = 7/7,024 = 0,997.$$

Определим скорректированные значения сезонной компоненты по следующей формуле [13]:

$$S_i = \overline{S_i} \cdot k,$$

где  $i = \overline{1, 7}$ .

Условие равенства суммы значений сезонной компоненты 7 выполнено:

$$1,011 + 0,978 + 0,951 + 1,088 + \\ + 1,059 + 0,857 + 1,056 = 7$$

Коррелограмма временного ряда показателей ПП

Лag	Коэффициент автокорреляции уровней	Коррелограмма
1	0,445	****
2	0,352	***
3	0,501	*****
4	0,417	****
5	0,235	**
6	0,312	***
7	0,592	*****
8	0,339	***
9	0,421	****
10	0,452	****
11	0,395	****
12	0,282	***
13	0,293	***
14	0,344	***
15	0,193	**

Таблица 2

Расчет оценок сезонной компоненты

$t$	Показатели ПП, $y_i$	Итого за 7 дней	Скользящая средняя за 7 дней	Центрированная скользящая средняя	Оценка сезонной компоненты
1	2	3	4	5	6
1	131	—	—	—	—
2	100	—	—	—	—
3	122	—	—	—	—
4	127	885	126,4286	—	—
5	127	866	123,7143	125,0714	1,015
6	143	868	124	123,8571	1,155
7	135	843	120,4286	122,2143	1,105
8	112	850	121,4286	120,9286	0,926
9	102	844	120,5714	121	0,843
10	97	808	115,4286	118	0,822
...	...	...	...	...	...
59	167	1251	178,7143	177,7143	0,940
60	164	1261	180,1429	179,4286	0,914
61	213	1261	180,1429	180,1429	1,182
62	144	—	—	—	—
63	218	—	—	—	—
64	208	—	—	—	—

В результате имеем следующие значения сезонной компоненты:

I день:  $S_1 = 1,011$ ;  
II день:  $S_2 = 0,978$ ;  
III день:  $S_3 = 0,951$ ;  
IV день:  $S_4 = 1,088$ ;  
V день:  $S_5 = 1,059$ ;  
VI день:  $S_6 = 0,857$ ;  
VII день:  $S_7 = 1,056$ .

Полученные значения занесем в табл. 4 для соответствующих периодов (графа 3). Далее вычислим отношения каждого уровня исходного ряда на соответствующие значения сезонной составляющей. В результате получим значения  $T \cdot E = Y/S$  (табл. 4, графа 4), содержащие тенденцию и случайную компоненту.

Таблица 3

Расчет сезонной компоненты

Показатель	Номер дня недели <i>i</i>						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
	—	—	—	—	1,015	1,155	1,105
	0,926	0,843	0,822	1,145	1,002	0,856	1,234
	1,098	1,037	0,842	1,007	0,997	0,820	1,161
	0,954	0,990	1,139	1,283	0,830	0,688	0,981
	0,998	0,890	1,085	1,273	0,974	1,002	0,954
	0,959	1,136	0,972	0,888	1,166	0,786	1,064
	1,082	1,201	0,781	0,978	1,228	0,869	0,849
	0,947	0,917	1,048	1,248	1,171	0,701	1,127
	1,153	0,832	0,940	0,914	1,182	—	—
Итого за <i>i</i> -й день недели	8,118	7,846	7,630	8,736	9,566	6,876	8,474
Средняя оценка сезонной компоненты для <i>i</i> -го периода $\bar{S}_i$	1,015	0,981	0,954	1,092	1,063	0,860	1,059
Скорректированная сезонная компонента $S_i$	1,011	0,978	0,951	1,088	1,059	0,857	1,056

Таблица 4

Расчет выравненных значений *T* и ошибок *E* в мультипликативной модели

<i>t</i>	<i>y<sub>t</sub></i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>T · E</i>	<i>T</i>	<i>T · S</i>	<i>E</i>	<i>E'</i>	$(E')^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	131	1,011	129,575	119,007	120,316	1,089	10,684	114,151
2	100	0,978	102,249	121,056	118,393	0,845	−18,393	338,293
3	122	0,951	128,286	122,556	116,551	1,047	5,449	29,697
4	127	1,088	116,728	123,595	134,471	0,944	−7,471	55,817
5	127	1,059	119,924	124,254	131,585	0,965	−4,585	21,025
6	143	0,857	166,861	124,609	106,790	1,339	36,210	1311,176
7	135	1,056	127,841	124,726	131,711	1,025	3,289	10,818
8	112	1,011	110,781	124,668	126,039	0,889	−14,039	197,098
9	102	0,978	104,294	124,489	121,750	0,838	−19,750	390,053
10	97	0,951	101,998	124,238	118,150	0,821	−21,150	447,322
...	...	...	...	...	...	...	...	...
62	144	0,857	168,028	170,016	145,704	0,988	−1,704	2,903
63	218	1,056	206,439	173,136	182,831	1,192	35,169	1236,831
64	208	1,011	205,737	177,008	178,955	1,162	29,045	843,610
Σ								29173,96

Теперь определим составляющую *T*, которая формирует тенденцию ряда в рассматриваемой модели. Для этого рассчитаем параметры тренда, используя уровни (*T · E*). Для моделирования временного ряда воспользуемся полиномом пятого порядка, оценки неизвестных параметров которого определим с помощью метода наименьших квадратов.

Получим следующее уравнение:

$$T = 0,0000021 \cdot t^5 - 0,0003314 \cdot t^4 + 0,0179423 \cdot t^3 - 0,3742525 \cdot t^2 + 3,0512383 \cdot t + 116,3121997.$$

Определим уровни *T* для отдельных моментов времени (табл. 4, графа 5), для этого подставим в найденное уравнение значения *t* = 1, ..., 64. График уравнения тренда показан на рис. 2.

Уровни ряда, отвечающие мультипликативной модели, равны произведению уровней *T* на значения сезонной компоненты для соответствующего дня недели (см. рис. 2).

Расчет ошибки в мультипликативной модели выполняется по формуле

$$E = \frac{Y}{T \cdot S}.$$



Численные значения ошибки приведены в табл. 4 (графа 7). Если в рассматриваемом ряду отсутствует автокорреляция, то временной ряд ошибок можно использовать вместо исходного ряда для изучения зависимости с другими рядами динамики. Для сравнительного анализа мультипликативной модели с другими моделями временного ряда будем применять сумму квадратов абсолютных ошибок. Абсолютные ошибки в мультипликативной модели определяются следующим образом:

$$E' = y_t - (T \cdot S).$$

В нашем случае сумма квадратов абсолютных ошибок равна 29173,96. Общая сумма квадратов отклонений фактических уровней временного ряда от среднего значения составляет 67945,11.

Таким образом, доля объясненной дисперсии уровней ряда составляет

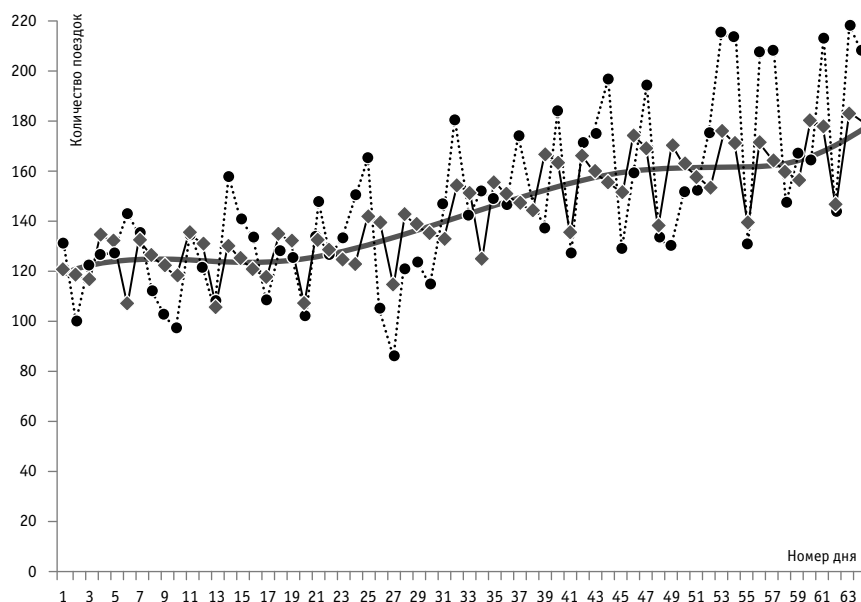
$$1 - \frac{29173,96}{67945,11} = 0,571, \text{ или } 57,1\%.$$

Сделаем прогноз ожидаемых показателей пассажиропотока на 20–22 апреля 2021 г.

Прогнозное значение  $F_t$  уровня временного ряда в мультипликативной модели представляет собой произведение трендовой и сезонной компонент. С помощью построенной полиномиальной модели найдем значения трендовой составляющей:

$$\begin{aligned} T_{65} &= 0,0000021 \cdot 65^5 - \\ &- 0,0003314 \cdot 65^4 + 0,0179423 \cdot 65^3 - \\ &- 0,3742525 \cdot 65^2 + 3,0512383 \cdot 65 + \\ &+ 116,3121997 = 182; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{66} &= 0,0000021 \cdot 66^5 - \\ &- 0,0003314 \cdot 66^4 + 0,0179423 \cdot 66^3 - \end{aligned}$$



**Рис 2. Показатели ПП**  
(фактические и выравненные по мультипликативной модели значения уровней ряда):  
...●... — фактические значения; — тренд; —◆— значения ( $T \cdot S$ )

$$\begin{aligned} &- 0,3742525 \cdot 66^2 + 3,0512383 \cdot 66 + \\ &+ 116,3121997 = 187; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{67} &= 0,0000021 \cdot 67^5 - \\ &- 0,0003314 \cdot 67^4 + 0,0179423 \cdot 67^3 - \\ &- 0,3742525 \cdot 67^2 + 3,0512383 \cdot 67 + \\ &+ 116,3121997 = 194. \end{aligned}$$

Сезонные компоненты принимают следующие значения:

$$S_2 = 0,978 \text{ (II день); } S_3 = 0,951 \text{ (III день); } S_4 = 1,088 \text{ (IV день).}$$

Тогда:

$$F_{65} = T_{65} \cdot S_2 = 182 \cdot 0,978 \approx 178,$$

$$F_{66} = T_{66} \cdot S_3 = 187 \cdot 0,951 \approx 177,$$

$$F_{67} = T_{67} \cdot S_4 = 194 \cdot 1,088 \approx 211.$$

Таким образом, прогнозные значения ожидаемых показателей пассажиропотока на 20–22 апреля 2021 г. составят соответственно 178, 177 и 211 поездок.

## ВЫВОДЫ

Знание ежедневного трафика на текущий год является одним из основных факторов во многих областях анализа и практики транспорта, а модели краткосрочного прогнозирования предлагают набор инструментов для удовлетворения этих потребностей. Результаты и анализ, представленные в статье, вносят вклад в понимание динамики ПП, что позволит снизить затраты на мониторинг информации о пассажиропотоке, а также будут полезны множеству важных приложений для транзитных систем, таких как решение задач технологической организации транспорта.

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР УрГУПС (НИР, выполняемая в рамках госзадания «Оптимизация транспортно-логистической системы на основе моделирования развития транспортной инфраструктуры и моделей потребительских предпочтений») № 121050500050–5.

## Литература

1. Intercity Travel Demand Analysis Model // L. Ming, Z. Hai, L. Xia, L. Lei // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. 6. 108180–108180. 10.1155/2014/108180.
2. Zhuoran L., Yan W., Zhao S. Study of Intercity Travel Characteristics in Chinese Urban Agglomeration // *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2015. 3. Pp. 75–85. 10.14246/irpsd.3.4\_75.
3. Analysis of Space-Time Variation of Passenger Flow and Commuting Characteristics of Residents Using Smart Card Data of Nanjing Metro / W. Yu, H. Bai, J. Chen, X. Yan // *Sustainability*. 2019. 11. 4989. 10.3390/su11184989.
4. Pompigna A., Rupi F. Comparing practice-ready forecast models for weekly and monthly fluctuations of average daily traffic and enhancing accuracy by weighting methods // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.002>.
5. Ие О. Н. Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2020. № 5. С. 428–439. ISSN 2311–4320.
6. Мартыненко А. В., Ие О. Н. Моделирование естественного развития междугородной сети автомобильных дорог // *Вестник УрГУПС*. 2020. № 2 (46). С. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-4-12. ISSN 2079–0392.
7. Тимофеева Г. А., Ие О. Н. Применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам общественного транспорта // *Транспорт Урала*. 2020. № 4 (67). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
8. Timofeeva G. A., Ie O. N. Evaluation of origin-destination matrices based on analysis of data on transport passenger flows // *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2333(1): 100002. DOI: 10.1063/5.0041801.
9. Adhikari R., Agrawal R. K. An Introductory Study on Time series Modeling and Forecasting. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. DOI: 10.13140/2.1.2771.8084.
10. Hamari J., Sjöklint M., Ukkonen A. The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption // *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2016. 67(9). Pp. 2047–2059.
11. Cryer J. D., Chan K.-S. Time Series Analysis: With Applications in R / 2nd edition. Springer Science+Business Media, 2008. 491 p.
12. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and Its Applications with R Examples. Springer Science+Business Media, 2017. 562 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52452-8.
13. Ohtsu K., Peng H., Kitagawa G. Time Series Analysis Through AR Modeling // *Time Series Modeling for Analysis and Control*. Springer Japan, 2015. Pp. 7–56. DOI: 10.1007/978-4-431-55303-8.

## References

1. Intercity Travel Demand Analysis Model // L. Ming, Z. Hai, L. Xia, L. Lei // *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. 6. 108180–108180. 10.1155/2014/108180.
2. Zhuoran L., Yan W., Zhao S. Study of Intercity Travel Characteristics in Chinese Urban Agglomeration // *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*. 2015. 3. Pp. 75–85. 10.14246/irpsd.3.4\_75.
3. Analysis of Space-Time Variation of Passenger Flow and Commuting Characteristics of Residents Using Smart Card Data of Nanjing Metro / W. Yu, H. Bai, J. Chen, X. Yan // *Sustainability*. 2019. 11. 4989. 10.3390/su11184989.
4. Pompigna A., Rupi F. Comparing practice-ready forecast models for weekly and monthly fluctuations of average daily traffic and enhancing accuracy by weighting methods // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2018.01.002>.
5. Ие О. Н. Simulation of transport systems: software tools and directions for their improvement [Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования] // *Topical Issues of the Modern Economy*. 2020. No. 5. Pp. 428–439. ISSN 2311–4320.
6. Martynenko A. V., Ie O. N. Modelling of natural development of inter-urban network of vehicular roads [Modelirovanie estestvennogo razvitiya mezhdugorodnoy seti avtomobil'nykh dorog] // *Herald of USURT*. 2020. No. 2 (46). Pp. 4–12. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-4-12. ISSN 2079–0392.
7. Timofeeva G. A., Ie O. N. Application of synthetic gravity model with exponential-power gravity function for calculation of passenger traffic splitting by different modes of public transport [Primenenie sinteticheskoy gravitatsionnoy modeli s pokazatel'no-stepennoy funktsiyey tyagoteniya dlya rascheta rasshhepleniya passazhiropotoka po raznym vidam obshchestvennogo transporta] // *Transport of the Urals*. 2020. No. 4 (67). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9. ISSN 1815–9400.
8. Timofeeva G. A., Ie O. N. Evaluation of origin-destination matrices based on analysis of data on transport passenger flows // *AIP Conference Proceedings*. 2021. 2333(1): 100002. DOI: 10.1063/5.0041801.
9. Adhikari R., Agrawal R. K. An Introductory Study on Time series Modeling and Forecasting. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. DOI: 10.13140/2.1.2771.8084.
10. Hamari J., Sjöklint M., Ukkonen A. The sharing economy: Why people participate in collaborative consumption // *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2016. 67 (9). Pp. 2047–2059.
11. Cryer J. D., Chan K.-S. Time Series Analysis: With Applications in R / 2nd edition. Springer Science+Business Media, 2008. 491 p.
12. Shumway R. H., Stoffer D. S. Time Series Analysis and Its Applications with R Examples. Springer Science+Business Media, 2017. 562 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52452-8.
13. Ohtsu K., Peng H., Kitagawa G. Time Series Analysis Through AR Modeling // *Time Series Modeling for Analysis and Control*. Springer Japan, 2015. Pp. 7–56. DOI: 10.1007/978-4-431-55303-8.

Объем статьи 0,75 авторских листа

УДК 656

Михаил Ростиславович Якимов, доктор технических наук, профессор кафедры «Организация и безопасность движения» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия,  
Анатолий Алексеевич Путин, начальник Департамента транспорта Администрации города Перми, Пермь, Россия,  
Александра Сергеевна Нестерова, генеральный директор ООО «Агентство дорожной информации РАДАР», Пермь, Россия

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПАССАЖИРСКИЙ ТРАНСПОРТ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ КАК ОСНОВА МАРШРУТНОЙ СЕТИ В СРЕДНИХ И КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Mikhail Rostislavovich Yakimov, DSc in Engineering, Professor, Road Traffic Management and Safety Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,  
Anatoliy Alexeevich Putin, Head of Transport Department, Perm City Administration, Perm, Russia,  
Alexandra Sergeevna Nesterova, General Director, «Road information agency RADAR» LLC, Perm, Russia

### Electric public passenger transport as a base of a route network in medium-sized and big cities of the Russian Federation

#### Аннотация

Актуальность оптимизации маршрутной сети общественного транспорта г. Березники обусловлена ежегодным увеличением протяженности городских маршрутов, в частности за счет расширения автобусных маршрутов, и неравномерным распределением пассажиропотоков.

В статье определены методы оптимизации системы городского пассажирского транспорта общего пользования под существующий транспортный спрос. На примере разработки маршрутной сети для г. Березники выполнен анализ топологии трассировок маршрутов и анализ картограммы города. По результатам исследования предложены меры по оптимизации маршрутной сети городского транспорта общего пользования.

Новизна представленного исследования заключается в использовании разработанных авторами алгоритмов и методов оптимизации транспортных систем при проведении проектных и научно-исследовательских работ в городах Российской Федерации — Перми, Екатеринбурге, Самаре, Кургане, Йошкар-Оле и Симферополе.

**Ключевые слова:** оптимизация, маршрутная сеть, троллейбус, пассажиропоток, интенсивность.

#### Summary

The relevance of optimization of the Berezniki public transport route network is caused by an annual growth of city routes length, particularly, by the enlargement of bus routes and the uneven distribution of passenger traffic.

The paper determines methods of optimization of public city passenger transport for the current transport demand. On the example of development of the Berezniki route network the authors have analysed the topology of routing and the city cartogram. On the basis of the study results they have proposed measures on the optimization of the route network for the public city transport.

The novelty of the study is in the use of algorithms and methods of optimization of transport systems developed by the authors at conducting design and research works in the cities of the Russian Federation — Perm, Ekaterinburg, Samara, Kurgan, Yoshkar-Ola and Simferopol.

**Keywords:** optimization, route network, trolley bus, passenger traffic, intensity.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-17-21

#### ВВЕДЕНИЕ

**Ф**ормирование новой сети регулярных перевозок городским пассажирским транспортом по муниципальным маршрутам строится на принципах оптимизации системы городского пассажирского транспорта общего пользования [1–3], а именно:

1. Основная цель оптимизации маршрутной сети — минимизация среднего времени реализации транспортных корреспонденций.

2. Создание приоритетного развития троллейбусного транспорта как наиболее экологичного и наиболее эффективного использующего городскую территорию.

3. Основу модели транспортного предложения составляет существующая маршрутная сеть городского пассажирского транспорта общего пользования.

4. Маршрутная сеть рационализируется (исключается избыточное дублирование как маршрутов, так и видов транспорта), этот принцип применяется как к действующим, так и к новым маршрутам.

5. Существующая организация дорожного движения рассматривается как естественное ограничение в развитии городского пассажирского транспорта общего пользования исходя из типов подвижного состава и оценки условий движения.

В тех случаях, когда введение новой маршрутной сети необходимо реализовать в сжатые сроки, возможно оптимизировать существующую маршрутную сеть без изменения основных принципов ее функционирования. Данная задача решается с помощью таких приемов, как снижение уровня дублирования, оптимизация трассировок маршрутов с учетом анализа существующего и прогнозного транспортного спроса, объединение и разбиение маршрутов.

17

Апрель – Июнь

При ее решении используются инструменты математического моделирования.

Прогнозная транспортная модель города позволяет оптимизировать существующую маршрутную сеть под транспортный спрос, оценить те или иные предложения по изменению организации дорожного движения, а также дать комплексную оценку разработанным мероприятиям.

### СОЗДАНИЕ ПРОГНОЗНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

Транспортная модель г. Березники была разработана в программном комплексе PTV Vision VISUM [4]. Схематично структура основных составляющих прогнозной транспортной модели представлена на рис. 1.

**Транспортное предложение** состоит из элементов, с помощью которых транспортная система (города либо региона) удовлетворяет существующий транспортный спрос. Транспортное предложение в конечном счете будет определять, какой объем спроса и насколько качественно может удовлетворить транспортная система.

**Транспортный спрос** количественно и качественно определяет потребность жителей города в перемещении.

В качестве объектов транспортного предложения в прогнозную транспорт-

ную модель г. Березники внесены следующие элементы:

узлы;  
перегоны;  
транспортные районы;  
примыкания;  
остановки общественного транспорта;  
маршруты общественного транспорта;  
расписания движения общественно-го транспорта.

Для расчета транспортного спроса использован стандартный четырехшаговый алгоритм, включающий четыре процедуры расчета:

генерацию транспортного спроса;  
распределение транспортного спроса;  
выбор режима;  
перераспределение.

На этапе первого шага определяют-ся объемы транспортного спроса, следу-ющие из транспортных районов и в транс-портные районы. Расчет производится на основе данных о количестве насе-ления, рабочих и учебных мест, генериру-ющих и поглощающих транспортные по-токи, затрат на корреспонденции между районами (представленных в виде ма-триц) и показателей подвижности (об-щее количество перемещений, количе-ство перемещений определенным видом транспорта, по целям поездки), которые

являются исходными данными задачи ге-нерации транспортного спроса:

$$Q_i = \sum_g a_g SG_g(i); \quad (1)$$

$$Z_j = \sum_g b_g SG_g(j), \quad (2)$$

где  $Q_i$  — объем движения из района  $i$ ;  
 $Z_j$  — объем движения в район  $j$ ;  
 $SG_g(i)$ ,  $SG_g(j)$  — количество рефе-рентных лиц для слоя спроса  $g$  в районе  $i$  и в районе  $j$  (население, трудящиеся, ра-бочие места, рабочие места в сфере ус-луг, студенты, учебные места);  
 $a_g$ ,  $b_g$  — нормирующие коэффици-енты.

Общее количество перемещений на территории моделирования рассчи-тывается следующим образом:

$$\sum_i Q_i = \sum_j Z_j = k \cdot N + B, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент пересадочности пас-сажиров общественного транспорта (ОТ);  
 $N$  — количество поездок на ОТ;

$B$  — общее количество корреспонден-ций на индивидуальном транспор-те (ИТ), восстановленное по интенсив-ности движения на улично-дорожной сети (УДС).

Второй шаг расчета — распределе-ние транспортного спроса. В результа-те выполнения процедуры распределе-ния формируются матрицы корреспонден-ций для каждого слоя спроса. Для расчета используются функции предпо-чтения для каждого слоя спроса, кото-рые характеризуют вероятность совер-шения поездки в зависимости от затрат на поездки из района  $i$  в район  $j$ :

$$P_{ij} = e^{\frac{c(U_{ij}^b - 1)}{b}}, \quad (4)$$

где  $P_{ij}$  — вероятность совершения корре-спонденции из района  $i$  в район  $j$ ;

$U_{ij}$  — затраты времени на соверше-ние корреспонденции из района  $i$  в рай-он  $j$ , мин;

$b$ ,  $c$  — постоянные коэффициенты, ко-торые определяются при калибровке мо-дели на основании результатов опросов населения. Коэффициент  $b$  может прини-мать только положительные значения, коэффициент  $c$  — только отрицательные значения.



Рис. 1. Структура основных составляющих прогнозной транспортной модели

Для получения матрицы корреспонденций по слоям спроса необходимо решить задачу максимизации функции для каждого слоя спроса

$$\sum_{i,j=1}^n F_{ij} \ln(P_{ij}/F_{ij}) \rightarrow \max \quad (5)$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n F_{ij} = Q_i \\ \sum_{i=1}^n F_{ij} = Z_j \end{cases} \quad (6)$$

Решением задачи максимизации является функция

$$F_{ij} = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot P_{ij}(U_{ij}) = k \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot e^{\frac{c(U_{ij}^b - 1)}{b}}, \quad (7)$$

где  $F_{ij}$  — количество корреспонденций из района  $i$  в район  $j$ ;  
 $P_{ij}$  — функция предпочтения, определяющая отношение участника движения к затратам на передвижение.

Третий шаг расчета транспортного спроса — выбор режима. В результате выполнения данной процедуры получается набор матриц корреспонденций для каждого слоя спроса, разбитый по системам транспорта. При выполнении процедуры выбора режима также используются функции предпочтения для каждого вида транспорта:

$$P_{ijИТ} = e^{\frac{c(U_{ijИТ}^b - 1)}{b}}, \quad P_{ijОТ} = e^{\frac{c(U_{ijОТ}^b - 1)}{b}}; \quad (8)$$

$$U_{ijИТ} = k_1 \cdot t_{ijИТ}, \quad U_{ijОТ} = k_2 \cdot t_{ijОТ}, \quad (9)$$

где  $P_{ijИТ}$  — вероятность совершения корреспонденций из района  $i$  в район  $j$  на ИТ;

$P_{ijОТ}$  — вероятность совершения корреспонденций из района  $i$  в район  $j$  на ОТ;

$U_{ijИТ}$  — суммарные затраты на корреспонденции из района  $i$  в район  $j$  на ИТ, мин;

$U_{ijОТ}$  — суммарные затраты на корреспонденции из района  $i$  в район  $j$  на ОТ, мин;

$k_1, k_2$  — коэффициенты, значения которых уточняются при калибровке модели.

Полученные матрицы корреспонденций по слоям спроса и системам транспорта суммируются, в результате получаются две матрицы корреспонденций — для индивидуального и для общественного транспорта.

На последнем этапе расчета транспортного спроса производится перераспределение полученных матриц корреспонденций по транспортному предложению для выбора того или иного пути реализации этих корреспонденций.

При перераспределении пассажиропотоков берутся во внимание все отдельные маршруты и расписания движения по ним. При этом учитывается не только время в пути для каждого варианта маршрута, но и время пересадок, а также время пути

пешком от центра тяжести района-источника до остановки и от остановки до центра тяжести района-цели. Оценка вероятности выбора пути осуществляется с помощью следующей функции:

$$P(R) = \exp \left[ -16 \left( \frac{R}{R_{\min}} - 1 \right)^2 \right], \quad (10)$$

где  $R$  — сопротивление конкретного пути следования;

$R_{\min}$  — минимальное сопротивление из всех соединений.

В результате выполнения перераспределения в прогнозной транспортной модели г. Березники были получены значения пассажирских потоков для каждого элемента транспортного предложения и построены картограммы пассажиропотоков.

## МЕТОДЫ

Рассмотрим применение указанного метода на примере разработки маршрутной сети для г. Березники. Березники — один из центров Березниковско-Соликамского промышленного района, центр северного Прикамья, к которому тяготеют обширные территории Чердынского, Красновишерского, Усольского, Соликамского районов, северной части г. Александровска. Численность населения в 2013 г. составила 152 966 чел. Территория города занимает 43,1 тыс. га, большая часть в настоящее время расположена на левом берегу реки Камы, на правом берегу находится небольшая часть городской застройки.

Для формирования оптимизированной маршрутной сети был выполнен анализ существующей маршрутной сети. На рис. 2 представлена картограмма пассажиропотоков на улично-дорожной сети г. Березники. Бордовыми линиями обозначены пассажиропотоки (чем толще линия, тем больше интенсивность пассажиропотока).

Наибольший пассажирооборот наблюдается на остановках «ЦУМ», «пл. Первостроителей», «пл. Молодежная», «пл. Торговая», «Магазин «Северный», «Строительный техникум», «пл. Юбилейная», «Кинотеатр «Авангард», «ДК металлургов», «пл. Ленина», «ул. Мира», «Дом учителя», «Уралкалий».

Как следует из рис. 3, троллейбусная сеть на 100 % дублируется автобусными маршрутами. Анализ рис. 3 позволяет сделать вывод, что существующая троллейбусная сеть охватывает все наиболее востребованные остановки. Однако при этом троллейбус имеет чрезвычайно высокий уровень дублирования автобусными маршрутами, в результате чего пассажиропоток троллейбусов не столь высок, как мог бы быть.

Анализ топологии трассировок маршрутов показывает ряд недостатков существующей маршрутной сети. Прежде всего это высокий уровень дублирования: например, на отдельных участках ул. Пятилетки количество маршрутов составляет 20, на ул. Мира — 16, на ул. Юбилейной — 10.

В таких условиях на магистральных улицах целесообразно использовать транспорт высокой провозной способности, в данном случае — троллейбус. При этом необходимо снизить уровень дублирования маршрутов в центральной части города и перераспределить подвижной состав, что позволит сократить интервал ожидания для пассажиров.

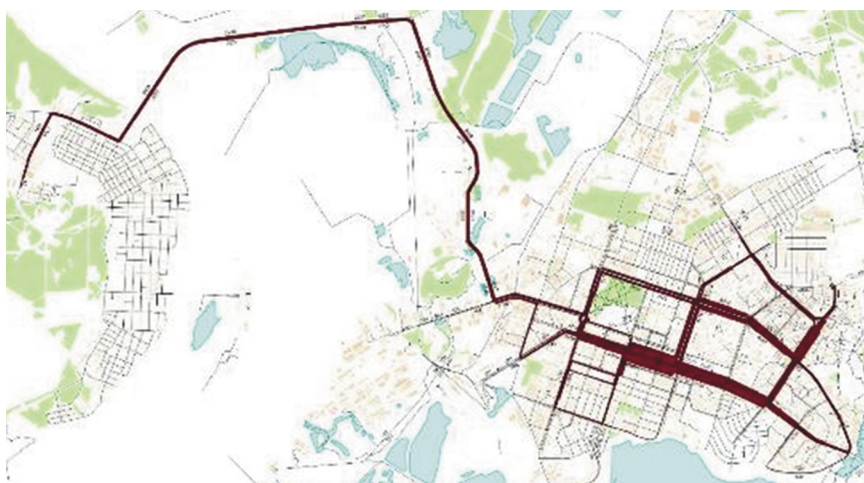


Рис. 2. Картограмма пассажиропотоков на улично-дорожной сети г. Березники



Рис. 3. Картограмма охвата участков улично-дорожной сети маршрутами общественного транспорта

В качестве целевого показателя функционирования транспортной системы крупного города целесообразно рассматривать среднее время реализации транспортных корреспонденций [4, 5], т.е. среднее время, затрачиваемое одним человеком на совершение одной транспортной корреспонденции,

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i,j} t_{ij} x_{ij}}{\sum_{i,j} x_{ij}}, \quad (11)$$

где

$$t_{ij} = \frac{\sum_k t_{kij} x_{kij}}{\sum_k x_{kij}}; \quad (12)$$

$$x_{ij} = \sum_k x_{kij}, \quad (13)$$

где  $x_{ij}$  — элементы матрицы корреспонденций;

$t_{ij}$  — элементы матрицы затрат, рассчитываются как средневзвешенное от нагрузок путей;

$x_{kij}$  — нагрузка пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$ ;

$t_{kij}$  — время пути номер  $k$  из района  $i$  в район  $j$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели качества оптимизированной маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования г. Березники приведены в табл. 1.

Общая схема оптимизированной маршрутной сети г. Березники представлена на рис. 4.

Таблица 1

Показатели качества оптимизированной маршрутной сети городского пассажирского транспорта общего пользования г. Березники

Показатель качества	Значение показателя до оптимизации маршрутной сети	Значение показателя после оптимизации маршрутной сети
Суммарная протяженность маршрутной сети, км	708,2	502,5
Протяженность транспортной сети, км	194,6	208,9
Коэффициент наложения маршрутов	3,6	2,4
Количество регулярных маршрутов	28	21
Среднее время реализации транспортных корреспонденций на ГПТОП, мин	25,21	25,13
Средняя длина поездки, км	4,92	5,02
Суточный пассажиропоток троллейбуса, пасс./сут	16 464	30 964
Суммарный суточный пассажиропоток, пасс./сут	73 136	74 609
Количество пересадок, пасс./сут	8 256	11 544





Рис. 4. Общая схема оптимизированной маршрутной сети г. Березники

В оптимизированной маршрутной сети значительно снизился уровень дублирования — коэффициент наложения маршрутов уменьшился с 3,6 до 2,4. Прежде всего снизился уровень дублирования троллейбусных маршрутов автобусными, что позволило увеличить пассажиропоток на троллейбусных маршрутах с 16464 до 30964 пасс./сут.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Городская инфраструктура, представляя собой совокупность транспортных сетей, является одним из основных факторов, определяющих уровень комфортности жизни и условия успеш-

ного развития экономики города. В ходе исследования был выявлен высокий уровень дублирования автобусных маршрутов и недостаточный пассажиропоток на троллейбусных маршрутах. Сделан вывод о необходимости использования транспорта высокой провозной способности, в частности троллейбуса, а также рекомендовано снизить уровень дублирования маршрутов в центральной части города. Принятые меры будут способствовать снижению количества маршрутов пассажирского транспорта с большой протяженностью и низким пассажиропотоком, что улучшит качество среды проживания в г. Березники, в том числе сократит загрязнение атмосферы.

## Литература

1. Якимов М. Р. Концепция транспортного планирования и организации движения в крупных городах. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2011. 175 с.
2. Якимов М. Р., Трофименко Ю. В. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. Москва : Логос, 2013. 447 с.
3. Desaulniers G., Hickman M. Public Transit // Handbooks in Operation Research and Management Science. 2017. Pp. 69–120.
4. Yakimov M. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // Transportation Research Procedia. Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. Pp. 702–708.
5. Расчет ограничений при открытии маршрутов городского пассажирского транспорта общего пользования : методические рекомендации / Сост. М. Р. Якимов. Москва : Институт транспортного планирования общероссийской общественной организации «Российская академия транспорта», 2016. 36 с.

## References

1. Yakimov M. R. Concept of transport planning and organization of traffic in big cities [Kontseptsiya transportnogo planirovaniya i organizatsii dvizheniya v krupnykh gorodakh]. Perm : Publishing House of Perm National Research Polytechnic University, 2011. 175 p.
2. Yakimov M. R., Trofimenko Yu. V. Transport planning: creation of efficient transport systems of big cities [Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov]. Moscow : Logos, 2013. 447 p.
3. Desaulniers G., Hickman M. Public Transit // Handbooks in Operation Research and Management Science. 2017. Pp. 69–120.
4. Yakimov M. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // Transportation Research Procedia. Vol. 20: 12th International Conference Organization and Traffic Safety Management in large cities, SPbOTSIC-2016, 28–30 September 2016, St. Petersburg. St. Petersburg, 2017. Pp. 702–708.
5. Calculation of restrictions at opening of routes of public city passenger transport [Raschet ogranicheniy pri otkrytii marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta obshhego pol'zovaniya] : guidelines / M. R. Yakimov. Moscow : Institute of Transport Planning of the Russian Academy of Transport, 2016. 36 p.

УДК 625.1

Борис Викторович Рожкин, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,  
Елена Юриевна Бишлер, аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ РЕЛЬСОВ

Boris Viktorovich Rozhkin, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,  
Elena Yurievna Bishler, postgraduate student, Railway Construction and Railway Track Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Modeling the intensity of electrochemical corrosion of rails

#### Аннотация

Повышение весовой нормы грузовых составов приводит к увеличению значений прямых и обратных тяговых токов в системе тягового электроснабжения. Рельсы, обеспечивающие канализацию обратного тягового тока в системе электрификации на постоянном токе, подвержены электрокоррозии, интенсивность которой увеличивается при возрастании тяговых токов. Цель данной работы разработать аналитическую модель, которая позволит дать численную оценку потерям металла с подошвы рельса при различных режимах движения электроподвижного состава и разном состоянии изоляции рельсовой линии.

**Ключевые слова:** электрокоррозия, 69-й дефект рельса, линейная плотность тока, потенциал «рельс — земля».

#### Summary

An increase of train load limits leads to a growth of values of straight and reverse traction currents in traction power supply system. Rails that provide channelling of reverse traction current in direct current power supply system are exposed to electrocorrosion, an intensity of which increases at the growth of traction currents. The aim of the work is to develop an analytical model that will provide a numerical assessment of metal losses from rail base at various modes of electric rolling stock operation and different condition of rail line isolation.

**Keywords:** electrocorrosion, 69th rail flaw, linear current density, «rail — earth» potential.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-22-26

#### ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистическим данным дирекции инфраструктуры одной из железных дорог, за 2019 и 2020 гг. зафиксирован рост количества изломов рельсов по дефекту 69 (электрокоррозия подошвы рельса) с единичных до десятков случаев. Пока однозначного объяснения причин такого повышения не найдено: выдвигаются гипотезы о негативном воздействии токов рекуперативного торможения, изменяющейся динамики поездов увеличенной массы, типов рельсовых скреплений и изолирующих подкладок. В статье исследуется влияние значений и направлений протекания обратного тягового тока на интенсивность потерь металла с подошвы рельса при различных значениях переходного сопротивления «рельс — земля».

#### ЭЛЕКТРОКОРРОЗИЯ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрокоррозия металла в целом и рельсов в частности обусловлена ионной проводимостью на границе раздела сред «металл — грунт» в результате электрохимического разрушения при наличии электролитов — конденсата, дождевой воды, растворов солей и т.д. В соответствии с законом Фарадея [1, с. 93] потери железа от электрохимической коррозии — это константная величина, равная 9,1 кг/(А·год). Поскольку плотность железа также константная величина (7874 кг/м<sup>3</sup>), то и его объемные потери от электрохимической коррозии являются константной величиной, равной 1,156·10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>/(А·год). Обозначим эту величину как коэффициент коррозии  $K_k$ :

$$K_k = 1,156 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{год}). \quad (1)$$

Потерю металла с подошвы рельса вследствие электрохимической коррозии, обусловленной стеканием обратного тягового тока с рельсов в землю в анодной зоне, найдем из выражения

$$H_k = I_{\text{пов}} \cdot K_k, \quad (2)$$

где  $H_k$  — толщина потерянного металла, м/год;  
 $I_{\text{пов}}$  — поверхностная плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

Поверхностная плотность тока может быть определена как линейная плотность стекания обратного тягового тока, деленная на ширину подошвы рельса. Ширина подошвы — это стандартизированная величина, зависящая от типа рельса. Линейная плотность стекания обратного тягового тока определена отношением потенциала «рельс — земля» к переходному сопротивлению «рельс — земля». Тогда поверхностную плотность тока получим из выражения

$$I_{\text{пов}} = U_{p-3} / (R_{\text{и}} \cdot b), \quad (3)$$

где  $U_{p-3}$  — напряжение рельса относительно земли, В;

$R_{\text{и}}$  — удельное сопротивление перехода «рельс — земля», Ом·км;

$b$  — ширина подошвы рельса, м.

Таким образом, задача оценки интенсивности электрохимической коррозии рельсов сводится к определению толщины слоя потерянного металла с подошвы рельса при различных значениях напряжения «рельс — земля» и значениях удельного сопротивления изоляции рельсов относительно земли. Переходное сопротивление «рельс — земля», согласно нормам содержания двухниточных рельсовых цепей, должно быть не менее 1 Ом·км, тогда примем нижнюю границу сопротивления перехода «рельс — земля» 0,5 Ом·км.

С другой стороны, изоляция рельсов относительно земли обеспечивается рельсовыми прокладками из изолирующего материала и другими изолирующими элементами (изолирующий уголок под пружинную клемму у скрепления АРС). Прокладка ЦП-204, согласно ГОСТ Р 56291-2014, должна обеспечивать удельное объемное сопротивление  $10^9$  Ом·см, при толщине прокладки 1,4 см ее электрическое сопротивление должно быть не ниже 714 МОм. В идеальных условиях (без учета загрязнения балласта) при 2 тыс. шпал на 1 км бесстыкового пути переходное сопротивление «рельс — земля» составит 370,5 кОм·км — это верхняя численная оценка сопротивления изоляции рельсов относительно земли.

Таким образом, установлен диапазон изменения переходного сопротивления «рельс — земля» для определения линейной плотности тока. Необходимо отметить, что для решаемой исследовательской задачи важно учесть дискретный характер распределения переходного сопротивления вдоль пути. Данное условие не позволяет использовать аналитические выражения, приведенные в [1], для определения интенсивности потери металла с подошвы рельсов, так как в них предполагается непрерывность распределения переходного сопротивления вдоль пути, т.е. путь необходимо рассматривать как рельсы, лежащие на земле, что не соответствует действительности. Поэтому для решения задачи исследования применяется метод конечноэлементного моделирования, в котором функция переходного сопротивления может иметь дискретный характер, а сходимость численного решения дифференциального уравнения распределения потенциалов обеспечивается подбором оптимального размера сетки.

## КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

Конечноэлементная модель распределения потенциалов «рельс — земля» вдоль рельсовой линии подробно представлена в работах [2, 3], поэтому приведем лишь основные ее положения.

Линейное распределение тока и потенциала вдоль рельсовой линии для системы электроснабжения определяется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{d\varphi(x)}{dx} = (R + j\omega L)i(x) \\ -\frac{di(x)}{dx} = (G + j\omega C)\varphi(x), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varphi(x)$  — значение потенциала рельса относительно земли, В;

$i(x)$  — значение тока в рельсовой линии, А;

$x$  — текущая координата расчетной точки, м;

$\omega$  — угловая частота, рад/с;

$j$  — мнимая единица;

$R$  — удельное активное сопротивление рельсовой линии, Ом/км;

$L$  — удельная индуктивность рельсовой линии, Гн/км;

$C$  — удельная емкость рельсовой линии, Ф/км;

$G$  — удельная проводимость изоляции рельсовой линии относительно земли, См/км. Традиционно в расчетах вместо удельной проводимости рельсовой линии используют обратную величину — удельное сопротивление перехода «рельс — земля»  $R_{\text{и}}$ , Ом/км, для краткости называемое сопротивлением балласта.

Решая выражение (4) относительно потенциала «рельс — земля» и учитывая, что рассматриваются участки с электротягой постоянного тока, так как переменный ток не создает условий для электрокоррозии рельсов, получим выражение для распределения потенциалов вдоль рельсовой линии:

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} - \frac{R \cdot \varphi(x)}{R_{\text{и}}} = 0. \quad (5)$$

Системы конечноэлементного моделирования выполняют численное решение дифференциальных уравнений в частных производных, поэтому перепишем выражение (4) в частных производных по одному измерению:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} V - \alpha V = \Delta V - \alpha V = \nabla^2 V - \alpha V = \nabla \cdot (\nabla V) - \alpha V = 0, \quad (6)$$

где  $V$  — потенциальное поле рельсовой линии;

$\alpha$  — постоянная распределения рельсовой линии, равная  $R/R_{\text{и}}$ ;

$\nabla \cdot (\nabla V) = \nabla^2 V$  — оператор Лапласа  $\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) V$ ;

$\nabla$  — оператор Набла  $\left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ;

$\nabla \cdot (\nabla V) = \text{Div}(\text{grad } V)$ .

Конечноэлементное моделирование выполнялось в среде ComsolMultyphysics, которая позволяет описать физику моделируемого процесса различными способами. В данной работе использован интерфейс Coefficient From Boundary PDE, который покрывает множество хорошо известных дифференциальных уравнений в частных производных. В общем виде уравнение выглядит следующим образом:

$$e_a \frac{d^2 V}{dt^2} + d_a \frac{dV}{dt} + \nabla \cdot (-c \nabla V - \alpha V + \gamma) + \beta \cdot \nabla V + rV = f. \quad (7)$$

Для того чтобы выражение (5) можно было использовать для решаемой задачи анализа распределения потенциалов «рельс — земля», нужно в среде моделирования приравнять к нулю ряд коэффициентов, а именно  $e_a$ ,  $d_a$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Тогда уравнение, решаемое средой конечноэлементного моделирования, примет вид

$$-c \nabla \cdot (\nabla V) + rV = f. \quad (8)$$

Разделив левую часть уравнения на  $-c$ , приведем его к искомому виду (4):

$$\nabla \cdot (\nabla V) - \frac{rV}{c} = f, \quad (9)$$

где  $R$  — удельное сопротивление рельсов, Ом/км;

$c$  — удельное сопротивление рельсовой линии относительно земли, Ом/км;

$f$  — в терминах среды моделирования это источник (Source Term), в рамках решаемой задачи — это значение независимой величины (плотности тока, втекающего в рельсы, при наличии на расчетном участке электроподвижной единицы) или ноль (если ее на этом участке нет).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

В рамках исследования необходимо ответить на ряд вопросов: как рекуперативное торможение влияет на изменение интенсивности коррозии;

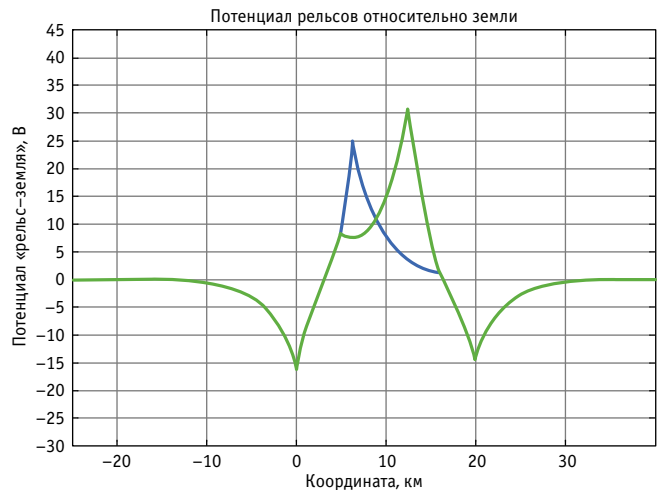
как изменяется интенсивность коррозии при повреждении изоляции в одном рельсовом скреплении.

### Оценка влияния рекуперативного торможения на интенсивность электрохимической коррозии

Как показано в [1, 4], необходимое условие для возникновения электрохимической коррозии — наличие положительного потенциала рельсов относительно земли. Знак потенциала рельса определяется направлением протекания тока в переходе «рельс — земля». Рекуперативное торможение изменяет направление протекания тока, поэтому необходимо исследовать, как изменится расположение анодных и катодных зон в данном случае.

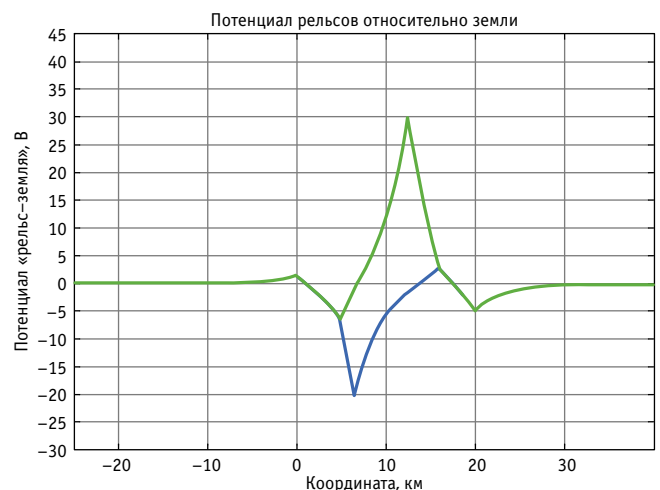
Для этого смоделируем встречное движение двух поездов по двухпутному участку (рис. 1). Максимальные положительные отметки на графике распределения потенциалов рельсов — это мгновенное расположение электровозов, минимальные значения — места расположения отсосов тяго-

вых подстанций. Как видно из рис. 1, при движении в режиме тяги электровозы создают вокруг себя анодную зону, в которой существуют условия для электрохимической коррозии.



**Рис. 1. Мгновенное значение потенциала «рельс — земля» без рекуперации:**  
— четный путь, тяга; — нечетный путь, тяга

На рис. 2 показан момент, когда состав,двигающийся по четному пути перегона, начинает применять рекуперативное торможение: в месте его расположения потенциал рельсов становится отрицательным по отношению к земле, т.е. рекуперирующий электровоз создает вокруг себя катодную зону, исключая условия для протекания электрохимической коррозии рельсов.



**Рис. 2. Мгновенное значение потенциала «рельс — земля» при рекуперации:**  
— четный путь, рекуперация; — нечетный путь, тяга

Таким образом, по результатам моделирования справедливо заключить, что в режиме рекуперации электровоз играет роль катодной защиты и препятствует протеканию коррозионных процессов на подошве рельса.

## Влияние локального пробоя изоляции скрепления на интенсивность электрохимической коррозии

Известно, что:

изоляция рельсов обеспечивается изоляционными подкладками между рельсом и шпалой, а также возвышением рельса над уровнем балласта;

основной путь стекания обратного тягового тока с рельса в землю проходит через изоляцию рельса в месте прилегания к шпале [5];

по дефекту 69 места прилегания рельса к соседним шпалам нередко не имеют видимых очагов коррозионных повреждений; коррозионное повреждение подошвы рельса зачастую не выявляется периодическими дефектоскопическими обследованиями пути в рамках текущей технологии обслуживания.

Поэтому необходимо оценить, как локальное повреждение изоляции в одном скреплении изменяет интенсивность точечной электрохимической коррозии, поскольку есть гипотеза, что текущий интервал неразрушающего контроля целостности рельсов для высоконагруженных участков с тяжеловесным движением требует сокращения.

Интенсивность электрохимической коррозии, выраженная в толщине потерянного металла, прямо пропорциональна поверхностной плотности тока, стекающего с рельсов в землю. Так как стоит задача определить потери металла при пробое изоляции одного скрепления, то удельное сопротивление «рельс — земля» уже не может быть константой, а должно быть функциональной зависимостью, и соответственно выражение (9) примет вид

$$\nabla \cdot (\nabla V) - \frac{rV}{c(x)} = f, \quad (10)$$

где  $c(x)$  — функция распределения переходного сопротивления «рельс — земля».

В рамках исследования выполнено моделирование однократного прохода поезда с постоянным потреблением 1 кА по участку, на котором одно рельсовое скрепление имеет сниженное в 10 раз переходное сопротивление «рельс — земля». На рис. 3 и 4 соответственно показано, как изменяются линейная плотность тока и скорость потери металла в скреплении с поврежденной и неповрежденной изоляцией.

Согласно выражениям (2) и (3), линейная плотность тока и толщина потерянного слоя металла связаны линейной зависимостью, что объясняет идентичность форм кривых на графиках.

Суммарная потеря металла определяется как интеграл скорости по времени или площадью под кривыми (см. рис. 4). Численные оценки потерянного металла составили  $7,9622 \cdot 10^{-8}$  м в поврежденном и  $7,9621 \cdot 10^{-9}$  м в неповрежденном скреплении. При совместном анализе выражений (2)–(4) несложно увидеть наличие линейной зависимости потерь металла от значений тока, потребляемого локомотивом. Совместное решение данных уравнений для реального участка железной дороги затруднено в силу неоднородности рельсовой линии, поэтому наиболее применимым с практической точки зрения остается моделирование с последующим выводом приближенных эмпирических расчетных формул и исследованием их ошибок.

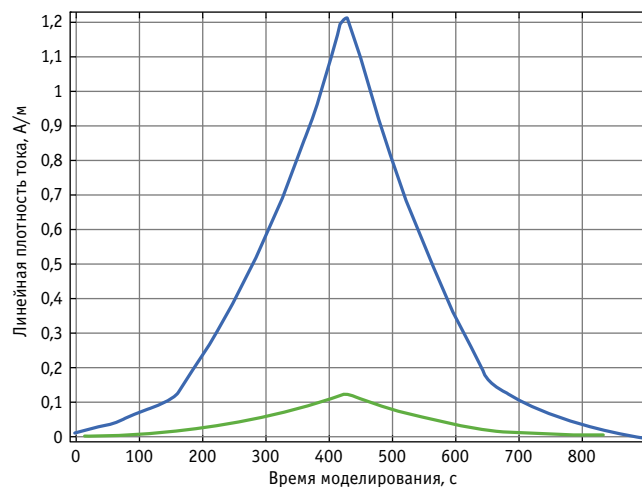


Рис. 3. Изменение линейной плотности тока:

— сниженная в 10 раз изоляция;  
— нормальная изоляция 350 Ом/скрепление

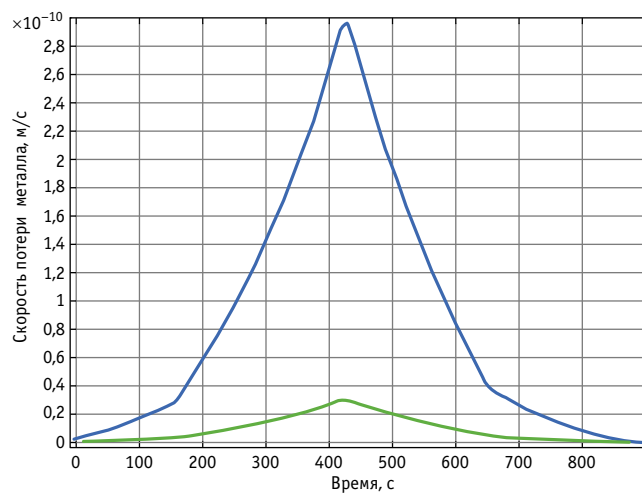


Рис. 4. Изменение скорости потери металла:

— сниженная в 10 раз изоляция;  
— нормальная изоляция 350 Ом/скрепление

Для проверки высказанной ранее гипотезы предположим, что по рассмотренному в модели участку в сутки проходит 100 пар поездов со средним значением потребляемого тока 1 кА. Допустим, что излом рельса по дефекту 69 происходит при средней толщине потерянного металла 2 мм. С учетом объема движения поездов для потери 2 мм металла в скреплении с поврежденной изоляцией потребуется 503 дня, или примерно 1,3 года. Таким образом, гипотеза о быстром развитии повреждения подошвы рельса электрохимической коррозией при указанных факторах не находит своего подтверждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье на основе использования конечноэлементной модели неоднородной рельсовой линии предложен способ численной оценки потери металла с подошвы рельса в скреплении

с пониженной изоляцией, позволяющий получить распределение потенциалов и токов вдоль линии с учетом локальных неоднородностей. Отвергнута гипотеза о быстром развитии повреждения подошвы рельса при константном сопротивлении перехода «рельс — земля». С другой стороны, в случае протекающего процесса электрохимической коррозии сопротивление перехода «рельс — земля» может снижаться вследствие насыщения электролита ионами железа в пятне контакта «рельс — подкладка». Поэтому процесс изменения скорости

электрохимической коррозии подошвы рельса требует дальнейшего изучения.

Показано, что в режиме рекуперативного торможения электроподвижная единица играет роль катодной защиты — снижает потенциал рельсов относительно земли, тем самым прекращая процесс электрохимической коррозии.

Установлена линейная зависимость скорости потери металла с подошвы рельса от тока, потребляемого локомотивом, и переходного сопротивления «рельс — земля».

## Литература

1. Защита подземных металлических сооружений от коррозии / И. В. Стрижевский, А. Д. Белоголовский, В. И. Дмитриев, Н. А. Петров. Москва : Стройиздат, 1990. 303 с.
2. Рожкин Б. В., Паранин А. В. Анализ условий работы рельсовой линии на основе моделирования растекания обратного тягового тока // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34. ISSN 1815–9400.
3. Лесников Д. В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
4. Никольский К. К. Защита от коррозии подземных металлических сооружений связи. Москва : Радио и связь, 1991. 263 с.
5. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 312 с.

## References

1. Protection of underground metal constructions from corrosion [Zashhita podzemnykh metallicheskh sooruzheniy ot korrozii] / I. V. Strizhevskiy, A. D. Belogolovskiy, V. I. Dmitriev, N. A. Petrov. Moscow : Stroyizdat, 1990. 303 p.
2. Rozhkin B. V., Paranin A. V. Analysis of rail track operation conditions on the basis of modeling return traction current spreading [Analiz usloviy raboty rel'sovoy linii na osnove modelirovaniya rastekaniya obratnogo tyagovogo toka] // Transport of the Urals. 2018. No. 4 (59). Pp. 28–34. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-28-34. ISSN 1815–9400.
3. Lesnikov D. V. Improvement of the method of the calculation of extended grounders in the stations of a constant current [Sovershenstvovanie metodiki rascheta protyazhennykh zazemlitateley na uchastkakh postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2017. No. 1 (52). Pp. 71–76. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-1-71-76. ISSN 1815–9400.
4. Nikolskiy K. K. Protection from corrosion of underground metal communication facilities [Zashhita ot korrozii podzemnykh metallicheskh sooruzheniy svyazi]. Moscow : Radio and communication, 1991. 263 p.
5. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rail circuits: theoretical basics and operation [Rel'sovye tsepi: teoriticheskie osnovy i ekspluatatsiya] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 312 p.

Объем статьи 0,5 авторских листа



УДК 629.421.1

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Виктор Степанович Наговицын, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Комплексные системы безопасности» Уральского отделения АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (УО АО «ВНИИЖТ»), Екатеринбург, Россия,

Игорь Александрович Иванов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Дмитрий Павлович Кононов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Viktor Stepanovich Nagovitsyn, DSc in Engineering, Chief Research Scientist, Laboratory «Complex Safety Systems», Ural branch of JSC VNIIZhT, Ekaterinburg, Russia,

Igor Alexandrovich Ivanov, DSc in Engineering, Professor, Metal Technology Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Dmitriy Pavlovich Kononov, DSc in Engineering, Professor, Metal Technology Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia

### Automatic system for monitoring parameters of railway rolling stock wheelsets

#### Аннотация

Рассмотрены принципы функционирования разработанной авторским коллективом автоматической измерительной системы для мониторинга состояния контроля колесных пар железнодорожного подвижного состава. Приведено описание системы и аппаратной реализации приборов, интегрируемых в ее состав.

**Ключевые слова:** подвижной состав, колесная пара, параметры, прибор, программный комплекс, мониторинг, автоматическая система.

#### Summary

The paper considers operating principles of an automatic measuring system for monitoring the control condition of railway rolling stock wheelsets developed by the team of authors. The paper also presents the description of the system and the hardware implementation of devices integrated in its composition.

**Keywords:** rolling stock, wheelset, parameters, device, program complex, monitoring, automatic system.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-27-34

Устойчивая бесперебойная работа железных дорог неразрывно связана с состоянием подвижного состава (ПС), совершенствованием его эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, что определяется состоянием локомотивного и вагонного хозяйства [1].

Согласно направлению «Цифровые технологии» нацпроекта «Цифровая экономика РФ» в настоящее время на сети железных дорог России внедряется комплекс многоцелевых информационных технологий [2], обеспечивающих мониторинг технического состояния ходовых частей подвижного состава. Особую базу составят результаты мониторинга состояния колесных пар с применением систем обратной связи в масштабе реального времени [2].

В рамках автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ), в состав которой входят функциональные подсистемы, авторами создана автоматическая система мониторинга параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава (АСПК) (рис. 1) [2].

Наиболее рационален комбинированный способ реализации разработанной системы, когда часть функций выполняется аппаратно, а часть — программно. При этом желательно увеличивать долю программной реализации, поскольку в конечном счете это снижает затраты на проведение мониторинга.

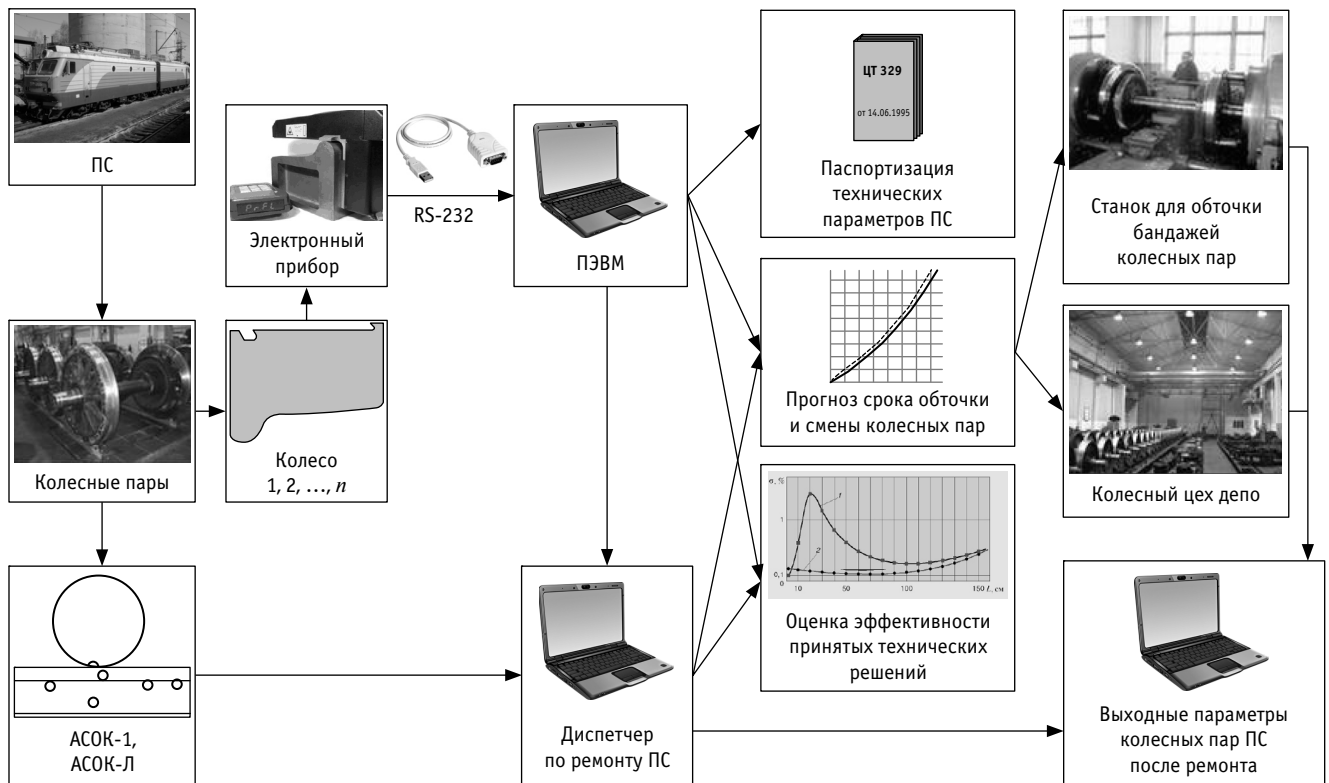


Рис. 1. Схема АСПК

В настоящее время для контроля износа колесных пар локомотивов, вагонов и моторвагонного подвижного состава в сервисных локомотивных депо, ремонтных вагонных и моторвагонных депо железных дорог Российской Федерации используются механические приспособления [2], такие как шаблоны, скобы и ряд других [2]. Например, прокат, образующийся в результате износа колеса на поверхности катания, измеряют универсальным (или абсолютным) шаблоном, который прижимают рукой к внутренней грани цельнокатаного или составного колеса, а их выступ — к вершине гребня колеса. Движок, который устанавливают на расстоянии 65 или 70 мм (в соответствии с типом ПС) от внутренней грани (в зависимости от ширины колеса или бандажа равен 130 или 140 мм), перемещают до контакта с поверхностью катания колеса. При этом на шкале шаблона отображается значение проката по кругу катания колеса. Как показала практика, замеры, сделанные шаблоном, не всегда точны и в отдельных случаях дают большую погрешность измерений.

Для повышения точности измерения необходимо заменить шаблон электронным малогабаритным измерительным устройством. Такой прибор, разработанный в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) совместно с Уральским федеральным университетом (УрФУ), предназначен для измерения проката и толщины гребня, проведения допускового контроля и разбраковки колес при техническом обслуживании ПС. Эти параметры можно измерять непосредственно под единицей ПС, без выкатки колесных пар, в условиях депо, станции или на перегоне [3].

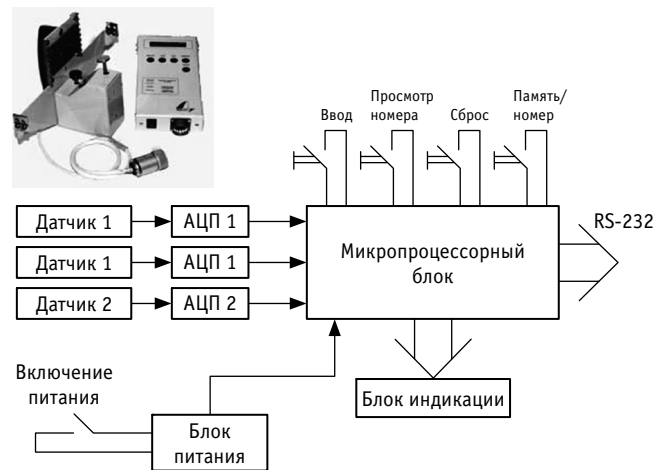


Рис. 2. Принципиальная схема прибора КИП-02

Прибор КИП (комплексное измерение параметров) массой 1,2 кг имеет габариты 220×140×147 мм (рис. 2), состоит из измерительной скобы и вычислителя. Измерительная скоба оборудована датчиками. С помощью вычислителя производится обработка и индикация значений контролируемых параметров непосредственно на месте проведения замеров колесных пар ПС [4, 5]. В корпусе вычислителя размещен аккумулятор. Все данные хранятся во внутренней памяти прибора, их в любое время можно оперативно просмотреть на блоке индикации. Алгоритм работы КИП-02 показан на рис. 3.

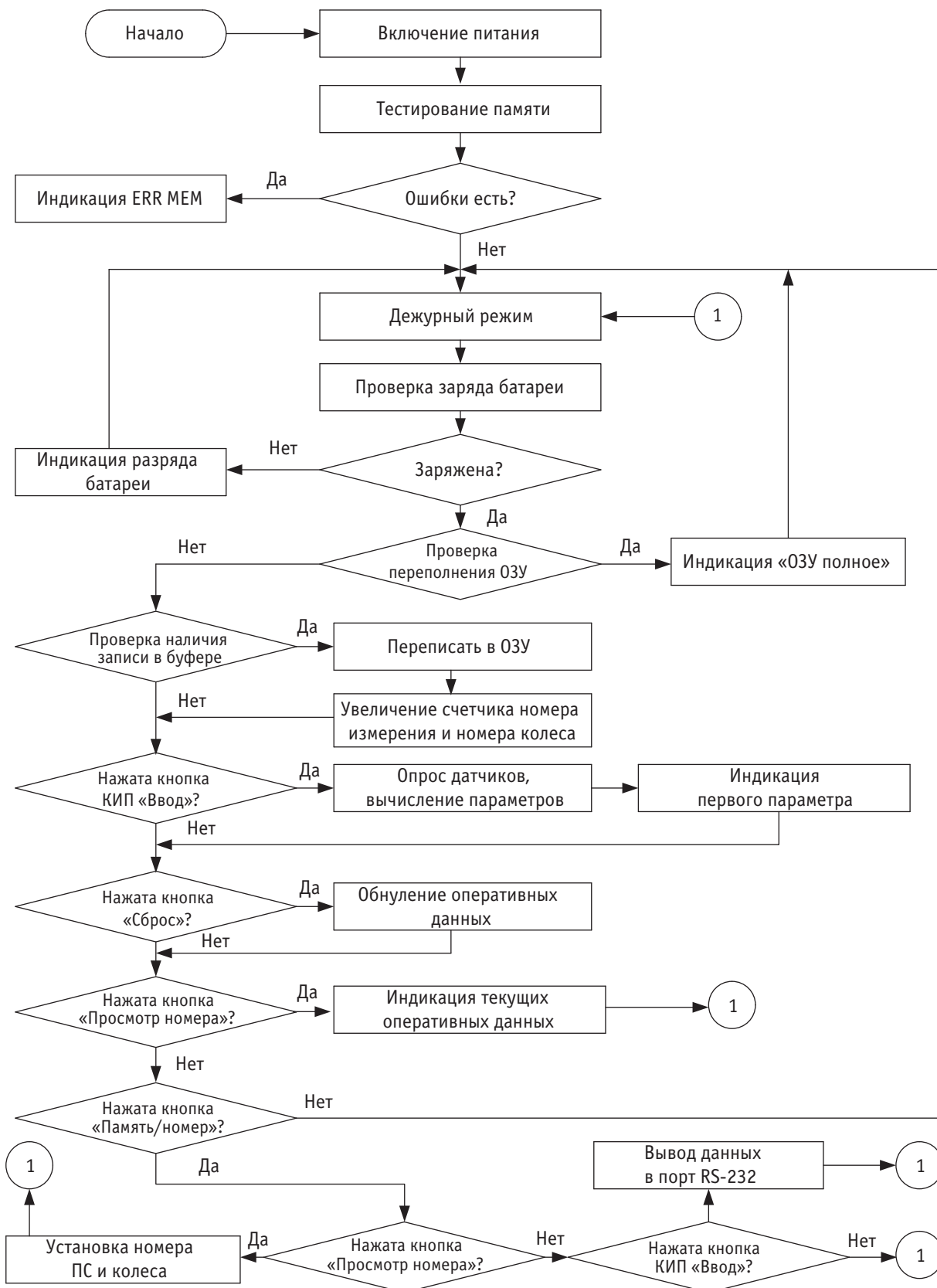


Рис. 3. Алгоритм работы КИП-02

Получаемые тремя датчиками цифровые относительные единицы преобразуются в миллиметровые значения проката и толщины гребня колесной пары ПС. Соединение прибора с ПК осуществляется по Bluetooth или через порт RS-232. Конструкция КИП позволяет использовать его в широком диапазоне температур, время измерения составляет не более 0,5 с, погрешность измерения  $\pm 0,2$  мм.

При выполнении измерений датчик проката должен располагаться на расстоянии 65 или 70 мм от торца обода колеса (рис. 4).

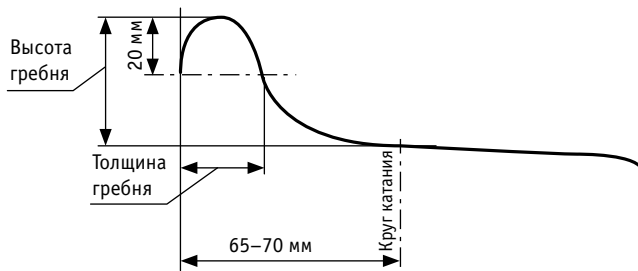


Рис. 4. Измерение проката

Для измерения толщины гребня за базовые размеры приняты значения, приведенные на рис. 5.

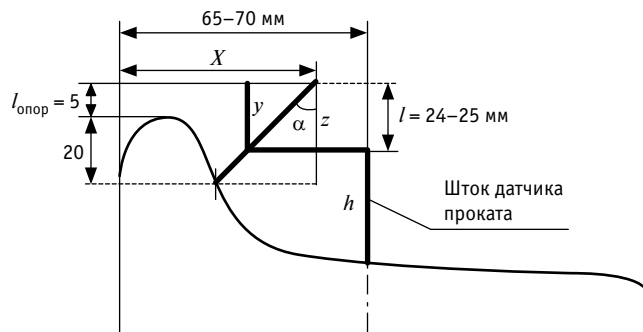


Рис. 5. Измерение толщины гребня:

$X$  — смещение одной опоры прибора относительно другой, мм;  
 $y$  — длина «угломерного крюка», мм;  $l_{\text{опор}}$  — длина опоры прибора КИП, мм;  
 $l$  — расстояние, на которое перемещается шток прибора КИП, мм;  
 $h$  — длина штока датчика проката, мм

Толщина гребня колеса ПС определяется по выражению, мм:

$$T_{\text{гр}} = X - y \cdot \sin \alpha. \quad (1)$$

Величина проката колеса ПС, мм:

$$\text{Пр} = (l - l_{\text{опор}}) + h - 30. \quad (2)$$

Оценка погрешности измерения толщины гребня:

$$\Delta h_{\text{гр}} = (X/2) \operatorname{tg} \beta, \quad (3)$$

где  $X/2$  — смещение датчика относительно торца гребня,  $X/2 = y$ ;

$\beta$  — угол по кругу катания в точке, в которой выполняется измерение проката,  $\beta = 1^\circ 25' 56''$  (по ГОСТ 33783–2016).

Результаты сведены в табл. 1, из которой следует, что поперечное смещение датчика относительно торца обода колеса ПС незначительно влияет на точность измерения толщины гребня [6].

Таблица 1

Результаты определения оценки погрешности измерения, мм

$X$	$\Delta h_{\text{гр}}$
0,25	0,0026
0,50	0,0054
1,0	0,0101
1,5	0,0162
2,0	0,0218

Использование разработанного прибора КИП позволило оперативно и с высокой точностью производить замеры проката и толщины гребня, но полной автоматизации достигнуто не было, так как результаты измерений следовало записывать в журнал, а затем вручную производить необходимые расчеты [4, 6]. Поэтому встала задача по созданию программного комплекса для обработки данных замеров и электронного паспорта колесной пары.

На основе имеющихся наработок была создана программа «Автоматическое рабочее место». Теперь в конце смены оператор подключает прибор по Bluetooth или специальным кабелем к компьютеру, на котором установлен программный комплекс «АРМ ТПЗ» (рис. 6) [6], и передает их для анализа и обработки в ПЭВМ.

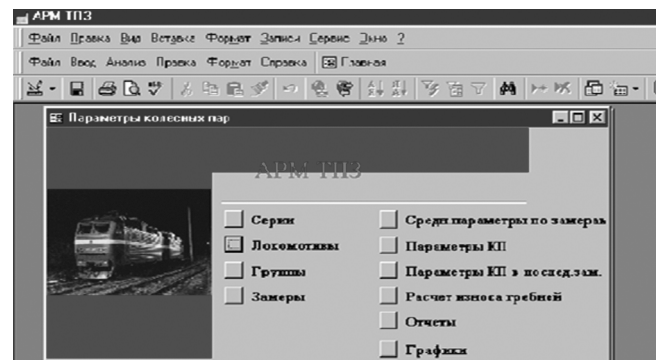


Рис. 6. Главное окно АРМ ТПЗ

Программный комплекс «АРМ ТПЗ» выполняет:  
ввод новых данных по Bluetooth или RS-232 от КИП или вручную с клавиатуры;  
предварительный просмотр и при необходимости корректировку статистических данных [7];  
расчет средних значений параметров и интенсивности износа гребней колес на 10 тыс. км для заданных единиц железнодорожного подвижного состава за выбранный период;  
построение графиков;

формирование, просмотр и печать различных отчетов с результатами замеров для выбранных единиц железнодорожного подвижного состава.

Программный комплекс работает в среде Windows, создан в программе Microsoft Access пакета Microsoft Office.

Просмотр и редактирование информации о сериях железнодорожного подвижного состава осуществляется в форме «Серии» (рис. 7) [6], которая открывается кнопкой «Серии» на главном окне (см. рис. 6).

Формирование групп единиц железнодорожного подвижного состава (рис. 8) осуществляется следующим образом: группы ПС объединяются по произвольно выбранному признаку и используются при создании отчетов и расчете необходимых параметров. Например, в одной группе можно объединять локомотивы с асинхронным приводом, в другой — с коллекторными тяговыми двигателями, а в дальнейшем составлять любые отчеты, рассчитывать любые параметры отдельно по этим группам [6].

С помощью кнопки «Графики» на главном окне открывается форма «Графики параметров» (рис. 9). Здесь можно проследить изменение зависимостей контролируемых параметров [6] от времени (или пробега).

Выбор любого параметра, значения, категории, периода и интервала графика осуществляется в форме, вызываемой нажатием кнопки «Выбор графика» (рис. 10).

Форма «Расчет износа гребней» (рис. 11) позволяет вычислить интенсивность износа гребней для заданного типа (вида или группы) ПС за указанный оператором период времени. В поле «Сфера охвата» необходимо выбрать группу, серию или номер ПС, для которого будет производиться расчет. Также можно сделать вычисления для всего парка любого типа подвижного состава, который заложен в базу данных [6, 8]. Есть возможность рассмотреть весь период, месяц или конкретный временной промежуток. Для составления отчета необходимо открыть соответствующую форму (рис. 12 и 13), при этом отчет можно просмотреть и вывести на печать.

Принцип построения модулей программного комплекса следующий: Microsoft Access объединяет сведения из разных источников в одной центральной базе данных. Создаваемые оператором формы, запросы и отчеты [6, 9] позволяют оперативно обновлять полученные или введенные вручную данные, анализировать их, строить любые зависимости введенных параметров от наработки и др. (рис. 14).

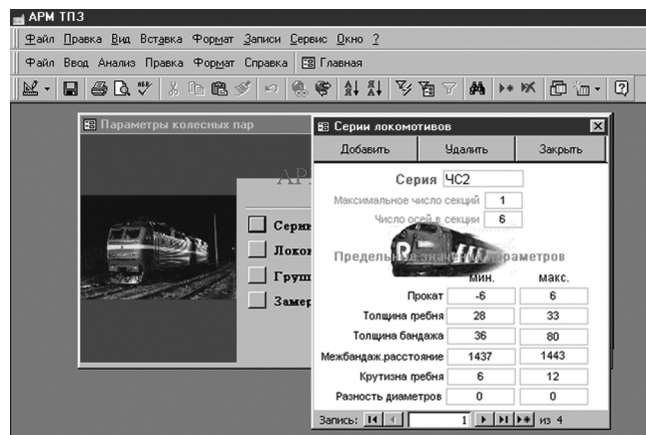


Рис. 7. Форма «Серии»

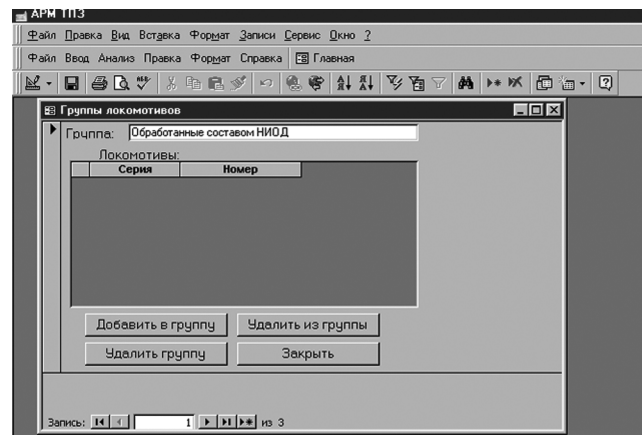


Рис. 8. Окно «Группы»

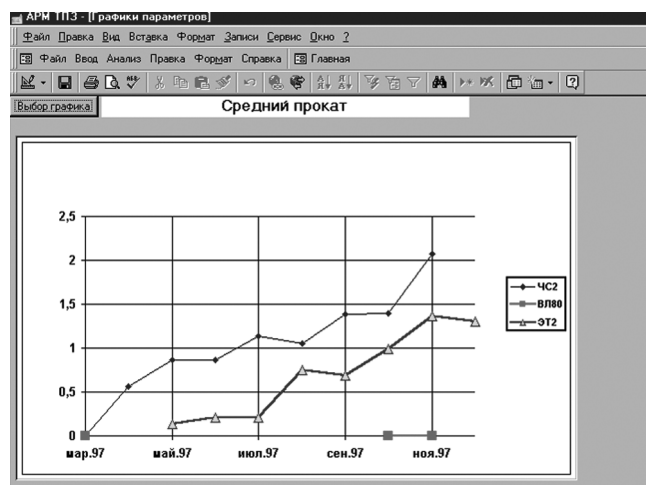


Рис. 9. Форма «Графики параметров»

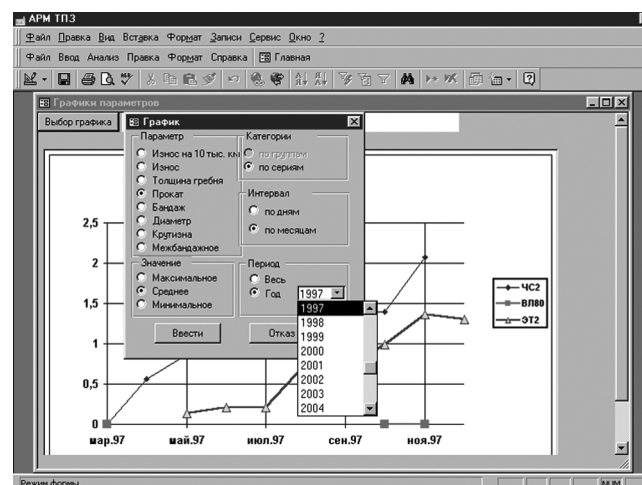


Рис. 10. Окно «Выбор графика»

Рис. 11. Форма «Расчет износа гребней»

Рис. 12. Окно «Отчеты»

Серия	январь	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
ЧС2		0,00	0,00	0,12	0,29	0,22	0,20	0,27	0,14	0,06		
ЭР2		0,00	0,00	0,38	0,47	0,42	0,11	0,20	0,28	0,23		
ЭТ2		0,00	0,00	0,26	0,72	0,35	0,12	0,34	0,11	0,20		

Рис. 13. Окно «Отчет об износе гребней»

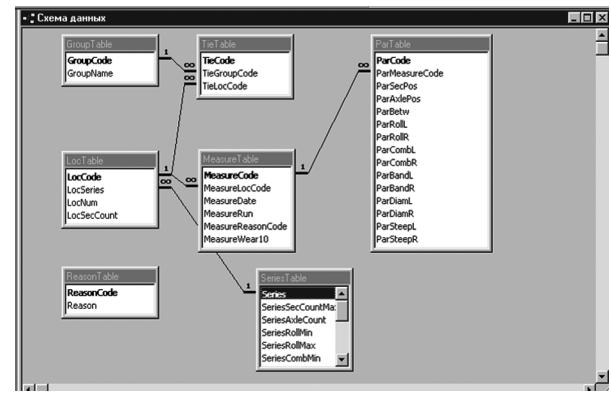


Рис. 14. Схема данных

В базе данных статистика из каждого источника сохраняется в отдельной таблице. При работе с несколькими таблицами между ними устанавливаются обязательные или необязательные связи (см. рис. 14). Это необходимо для того, чтобы сформировать базу данных компактнее и исключить повторение одинаковых данных в разных таблицах. Например, между конкретным номером единицы ПС и замерами его колесных пар установлена связь «один ко многим» [6, 10], так как колесной паре с одним и тем же номером может соответствовать несколько замеров.

В программном комплексе «АРМ ТПЗ» имеется 3 запроса. В запросе «query Measure» производится сбор данных о ПС, его номере, датах замеров (и соответствующих датам значениях пробегов) [6, 11]. Выполняется также расчет износа гребней на 10 тыс. км:

$$I_{гр} = \left[ \sum_{i=1}^k (T_{гр1_i} - T_{гр2_i}) \right] \cdot \frac{1}{n} \cdot 10000 \cdot \frac{1}{P_2 - P_1}, \quad (4)$$

где  $T_{гр1}$  и  $T_{гр2}$  — значения толщины гребня на предыдущем и текущем замерах соответственно, мм;

$n$  — число колес;

$P_1$  и  $P_2$  — пробеги единицы ПС на дату предыдущего и текущего замеров соответственно, км.

Для примера рассмотрим колесные пары электровоза ЭП2К № 401. Данные о замерах были получены 05.05.2019 г. и 04.07.2019 г. На первую дату пробег принят равным 0 км, замеры толщины гребня приведены в табл. 2. На дату второго замера пробег составил 23425 км, результаты — в табл. 3.

Итак, известны пробеги каждой единицы ПС и замеры толщины гребня. Число колес локомотива ЭП2К равно 12 (6 осей). Подставив эти данные в формулу (4), получим, мм:

$$\begin{aligned} I_{гр} = & [(29,2 - 27,7) + (22,5 - 22,5) + \\ & + (28,5 - 27,9) + (30,3 - 27,8) + \\ & + (22,5 - 22,5) + (30,2 - 28,4) + \\ & + (28,8 - 27,1) + (22,1 - 22,1) + \\ & + (27,4 - 26,2) + (31,2 - 29,7) + \\ & + (22,4 - 22,4) + (31,2 - 30,6)] \times \\ & \times \frac{1}{12} \cdot 10000 / (23425 - 0) = 0,213. \end{aligned}$$

По запросу «query Pair» производится сбор сведений о номере и серии, единице ПС, дате замера и контролируемых параметрах (прокате, диаметре, межбандажном расстоянии, толщине бандажа/обода и гребня, крутизне гребня) каждого колеса каждой колесной пары каждой единицы ПС [6].

Таблица 2

Замеры толщины гребня колес ЭП2К № 401,  
выполненные 05.05.2019 г., мм

Параметр	Номер колесной пары					
	1	2	3	4	5	6
Толщина гребня левого колеса	29,2	22,5	28,5	30,3	22,5	30,2
Толщина гребня правого колеса	28,8	22,1	27,4	31,2	22,4	31,2

Таблица 3

Замеры толщины гребня колес ЭП2К № 401,  
выполненные 04.07.2019 г., мм

Параметр	Номер колесной пары					
	1	2	3	4	5	6
Толщина гребня левого колеса	27,7	22,5	27,9	27,8	22,5	28,4
Толщина гребня правого колеса	27,1	22,1	26,2	29,7	22,4	30,6

По запросу «query Pair Last» производится сбор тех же сведений, что и по запросу «query Pair», но только относительно последнего (по дате) замера каждой единицы ПС.

Всего АРМ ТПЗ содержит 26 форм. Исходная (неоткомпилированная) программа запускается открытием формы «fgrm Main», которая является главным меню. Формы представляют собой окна программного комплекса, которые оператор видит при работе. Все они подробно описаны в инструкции по эксплуатации АРМ ТПЗ.

Кроме того, в состав автоматической системы мониторинга входит многоакурная автоматизированная бесконтактная высокоточная производительная измерительная система колес АСОК-1 (АСОК-Л) [7, 11].

Таким образом, представленная разработка — это часть системы мониторинга технического состояния колесных пар ПС, созданной авторами в рамках отраслевой комплексной автома-

тизированной системы управления железнодорожным транспортом. АСПК позволяет создавать базу данных электронных паспортов колесных пар индивидуально для каждой единицы или типа ПС и в отличие от аналогов не только определять степень износа, но и прогнозировать изменение геометрических параметров колесных пар ПС в зависимости от наработки, а также отслеживать динамику износа [6]. Информационная база дает возможность прогнозировать дальнейшее изменение износа колес, формировать протоколы и делать стратегические прогнозы по всему парку ПС.

Кроме того, программный комплекс автоматической системы мониторинга функционирует на IBM-совместимых компьютерах под управлением системы Microsoft Windows. Программное обеспечение отвечает международным требованиям RFC1697, RFC1123 и RFC1095 на сетевые клиент-серверы приложения и системы управления базами данных.

## Литература

1. Буйнов А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
2. Буйнов А. П., Худояров Д. Л. Влияние упрочнения гребней на ресурс бандажей колесных пар // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 63–68. ISSN 1815–9400.
3. Буйнов А. П. Разработка и аппаратная реализация прибора для измерения геометрических параметров бандажей колесных пар // Транспорт Урала. 2010. № 3 (26). С. 64–68. ISSN 1815–9400.
4. Буйнов А. П., Стаценко К. А., Кислицын А. М. Автоматическая измерительная система для контроля геометрических параметров колесных пар железнодорожного подвижного состава // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 2 (22). С. 146–156. ISSN 2072–3059.
5. Буйнов А. П. Модель эксплуатационного износа сложных систем железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2010. № 4 (24). С. 21–25. ISSN 1997–0722.
6. Буйнов А. П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Екатеринбург, 2011. 456 с.
7. Буйнов А. П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2010. № 7. С. 49–50. ISSN 0044–4448.

## References

1. Buynosov A. P. Main reasons of intensive wear of binding bands of rolling stock wheelsets and methods for their elimination [Osnovnye prichiny intensivnogo iznosa bandazhey kolesnykh par podvizhnogo sostava i metody ikh ustraneniya]. Ekaterinburg: Publishing House of USURT, 2009. 224 p.
2. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L. Influence of crests' hardening on the resource of wheel sets' bandages [Vliyanie uprochneniya grebney na resurs bandazhey kolesnykh par] // Transport of the Urals. 2010. No. 1 (24). Pp. 63–68. ISSN 1815–9400.
3. Buynosov A. P. Development and hardware realization of the device for geometrical parameters of wheel pairs bandages measurement [Razrabotka i apparatnaya realizatsiya pribora dlya izmereniya geometricheskikh parametrov bandazhey kolesnykh par] // Transport of the Urals. 2010. No. 3 (26). Pp. 64–68. ISSN 1815–9400.
4. Buynosov A. P., Statsenko K. A., Kislytsyn A. M. Automatic measuring system for controlling geometrical parameters of railway rolling stock wheelsets [Avtomaticheskaya izmeritel'naya sistema dlya kontrolya geometricheskikh parametrov kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava] // University proceedings. Volga region. Technical sciences. 2012. No. 2 (22). Pp. 146–156. ISSN 2072–3059.
5. Buynosov A. P. Model of operational wear of railway transport complex systems [Model' ekspluatatsionnogo iznosa slozhnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta] // Bulletin of transport of the Volga region. 2010. No. 4 (24). Pp. 21–25. ISSN 1997–0722.
6. Buynosov A. P. Methods on increasing life of binding bands of tractive rolling stock wheelsets [Metody povysheniya resursa bandazhey kolesnykh par tyagovogo podvizhnogo sostava]: DSc in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2011. 456 p.
7. Buynosov A. P. Automated control of parameters of tractive rolling stock wheelsets [Avtomatizirovanny kontrol' parametrov kolesnykh par tyago-



8. Буйносов А. П., Стаценко К. А., Кислицын А. М. Автоматическая измерительная система для контроля геометрических параметров колесных пар локомотивов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 3. С. 31–34. ISSN 0021–3454.
9. Буйносов А. П., Тихонов В. А. Аппаратная реализация прибора для измерения геометрических параметров бандажей колесных пар // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 2. С. 211–220. ISSN 1999–494X.
10. Буйносов А. П., Кислицын А. М. Измерительная система для контроля параметров колесных пар локомотивов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. С. 44–51. ISSN 0536–1044.
11. Наговицын В. С. Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава железных дорог с учетом фактического технического состояния : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2006. 250 с.
- vogo podvizhnogo sostava] // Railway Transport. 2010. No. 7. Pp. 49–50. ISSN 0044–4448.
8. Buynosov A. P., Statsenko K. A., Kislitsyn A. M. Automatic measuring system for control over geometrical parameters of locomotive wheel pairs [Avtomaticheskaya izmeritel'naya sistema dlya kontrolya geometricheskikh parametrov kolesnykh par lokomotivov] // Journal of Instrument Engineering. 2014. Vol. 57. No. 3. Pp. 31–34. ISSN 0021–3454.
9. Buynosov A. P., Tikhonov V. A. Hardware realization of the device for measurement of the geometrical parameters of bandages of wheelpairs [Apparatnaya realizatsiya pribora dlya izmereniya geometricheskikh parametrov bandazhey kolesnykh par] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2013. Vol. 6. No. 2. Pp. 211–220. ISSN 1999–494X.
10. Buynosov A. P., Kislitsyn A. M. A measuring system for monitoring the parameters of locomotive wheelsets [Izmeritel'naya sistema dlya kontrolya parametrov kolesnykh par lokomotivov] // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2013. No. 11. Pp. 44–51. ISSN 0536–1044.
11. Nagovitsyn V. S. Improvement of repair system for tractive railway rolling stock with the consideration for actual technical condition [Sovershenstvovanie sistemy remonta tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog s uchetom fakticheskogo tekhnicheskogo sostoyaniya] : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2006. 250 p.

Объем статьи 0,86 авторских листа

УДК 629.4-592

Юрий Владимирович Кривошея, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Донецкого института железнодорожного транспорта (ДНИЖТ), Донецк,  
Дарья Сергеевна Кривошея, старший преподаватель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Донецкого института железнодорожного транспорта (ДНИЖТ), Донецк

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗНОГО ДИСКА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОГЕОМЕТРИИ ЕГО ПОВЕРХНОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ВНЕ ОБЛАСТИ КОНТАКТА

Yuriy Vladimirovich Krivosheya, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Donetsk Railway Transport Institute (DRTI), Donetsk,  
Darya Sergeevna Krivosheya, Senior Lecturer, Rolling Stock of Railways Department, Donetsk Railway Transport Institute (DRTI), Donetsk

### Influence of stress state of brake disk on parameters of microgeometry of its surface that is out of contact area

#### Аннотация

В статье приведены результаты исследования, посвященного воздействию напряженного состояния области контакта на тенденцию изменения параметров шероховатости и волнистости поверхности тормозного диска, расположенной на периферии контакта с тормозной накладкой в зоне действия преимущественных напряжений сжатия и растяжения. Показано, что основная тенденция деформирования поверхности под влиянием возрастающих механических напряжений сжатия заключается в увеличении высотных и уменьшении шаговых параметров шероховатости и волнистости. Установлено, что на участках действия напряжений растяжения шероховатость и волнистость поверхности тормозного диска возвращаются к своим исходным значениям, снятым в состоянии отсутствия внешних силовых воздействий. На основе полученных результатов дано объяснение процессу зарождения волнистости на поверхности тормозного диска. Результаты исследования рекомендованы для использования при решении задач на трение и изнашивание.

**Ключевые слова:** дисковый тормоз, тормозной диск, тормозная накладка, деформация, шероховатость поверхности, волнистость поверхности, профилограмма поверхности.

#### Summary

The paper shows results of the study dedicated to influence of contact area stress state on a trend of changes for roughness and waviness parameters of brake disk surface located on the periphery of contact with a brake pad in the coverage area of preferred compression and tensile stresses. It also displays that the main trend of surface deformation under the influence of growing mechanical compression stresses consists in increase of altitude and decrease of step parameters of roughness and waviness. The authors have established that in the coverage area of tensile stresses the roughness and the waviness of the brake disk surface returns to initial values determined in condition of absence of external power influence. On the basis of the results, the authors have explained the process of waviness appearance on the brake disk surface. Results of the study are recommended for the application at solving tasks on friction and wear.

**Keywords:** plate brake, brake disk, brake pad, deformation, surface roughness, surface waviness, surface profilogram.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-35-39

#### ВВЕДЕНИЕ

В процессе торможения железнодорожного транспортного средства в объеме материала рабочих элементов дискового тормоза возникает сложное напряженное состояние, которое приводит как к макро-, так и к микродеформациям взаимодействующих поверхностей. В результате деформаций изменяются параметры шероховатости и волнистости рабочих поверхностей, оказывающие непосредственное влияние на формирование интегральных свойств трибосистемы, а также характеристики реализации процесса торможения [1–4].

Отсутствие информации о закономерностях изменения параметров шероховатости и волнистости поверхностей снижает возможность аналитического прогноза характеристик трения и изнашивания при торможении. Это связано с тем, что согласно существующим методикам при реализации математических моделей используются параметры шероховатости и волнистости поверхности, которые сняты (замерены) в условиях отсутствия силового нагружения элементов трения [4–6].

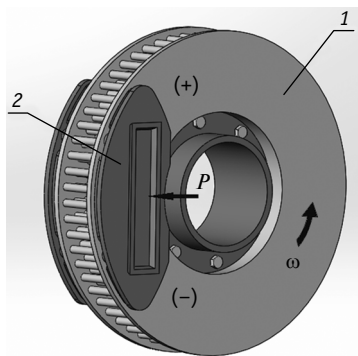
Установление закономерностей деформирования шероховатости и волнистости поверхности тормозного диска создает предпосылки для повышения достоверности расчетов на трение и изнашивание, а также прогнозирования рабочих характеристик перспективных конструкций тормозных средств.

Цель статьи — исследование влияния напряженного состояния области контакта на тенденцию изменения параметров шероховатости и волнистости поверхности тормозного диска, которая расположена на периферии контакта с тормозной накладкой в зоне действия преимущественных напряжений сжатия (+) и преимущественных напряжений растяжения (–).

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии с поставленной целью проведен эксперимент на натурной стендовой установке, воспроизводящей силовое взаимодействие элементов дискового тормоза в условиях реальных нагрузок, реализуемых при торможении [7, 8].

Суть эксперимента заключалась в исследовании особенностей упругого деформирования шероховатости и волнистости поверхности тормозного диска, как наиболее твердого тела узла трения, под влиянием напряженного состояния области контакта при приложении нормальных и тангенциальных сил. Исследуемые участки поверхности тормозного диска показаны на рис. 1.



**Рис. 1. Участки тормозного диска, на которых исследовались шероховатость и волнистость поверхности под влиянием напряженного состояния области контакта:**  
(+) — преимущественные напряжения сжатия;  
(-) — преимущественные напряжения растяжения; 1 — тормозной диск, 2 — тормозная накладка;  $P$  — сила прижатия накладки к диску;  $\omega$  — частота вращения

За основу сравнения приняты параметры шероховатости и волнистости поверхности, которые сняты (замерены) на указанных участках при отсутствии внешних силовых воздействий.

Эксперименты выполнены в следующей последовательности:

с помощью увеличительных средств на поверхности тормозного диска выбирали участок, на котором шероховатость поверхности была однородной и отсутствовали следы механических дефектов (царапин, вмятин, раковин и т.д.);

выбранный участок поверхности тормозного диска совмещали с границей контакта с тормозной накладкой;

тормозной диск фиксировали, чтобы не допустить его проворот вокруг собственной оси при нагружении;

создавали заданное нормальное усилие прижатия тормозных накладок к тормозному диску;

на поверхность выбранного участка тормозного диска, которая граничит с областью контакта с тормозной накладкой, приклеивали специальный бокс для литьевого пластика AST-T (рис. 2);

создавали заданное тангенциальное усилие;

в боксе размещали литевой пластик AST-T;

после отвердевания литьевого пластика бокс вместе со слепком снимали с поверхности тормозного диска;

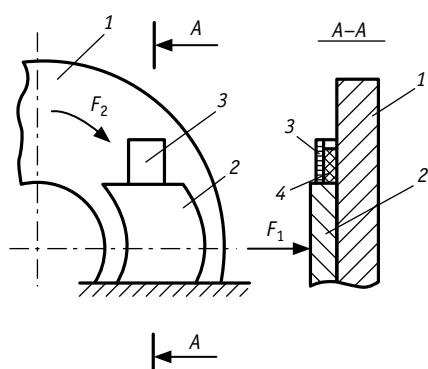
на полученном слепке очерчивали участок поверхности, предназначенный для исследования;

поверхность полученного слепка исследовали на профилометре-профилографе.

Эксперименты проводили для нормальной силы прижатия тормозной колодки  $F_1 = 5,0$  кН и тангенциальных сил  $F_2 = 0,3; 0,7; 1,1; 1,5$  кН. Аналогично были получены слепки в области действия напряжений растяжения (-), а также при отсутствии внешнего силового воздействия.

С полученных слепков, воспроизведших поверхность участка тормозного диска в зеркальном отображении, снимали параметры шероховатости и волнистости на профилометре-профилографе Talysurf-5M фирмы Taylor Hobson. Направление исследуемых трасс совпадало с направлением вращения тормозного диска. Базовые длины трасс, на которых производились измерения, выбирали в соответствии с рекомендациями [5, 6]. Измерительная трасса как для шероховатости, так и для волнистости начиналась непосредственно от границы контакта тормозной накладки и тормозного диска (погрешность позиционирования не более 0,5 мм). Результаты исследования представлены на рис. 3–7.

Анализ результатов показал, что под влиянием напряженного состояния, реализуемого на поверхности тормозного диска, в зоне действия преимущественных напряжений сжатия (+) шероховатость и волнистость поверхности интенсивно деформируются. Как следует



**Рис. 2. Иллюстрация к проведению экспериментов:**

1 — тормозной диск; 2 — тормозная накладка; 3 — бокс; 4 — литевой пластик AST-T;  $F_1$  — сила нормального прижатия тормозной колодки к тормозному диску;  $F_2$  — тангенциальная сила

из рис. 3 и 4, основная тенденция деформирования заключается в увеличении высотных ( $R_a, R_{max}, W_a, W_{max}$ ) и уменьшении шаговых ( $R_{sm}, W_{sm}$ ) параметров шероховатости и волнистости.

Эффект увеличения высотных, а также уменьшения шаговых параметров (в пределах упругих свойств металла) объясняется характерными размерами микронеровностей масштаба шероховатости и волнистости, при которых высота и продольная длина их основания соотносятся как 1:40 и 1:550 соответственно. Вариативность случайных величин параметров шероховатости и волнистости усиливалась с ростом напряжений в поверхностном слое и изменялась от слабого уровня, соответствующего отсутствию механических напряжений, до среднего, соответствующего максимальным уровням напряжений. При этом вариативность параметров волнистости была выражена слабее, чем параметров шероховатости. Из этого следует, что волнистость поверхности по сравнению с шероховатостью носит более регулярный характер и в большей степени поддается количественной оценке, а параметры ее изменения имеют статистически значимые значения.

На участках действия преимущественных напряжений растяжения (-) не наблюдалось изменения параметров шероховатости и волнистости по сравнению с их исходными значениями, снятыми при отсутствии внешних силовых воздействий.

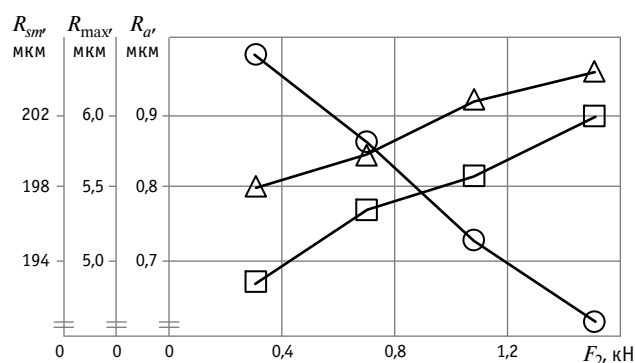


Рис. 3. Зависимость параметров шероховатости поверхности от величины тангенциальной силы  $F_2$  на участке действия напряжений сжатия (+):

□ — шаг микронеровностей  $R_{sm}$ ;  
○ — среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ ;  
△ — максимальная высота микронеровностей  $R_{max}$

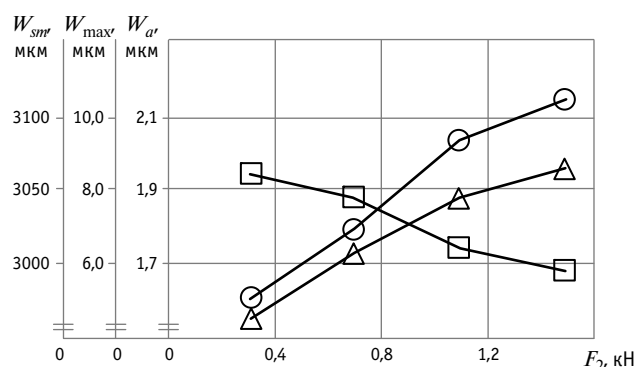


Рис. 4. Зависимость параметров волнистости поверхности от величины тангенциальной силы  $F_2$  на участке действия напряжений сжатия (+):

□ — шаг волн волнистости  $W_{sm}$ ;  
○ — среднеарифметическое отклонение профиля волн волнистости  $W_a$ ;  
△ — максимальная высота волн  $W_{max}$

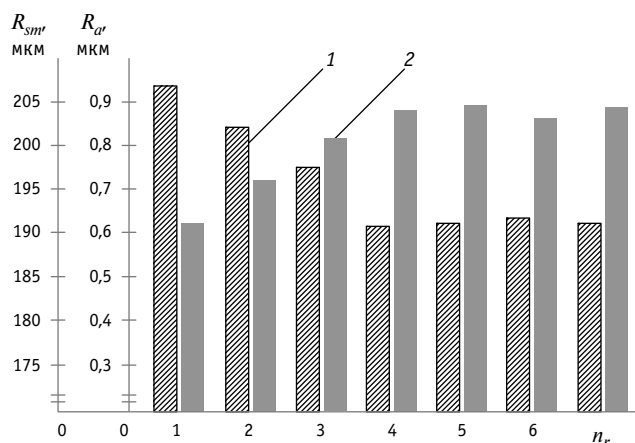


Рис. 5. Диаграмма высотных и шаговых параметров шероховатости: 1 — среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ ; 2 — средний шаг микронеровностей  $R_{sm}$ ;  $n_r$  — количество базовых длин

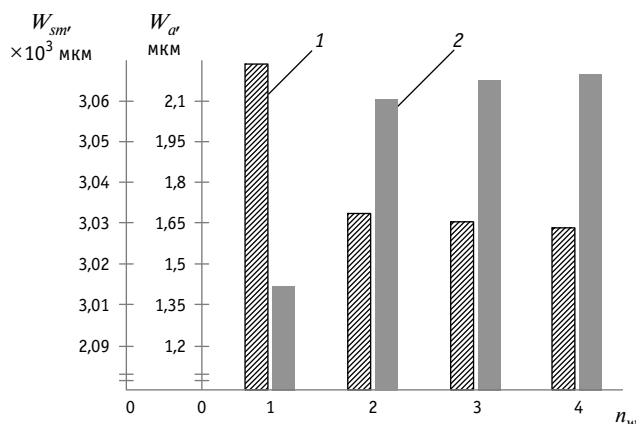


Рис. 6. Диаграмма высотных и шаговых параметров волн волнистости:

1 — среднеарифметическое отклонение профиля  $W_a$ ; 2 — средний шаг волн волнистости  $W_{sm}$ ;  $n_w$  — количество базовых длин

На рис. 5 и 6 представлены диаграммы изменения высотных и шаговых параметров шероховатости и волнистости в соответствии с последовательностью базовых длин, на которых производились замеры. За основу построения диаграмм взяты параметры шероховатости и волнистости, которые усреднены в пределах каждой базовой длины. Это позволило проанализировать характер затухания деформаций в зависимости от расстояния до непосредственного контакта тормозного диска с тормозной накладкой.

Как следует из полученных результатов, затухание деформаций происходило в пределах 4–5 базовых длин для шероховатости и 1,5 базовой длины для волнистости, т.е. при торможении дисковым тормозом деформирование поверхности тормозного диска происходит непосредственно перед «вхождением» его поверхности в контакт с тормозной накладкой.

Деформирование поверхности на участке действия напряжений сжатия (+) является одной из причин механизма зарож-

дения волнистости на поверхности тормозного диска в процессе торможения. Состояние сжатия поверхности предопределяет локализацию механических давлений на вершинах волн волнистости, равно как и повышенную интенсивность изнашивания на этих участках. В процессе эксплуатации дискового тормоза вследствие изнашивания искажение поверхности усиливается, образуя волнистость.

Согласно полученным результатам изменение шаговых параметров шероховатости и волнистости происходит при относительных упругих деформациях (относительном сжатии участка поверхности), равных 0,2–0,3 %.

В связи с этим следует отметить, что при нагружении тормозного диска и тормозных накладок нормальными и тангенциальными силами в поверхностном слое реализуется сложное напряженно-деформированное состояние, которое не идентифицируется при существующих методах испытаний металлов и для которого справочные данные по величинам деформации отсутствуют [9].

В первом приближении за базу сравнения можно принять соосное сжатие (растяжение), при котором относительное удлинение (укорочение) стального образца для металлов равно 0,001–0,01 % [9].

Сравнение полученных в эксперименте данных с вышеприведенными табличными величинами упругой деформации для металлов при сжатии (растяжении) показывает, что они заметно превышают табличные значения. Такое несовпадение результатов можно объяснить в первую очередь морфологией поверхностного слоя тормозного диска, который (поверхностный слой) эксплуатируется в условиях постоянных силовых и термических воздействий, вследствие чего на его поверхности образуются многочисленные микротрещины, причем многие из них находятся в открытом состоянии. Следовательно, общая деформация (укорочение)  $\varepsilon$  линейного участка поверхности тормозного диска в условиях напряженного состояния сжатия будет равна

$$\varepsilon = L - L_1 / L \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $L$  и  $L_1$  — длина участка поверхности до и после сжатия соответственно, м,

$$L - L_1 = (\varepsilon_y + \Sigma \gamma_{MT}), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_y$  — упругая деформация (укорочение), м;

$\Sigma \gamma_{MT}$  — суммарная величина микротрещин на базовой длине, м.

Поскольку эксперименты проводились с использованием метода слепков, выявить микротрещины поверхности в условиях действия напряжений растяжения и сжатия, а также их отсутствия не представлялось возможным, так как данный метод не позволял воспроизвести микротрещины, которые, как правило, ха-

рактеризуются относительно большой глубиной.

Полученные результаты показывают, что для контакта тормозного диска и тормозной колодки дискового тормоза параметры шероховатости и волнистости поверхности тормозного диска, находящегося вне зоны контакта с тормозными накладками, зависят от уровня напряженного состояния поверхностного слоя. Отмеченная закономерность качественно согласуется с данными, полученными применительно к условиям сосредоточенного контакта колеса локомотива и рельса [10, 11].

Анализ опорных кривых, представленных на рис. 7, показывает, что несущая способность поверхности тормозного диска при торможении ухудшается вследствие деформирования шероховатости поверхности.

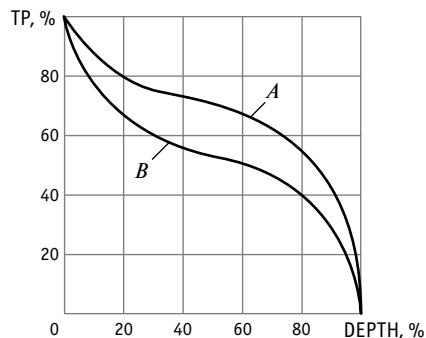


Рис. 7. Опорные кривые поверхности тормозного диска, находящейся на периферии зоны контакта с тормозными накладками:

A — до нагружения; B — после нагружения

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что реально участвующая во взаимодействии поверхность тормозного диска имеет параметры шероховатости и вол-

нистости, которые зависят от напряженного состояния области контакта и которые существенно отличаются от исходных, полученных в условиях отсутствия внешних силовых воздействий.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлены закономерности влияния напряженного состояния тормозного диска на параметры шероховатости и волнистости его поверхности, находящейся вне области контакта с тормозной накладкой.

2. Основная тенденция деформирования шероховатости и волнистости поверхности в зоне действия преимущественных напряжений сжатия заключается в увеличении высотных и уменьшении шаговых параметров шероховатости и волнистости. Затухание деформаций на поверхности тормозного диска происходит в пределах 4–5 базовых длин для шероховатости и менее чем 1,5 базовой длины для волнистости.

3. На участках действия преимущественных напряжений растяжения шероховатость и волнистость поверхности тормозного диска возвращаются к своим исходным значениям, замеренным при отсутствии внешних силовых воздействий.

4. Деформирование поверхности на участке действия напряжений сжатия (+) является одной из причин механизма зарождения волнистости на поверхности тормозного диска в процессе торможения. Состояние сжатия поверхности предопределяет локализацию механических давлений на вершинах волн волнистости, равно как и повышенную интенсивность изнашивания на этих участках. В процессе эксплуатации дискового тормоза вследствие изнашивания искажение поверхности усиливается, образуя волнистость.

## Литература

1. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие. Москва : Маршрут, 2006. 392 с.
2. Справочник по триботехнике. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний. Т. 3 / Под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 1992. 730 с.
3. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин : справочник. Москва : Машиностроение, 1984. 280 с.
4. Хебда М., Чичинадзе А. В. Справочник по триботехнике. Теоретические основы. Т. 1. Москва : Машиностроение, 1989. 400 с.
5. Демкин Н. Б., Коротков М. А. Топографические характеристики поверхности, точность их определения // Механика и физика контактного взаимодействия. Калинин, 1978. С. 16–30.
6. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. Москва : Машиностроение, 1978. 322 с.
7. Стенд для исследования характеристик взаимодействия элементов трения дискового тормоза / Ю. В. Кривошея, В. В. Бугаенко, И. И. Соснов [и др.] // Вестник РГУПС. 2020. № 1 (77). С. 83–88. ISSN 0201–727X.
8. Стенд для исследования взаимодействия рабочих элементов дискового тормоза подвижного состава / Ю. В. Кривошея, В. В. Бугаенко, Ю. И. Осенин [и др.] : патент 144107 Украина. № u 2019 10169 ; заявл. 03.10.19 ; опубл. 10.09.20, Бюл. № 17.
9. Жуковец И. И. Механические испытания металлов. Москва : Высшая школа, 1986. 199 с.
10. Михин Н. М., Осенин Ю. И. Влияние напряженного состояния области контакта твердых тел на параметры шероховатости и волнистости поверхностей // Проблемы трения и изнашивания: республиканский межведомственный научно-технический сборник. Киев : Техника, 1988. Вып. 34. С. 46–54.
11. Осенин Ю. И., Белозеров К. В., Гулик Б. И. Методика решения задач деформирования поверхностных слоев тел тангенциальными силами // Вестник Восточноукраинского государственного университета. 1999. № 2. С. 23–31.

## References

1. Asadchenko V. R. Automatic brakes of rolling stock [Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava] : textbook. Moscow : Route, 2006. 392 p.
2. Handbook on tribotechnics. Tribotechnics of antifriction, frictional and coupling devices. Methods and means of tribotechnical tests [Spravochnik po tribotekhnike. Tribotekhnika antifriktsionnykh, friktsionnykh i stsepnnykh ustroystv. Metody i sredstva tribotekhnicheskikh ispytaniy]. Vol. 3 / Ed. by M. Hebda, A. V. Chichinadze. Moscow : Machinery, 1992. 730 p.
3. Kragelskiy I. V., Mikhin N. M. Friction units of machines [Uzly treniya mashin] : handbook. Moscow : Machinery, 1984. 280 p.
4. Hebda M., Chichinadze A. V. Handbook of tribotechnics. Theoretical basis [Spravochnik po tribotekhnike. Teoreticheskie osnovy]. Vol. 1. Moscow : Machinery, 1989. 400 p.
5. Demkin N. B., Korotkov M. A. Topographic characteristics of the surface, the accuracy of their determination [Topograficheskie kharakteristiki poverkhnosti, tochnost' ikh opredeleniya] // Mechanics and Physics of Contact Interaction. Kalinin, 1978. Pp. 16–30.
6. Dunin-Barkovskiy I. V., Kartashova A. N. Measurement and analysis of surface roughness, waviness and out-of-roundness [Izmerenie i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti]. Moscow : Machinery, 1978. 322 p.
7. Stand for characteristic research of the friction elements interaction of a disk brake [Stend dlya issledovaniya kharakteristik vzaimodeystviya elementov treniya diskovogo tormoza] / Yu. V. Krivosheya, V. V. Bugaenko, I. I. Sosnov et al. // Vestnik RGUPS. 2020. No. 1 (77). Pp. 83–88. ISSN 0201–727X.
8. Stand for studying the characteristics of interaction of friction elements of a disc brake [Stend dlya issledovaniya vzaimodeystviya rabochikh elementov diskovogo tormoza podvizhnogo sostava] / Yu. V. Krivosheya, V. V. Bugaenko, Yu. I. Osenin et al. : patent 144107 Ukraine. No. u 2019 10169 ; filed 03.10.19 ; publ. 10.09.20, Bulletin No. 17.
9. Zhukovets I. I. Mechanical testing of metals [Mekhanicheskie ispytaniya metallov]. Moscow : Higher School, 1986. 199 p.
10. Mikhin N. M., Osenin Yu. I. Influence of the stress state of the contact area of solids on the parameters of roughness and waviness of surfaces [Vliyanie napryazhennogo sostoyaniya oblasti kontakta tverdykh tel na parametry sherokhovatosti i volnistosti poverkhnostey] // Problems of friction and wear : Republican interdepartmental scientific and technical collection of works. Kiev : Technique. 1988. Issue 34. Pp. 46–54.
11. Osenin Yu. I., Belozеров K. V., Gulik B. I. Methodology for solving problems of deformation of surface layers of bodies by tangential forces [Metodika resheniya zadach deformirovaniya poverkhnostnykh sloev tel tangentsial'nymi silami] // Bulletin of the East Ukrainian State University. 1999. No. 2. Pp. 23–31.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 656.225.073.437:662

**Владимир Иванович Моисеев, доктор технических наук, профессор кафедры «Математика и моделирование» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,**

**Александр Владимирович Жебанов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,**

**Татьяна Александровна Комарова, кандидат технических наук, генеральный директор НП «НВЦ «Дисист», Санкт-Петербург, Россия**

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК ВАГОНАМИ-ЦИСТЕРНАМИ ЗАСТЫВАЮЩИХ НЕФТЯНЫХ ТОПЛИВ С ПЕРЕДАЧЕЙ ПО ПОЛЕВЫМ ТРУБОПРОВОДАМ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

**Vladimir Ivanovich Moiseev, DSc in Engineering, Professor, Mathematics and Modeling Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU), St. Petersburg, Russia,**

**Alexander Vladimirovich Zhebanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Cars Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,**

**Tatyana Alexandrovna Komarova, PhD in Engineering, General Director of Disist, St. Petersburg, Russia**

## Organization of transportation by tank cars of solidified petroleum fuels with transmission through field pipelines in low temperature conditions

### Аннотация

Охлаждение застывающих топлив сопровождается резким ростом их вязкости, что делает невозможным трубопроводную передачу. В статье рассмотрен способ выгрузки и перегрузки в зимний период застывающих нефтяных топлив с применением трубопроводов, выполненных по временным технологическим схемам. Предложены непрерывный подогрев перекачиваемого топлива с использованием устройств, основанных на низкотемпературном горении пропан-бутановой смеси на поверхности катализатора при пожаробезопасных температурах, и установка на трубопровод временной теплоизолирующей оболочки, соответствующей режимам работы нагревателей.

**Ключевые слова:** вагон-цистерна, трубопровод, передача жидких нефтяных топлив, рост вязкости, низкотемпературное горение, теплоизолирующая оболочка.

### Summary

The method of unloading and reloading solidified oil fuels, with the use of pipelines made according to temporary technological schemes, produced in winter, is considered. Cooling of solidified fuels is accompanied by a sharp increase in their viscosity, which makes pipeline transmission impossible. In fire hazard, it is proposed to produce continuous heating of the pumped fuel using devices based on low-temperature combustion of propane-butane mixture on the surface of the catalyst carried out at fire-safe temperatures. It is also proposed to install a temporary heat-insulating shell on the pipeline that meets the operating modes of the heaters.

**Keywords:** tank car, pipeline, transfer of liquid petroleum fuels, increase in viscosity, low-temperature combustion, heat sheath.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-40-43

**В** условиях возникновения чрезвычайных ситуаций часто встает задача перегрузить жидкие нефтяные топлива (например, флотские мазуты) с железнодорожных вагонов-цистерн на автотранспорт или плавсредства при помощи выполненных по временным технологическим схемам полевых магистральных трубопроводов (ПМТ).

Такие трубопроводы собирают из стальных секций длиной  $l \sim 15$  м и диаметром  $d = 150\text{--}300$  мм. Коэффициент теплопроводности стальных стенок ПМТ достаточно большой ( $\lambda_{\text{ст}} \approx 40$  Вт/м °С), и если перекачку производить при низких температурах воздуха, то жидкое топливо в ПМТ быстро охлаждается, его вязкость растет, а прокачиваемость через трубопровод резко снижается.

Рост вязкости наблюдается у всех нефтяных топлив, которые используются для работы маломощных энергетических установок на судах либо в пунктах временного размещения людей (например, при военных действиях или стихийных катаклизмах). Так, маловязкие флотские мазуты Ф-5, Ф-12 и Ф-20 теряют текучесть при сравнительно высоких для зимних условий температурах (ниже  $-8$  °С), а котельные мазуты совсем не пригодны для передачи по ПМТ уже при положительных температурах воздуха [1].

Снижение вязкости передаваемых по ПМТ жидких топлив можно обеспечить их подогревом по всей длине трубопровода с одновременным созданием временной тепловой изоляции на стенках трубопровода [2].

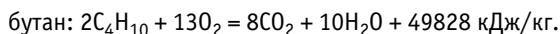
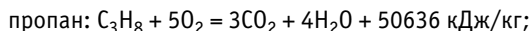
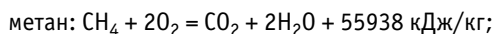
Отметим, что электроподогрев ПМТ сразу же следует исключить из рассмотрения, так как все жидкие топлива имеют



низкие температуры вспышки и самовоспламенения, что может привести к взрывоопасным и пожароопасным ситуациям. Кроме того, он требует мощных источников электропитания, что зачастую невозможно обеспечить в полевых условиях.

Альтернативным способом разогрева жидких топлив в ПМТ может стать «низкотемпературное горение» газообразных углеводородов. Этот эффект известен, но все еще не находит широкого практического применения. Он наблюдается при сжигании метана, пропанобутановой смеси, ацетиленов или паров бензина на поверхности катализатора. Горение происходит с большим тепловым эффектом, но и при низких, пожаробезопасных, температурах (табл. 1) [3, 4].

Так, горение метана, бутана и пропана на поверхности катализатора происходит при температурах от +150 °С до +280 °С, а реакции их окисления, записанные ниже, демонстрируют наличие большого теплового эффекта:



Рассмотрим практическое применение подогрева топлива (флотского мазута) при его сливе из железнодорожного вагона-цистерны с последующей передачей по ПМТ в зимних условиях.

Первый этап связан с операцией слива. Обычно вязкие нефтепродукты доставляют специализированным подвижным составом, например, в цистернах с паровогревателем кожухом (модель 15–1566 и др.) [5].

В настоящее время вагон-цистерна выгружается на специально организованной сливной площадке, имеющей мощный источник теплоснабжения, который подает пар под кожух на котле вагона-цистерны. В полевых условиях пар для разогрева нефтегруза производят передвижные энергетические установки с парогенераторами (ППК-400 и ППК-1000). Заметим, что они обеспечивают только начальный разогрев топлива, а охлаждается оно, протекая по трубопроводу. Переход топлива в высоковязкое состояние может произойти на расстоянии 300–400 м от места выгрузки и вне зависимости от его начальной температуры.

Кроме того, разогрев содержимого котла вагона-цистерны паром до перевода нефтяного топлива в маловязкое состояние затруднен тем, что основная часть теплоты безвозврат-

но теряется при конденсации пара на наружной поверхности паровогревателя кожуха, имеющего тепловой контакт с атмосферой.

Применение низкотемпературного горения углеводородов позволяет удачно обойти обе стороны этой проблемы: паровогревательный кожух в заводских условиях или в условиях депо требуется укрепить маты, выполненные из асбеста или стекловолны, с нанесенным на их поверхность катализатором. При сливе нефтяного топлива под кожух подается пропанобутановая смесь, доставляемая в баллонах, а также воздух, подаваемый переносным компрессором. В результате химической реакции горения смеси, проходящей при температурах 200–250 °С, образуется горячий воздух, разогревающий стенки котла вагона-цистерны с нефтегрузом. Водяной пар присутствует только как продукт химических реакций, повышающий теплоемкость воздуха, но отнюдь не как рабочее тело, и потери теплоты на его конденсацию малы.

Как видно из представленных выше химических реакций, при горении образуется углекислый газ. Его можно не только стравливать в атмосферу, но и частично подавать внутрь котла вагона-цистерны. Если внутри котла вагона-цистерны образуется атмосфера углекислого газа, который не поддерживает горения, то вопросы пожарной безопасности, обусловленные низкими температурами вспышки нефтяных топлив, также снимаются.

Возможно также обеспечить подогрев перекачиваемого топлива и по всей длине ПМТ. Рассмотрим этот процесс на конкретном примере. Пусть ПМТ, имеющий протяженность  $l = 900$  м, выполнен из труб диаметром  $d = 0,3$  м и длиной  $l_1 = 15$  м каждая и эксплуатируется при температуре воздуха  $T_{\text{в}} = -20$  °С. Расчетная мощность передачи  $G_{\text{м}} = 70$  кг/с.

По первому варианту решаемой задачи трубы ПМТ не имеют тепловой изоляции и обдуваются потоком холодного воздуха (ветром). Часть секций ПМТ снабжена каталитическим нагревателем, причем эти секции распределены по длине трубопровода между необогреваемыми секциями. Считаем, что вагон-цистерна, доставивший нефтегруз, снабжен средством подогрева при выгрузке, например паровогревателем кожухом, а на пункте выгрузки имеется мобильный парогенератор ППК-400, обеспечивающий начальную температуру сливаемого топлива.

Для подогрева секций ПМТ используется пропан-бутановая смесь, доставляемая в бытовых газовых баллонах вместимостью 50 л каждый.

Таблица 1

Низкотемпературное окисление углеводородов на катализаторах [3, 4]

Катализатор	Носитель	Температура реакции, °С	Горючее	Продукты реакции
Ni	Асбест	150–350	Метан	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O и следы формальдегида
CuO	Асбест	100	Метан	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O
MnO <sub>2</sub>	Пемза	150–200	Ацетилен	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O
NiCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , MnCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Асбест, стекловолно	200–300	Пары бензина, керосина	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O

Примем, что температура топлива, сливаемого из вагона-цистерны,  $T_{ж} \geq +20$  °С, при этом его вязкость  $\nu \approx 2,6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. При скорости течения  $u = 0,75$  м/с и диаметре труб ПМТ  $d = 0,3$  м число Рейнольдса  $Re = \bar{u}d/\nu$  равно 12000. Оно значительно выше критического значения  $Re_{кр} = 2300$ , определяющего переход к турбулентному течению жидкостей. Следовательно, топливо будет двигаться по ПМТ в турбулентном режиме, при этом коэффициент сопротивления трубопровода равен

$$\xi_{турб} = \frac{0,3161}{\sqrt[4]{Re}} = 0,3161 \sqrt[4]{\frac{\pi \nu d}{4 G_V}}, \quad (1)$$

где  $G_V = \pi d^2 u / 4$  — объемный расход жидкости в трубопроводе, согласно условиям задачи  $G_V = 0,071$  м<sup>3</sup>/с.

Определим средний коэффициент теплоотдачи при значениях температуры стенки ПМТ  $T_{ст} = -20$  °С на необогреваемой («холодной») и  $T_{ст} = +120$  °С на обогреваемой секции. При турбулентном режиме течения в горизонтальных гладких трубах среднее число Нуссельта  $Nu = \alpha d / \lambda$  рассчитывается по формуле [6]

$$Nu = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где  $Pr = \nu / a$  — критерий Прандтля, определяемый отношением кинематической вязкости жидкости  $\nu$  к ее температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/с;

$Pr_{ж}$  и  $Pr_{ст}$  — критерии, соответствующие средней температуре жидкости в потоке и температуре стенки ПМТ соответственно.

Нефтяные топлива имеют близкие по значениям теплофизические характеристики: теплопроводность  $\lambda \approx 0,145$  Вт/м·град, плотность  $\rho \approx 800\text{--}810$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $C_{ж} \approx 2100$  Дж/кг·град, температуропроводность  $a \approx 8 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Они отличаются друг от друга по изменению вязкости с изменением температуры. Наибольший рост вязкости при охлаждении показывают темные нефтяные топлива, особенно котельные мазуты.

В расчетах за определяющую принята средняя температура жидкости, за определяющий размер — диаметр трубы. Критерий Прандтля  $Pr_{ст}$  вычислен по средней температуре поверхности стенки, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  — из соотношения (2) по формуле  $\alpha = Nu_{тр} \frac{\lambda}{d}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Рабочая расчетная таблица

$T_{ст}$ , °С	$u_{ср}$ , м/с	$l_{сек}$ , м	$S_{тр}$ , м <sup>2</sup>	$G_{м}$ , кг/с	$Nu_{тр}^{обогрев}$	$Nu_{тр}^{холодн}$	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С
+120	0,72	15	0,02	56,2	116,70	—	93,21
–20					—	105,67	84,80

Количество тепла, передаваемого через нагреваемую стенку секции:

$$Q = \alpha (T_{ж} - T_{ст}) \pi d \cdot l_1. \quad (3)$$

Это же количество тепла поглощается протекающей жидкостью:

$$Q = G_V \rho C_{ж} (T_{ж_2} - T_{ж_1}). \quad (4)$$

Приравняв формулы (3) и (4), получаем изменение температуры продукта при протекании через одну секцию ПМТ:

$$\Delta T_{ж} = T_{ж_2} - T_{ж_1} = \frac{\alpha (T_{ст} - T_{ж}) \pi d l_1}{\rho G_V C_{ж}}. \quad (5)$$

Из (5) находим, что нефтепродукт, протекающий через одну «холодную» секцию, охлаждается на  $\Delta T_{ж} = 0,51$  °С, а через одну обогреваемую секцию нагревается на  $\Delta T_{ж} = 1,22$  °С.

Весь трубопровод в условиях задачи состоит из 60 секций. Пройдя первые одиннадцать из них, топливо охладится на 5,61 °С, затем на следующих четырех обогреваемых секциях оно нагреется на 4,88 °С и, пройдя все 60 секций, охладится на 3 °С, имея на выходе температуру +17 °С.

Если бы по условиям задачи ПМТ не обогревался по своей длине, то топливо оценочно охладилось бы на 30,6 °С и, не дойдя до конца ПМТ, полностью застыло, сведя на нет трубопроводную передачу.

Для разогрева секций ПМТ можно использовать тепловую трубу [7], в которой блок каталитического нагревателя помещен в испаритель, установленный снаружи на секции ПМТ. Конденсатор трубы крепится внутри секции трубопровода, оба элемента соединяются короткими трубками, обеспечивающими перенос пара и рабочей жидкости внутри тепловой трубы.

Сам каталитический нагреватель образуют три коаксиальные трубки. По центральной трубке, имеющей боковые отверстия, прокачивается газ (например, пропанобутановая смесь). На эту трубку надет цилиндрический патрон, выполненный из волокнистого асбеста, на наружную поверхность которого нанесен катализатор. Патрон вставляется в трубку испарителя, и через зазор между ними от маломощного компрессора прокачивается воздух, поддерживающий каталитическое горение. При горении образуется газ, имеющий температуру  $T = 150\text{--}180$  °С, который вызывает испарение рабочей жидкости в испарителе тепловой трубы. Пар поступает в конденсатор, где конденсируется, отдавая скрытую теплоту парообразования жидкости в трубопроводе. Коэффициент полезного действия тепловой трубы составляет 85–90 %.

По второму варианту рассматриваемой задачи на стенки ПМТ непосредственно перед его эксплуатацией в полевых условиях наносят временную теплоизолирующую оболочку, выполненную из жесткого пенополиуретана толщиной 20–30 мм. Пенополиуретан имеет малые значения коэффициента теплопроводности  $\lambda = 0,035$  Вт/м·°С, может длительно использоваться при температурах от –60 до +200 °С, является трудногорюемым материалом и полностью удовлетворяет требованиям СНиП 41-03-2003, предъявляемым к теплоизолирующим материалам [2, 8]. Материал химически инертен, имеет высокую

адгезионную способность к металлам, окрашенным штатными эмалями, по пожароопасности относится к классу горючести Г2.

Пенополиуретановая теплоизолирующая оболочка отличается простотой и скоростью монтажа. Материал наносится напылением непосредственно на поверхность ПМТ через форсунку. Трудоемкий монтаж и спецтехника (за исключением стандартного компрессора для подачи воздуха) не требуются. При напылении происходит смешивание двух компонентов теплоизолирующего материала, которые самовспениваются и застывают в течение 45–80 с, образуя целостную структуру без стыков и швов независимо от сложности формы конструкции.

Стоимость пенополиуретановой оболочки указанной толщины составляет около 200–250 руб./м<sup>2</sup>, при этом расходы по ее нанесению на рассматриваемый ПМТ не превышают 1200–2000 руб.

В условиях умеренного и сильного ветра, когда коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha$  равен 15–25 Вт/м<sup>2</sup> °С, мощность теплопотерь в окружающее пространство при наличии теплоизолирующей оболочки ПМТ, согласно выполненным расчетам, снижается в 23–25 раз.

Таким образом, как видно из представленных в статье материалов, эффективность новой технологии разогрева каталитическими нагревательными элементами, имеющими теплоизолирующую оболочку, заключается в возможности быстрой выгрузки и перегрузки жидких нефтяных топлив, транспортируемых вагонами-цистернами и передаваемых через ПМТ, при низких температурах воздуха. Это особенно актуально в настоящее время, когда интенсивно осваиваются арктические регионы России.

## Литература

1. Жебанов А. В. Пути снижения теплопотерь вязких нефтегрузов при транспортировке железнодорожным транспортом // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 31–38. ISSN 2220–4245.
2. Жебанов А. В. Полный цикл работы цистерны с теплоизоляцией: от нанесения покрытия до утилизации // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 51–54. ISSN 1815–9400.
3. Марголис Л. Я. Гетерогенное каталитическое окисление углеводородов. Ленинград : Химия, 1967. 364 с.
4. Крылов О. В. Глубокое каталитическое окисление углеводородов. Москва : Наука, 1981. 199 с.
5. Жебанов А. В., Моисеев В. И. Сохранение теплофизических свойств перевозимых в вагонах-цистернах нефтепродуктов при переводе их в стратифицированное состояние // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 27–29.
6. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Москва ; Ленинград : Энергия, 1965. 423 с.
7. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. Москва : Энергия, 1979. 272 с.
8. Жебанов А. В. Взаимодействие теплоизоляционного слоя цистерны с окружающей средой с точки зрения экологической безопасности и с учетом утилизации отходов // Вестник транспорта Поволжья. 2012. № 4 (34). С. 19–23. ISSN 1997–0722.

## References

1. Zhebanov A. V. Ways to reduce a heat loss viscous oil cargo during railway transportation [Puti snizheniya teplopoter' вязkikh neftegruzov pri transportirovke zheleznodorozhnym transportom] // Journal of Transsib Railway Studies. 2016. No. 3 (27). Pp. 31–38. ISSN 2220–4245.
2. Zhebanov A. V. Full cycle of cistern operation with heat insulation: from plating to utilization [Polnyy tsikl raboty tsisterny s teploizolyatsiyey: ot naneseniya pokrytiya do utilizatsii] // Transport of the Urals. 2011. No. 1 (28). Pp. 51–54. ISSN 1815–9400.
3. Margolis L. Ya. Heterogeneous catalytic oxidation of hydrocarbons [Geterogennoe kataliticheskoe okislenie uglevodorodov]. Leningrad : Chemistry, 1967. 364 p.
4. Krylov O. V. Deep catalytic oxidation of hydrocarbons [Glubokoe kataliticheskoe okislenie uglevodorodov]. Moscow : Science, 1981. 199 p.
5. Zhebanov A. V., Moiseev V. I. Preservation of thermophysical properties of petroleum products transported in tank cars when transferring them to a stratified state [Sokhranenie teplofizicheskikh svoystv perevozymykh v vagonakh-tsisternakh nefteproduktov pri perevode ikh v stratifitsirovannoe sostoyanie] // Science and Education for Transport. 2017. No. 1. Pp. 27–29.
6. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Heat transfer [Teploperedacha]. Moscow ; Leningrad : Energy, 1965. 423 p.
7. Dunn P., Reay D. Heat pipes [Teplovye truby]. Moscow : Energy, 1979. 272 p.
8. Zhebanov A. V. The interaction between the heat-insulating layer of the tank car and the environment with regard to ecological safety and waste utilization [Vzaimodeystvie teploizolyatsionnogo sloya tsisterny s okruzhayushhey sredoy s tochki zreniya ekologicheskoy bezopasnosti i s uchetom utilizatsii otkhodov] // Bulletin of transport of the Volga region. 2012. No. 4 (34). Pp. 19–23. ISSN 1997–0722.

Объем статьи 0,45 авторских листа

УДК 629.4.018

Татьяна Анатольевна Антропова, доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация автомобилей»  
Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАГРУЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Tatyana Anatolyevna Antropova, Associate Professor, Design and Operation of Automobiles Department,  
Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Analysis of existing methods for calculating loading of parts at assessment of fatigue strength

#### Аннотация

Проанализированы методы, которые используются для определения нагрузки на детали при испытаниях на усталостную прочность. В качестве примера по двум применяемым в настоящее время способам рассчитано нагружение вертикальных стоек полувагона. При сравнении полученных результатов установлено, что рассчитанные значения сил и амплитуд нагружения стоек различаются почти в 3 раза, выявлены ключевые отличия применяемых методов. Предложено усовершенствовать методику расчетов и разработать единственный достоверный способ определения сил и амплитуд нагружения деталей, подвергаемых испытаниям на усталостную прочность.

**Ключевые слова:** метод испытаний, сопротивление усталости, узел заделки стойки, полувагон, испытательная нагрузка, режим испытаний.

#### Summary

The paper shows the results of analysis of methods used for determination of loads on parts of fatigue strength tests. As an example, the author has calculated loading of open-box car vertical body posts by means of two currently used methods. At comparison of gained results the author has established that calculated values of forces and amplitudes of body posts loading differ almost 3 times. Consequently, key differences of the methods have been revealed. As a result, it is proposed to improve a method of calculation and to develop the only reliable method of determination of forces and amplitudes of loading of parts that are tested on fatigue strength.

**Keywords:** test method, fatigue strength, body post fitting joint, open-box car, test loading, test mode.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-44-47

Одним из наиболее важных критериев при оценке конструкции подвижного состава служат результаты испытаний. Испытания грузовых и пассажирских вагонов локомотивной тяги, предназначенных для железных дорог общего и необщего пользования колеи 1520 мм, проводят в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 33788-2016 [1]. Основные виды — это испытания на сопротивление усталости, которые делятся на ускоренные в полном объеме (полные испытания) и ускоренные в сокращенном объеме (сокращенные испытания).

Главными задачами полных испытаний являются определение предела выносливости составных частей несущей конструкции вагона и его оценка по коэффициенту запаса сопротивления усталости, а сокращенных испытаний — достижение несущей конструкции вагона или ее составными частями заданного числа циклов нагружения без появления усталостной трещины.

В соответствии с ГОСТ 33788-2016 [1] испытания на сопротивление усталости проводят на боковых рамах и надрессорных балках, а также, если это предусмотрено стандартами или конструкторской документацией, на несущих конструкциях вагона и их составных частях. Схемы приложения сил к составным частям несущей конструкции вагона обосновываются расчетом. В практике расчетов используются ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» [2] или «Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [3]. Однако необходимо отметить, что действующие нормативные и рекомендательные документы не содержат четких указаний, каким образом их следует применять. Поэтому в статье выполнен анализ и сделано сравнение подходов, которые используются при расчетах несущих элементов конструкций грузовых вагонов.

В качестве примера рассмотрим узлы заделки стоек (шкворневой и промежуточной) полувагона 12-196-02 [4], предназначенного для перевозки массовых неагрессивных насыпных непылевидных грузов и имеющего максимальную расчетную статическую нагрузку от колесной пары на рельсы 245 кН (25 тс). Образцы макетов узлов заделки стоек (шкворневой и промежуточной) и схема их нагружения представлены на рис. 1.

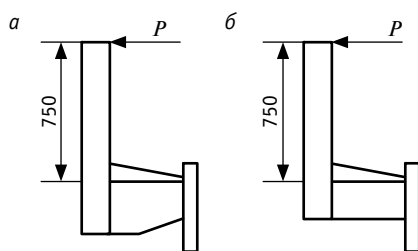


Рис. 1. Схема нагружения узла заделки шкворневой (а) и промежуточной (б) стоек полувагона 12-196-02

Основные параметры и размеры опытного полувагона при расчете соответствуют значениям, указанным в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры полувагона

Параметр	Значение параметра
Грузоподъемность, т, не более	75
Масса тары, т	24,5±0,5
Объем кузова, м <sup>3</sup>	94
Длина полувагона по осям сцепления автосцепок, мм	13920
Длина рамы по концевым балкам, мм	12700
База полувагона, мм	8650
Высота полувагона от уровня головок рельсов, мм:	
до верхней обвязки	3800
до оси автосцепки	1040–1080
Ширина полувагона по стойкам, мм	3198
Внутренние размеры кузова, мм:	
длина в свету по верхним обвязкам	13030
ширина по верхним обвязкам в районе промежуточных и шкворневых стоек	3958
высота по верхней обвязке	2436
Количество осей, шт.	4
Количество разгрузочных люков, шт.	14
Максимальная расчетная статическая осевая нагрузка, кН (тс)	245 (25)
Статическая погонная нагрузка, кН/м (тс/м), не более	70,4 (7,18)
Габарит по ГОСТ 9238-2013 [5]:	
кузова	1-Т
тележки (мод. 18-194-1)	02-ВМ
Конструкционная скорость, км/ч	120

Испытательные нагрузки устанавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 33211-2014 [2]. Согласно п. 4.1.6 [2], для проведения испытаний на сопротивление усталости вертикальных стоек кузова полувагона необходимо определить давление от силы тяжести перевозимого груза, действующее на стенки кузова,  $\bar{P}$ , Па, по формуле

$$\bar{P} = \frac{\gamma \cdot g \cdot y \cdot \sin^2(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — плотность груза, кг/м<sup>3</sup>, которую принимают равной частному от деления грузоподъемности вагона на объем кузова, а для некоторых конкретных грузов — по табл. 2 [2] (например, для каменного угля  $\gamma = 0,85$  т/м<sup>3</sup>);

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

$y$  — расстояние вниз от поверхности груза до уровня, на котором определяют давление, м;

$\alpha$  — плоский угол наклона стенки кузова к горизонту, рад;

$\varphi$  — угол естественного откоса груза, образуемый поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью, рад; принимают по табл. 2 [2];

$\delta$  — плоский угол трения груза о стенки кузова, рад; принимают по табл. 2 [2] для металлических стенок;

$\beta$  — плоский угол наклона поверхности груза к горизонту, рад.

Величину максимальной вертикальной нагрузки на стойки кузова  $P_{\text{в}}$ , Па, находят по формуле

$$P_{\text{в}} = (1 + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{ф}} \cdot \bar{P}_{\text{в}}, \quad (2)$$

где  $\bar{P}_{\text{в}}$  — расчетная нагрузка от давления насыпного (или скатывающегося) груза на стенки кузова  $\bar{P}$ , Па, определяемого по формуле (1), с учетом конструктивных размеров кузова и числа стоек;

$k_{\text{ф}}$  — коэффициент форсирования испытательной нагрузки;

$k_{\text{д}}$  — вероятное значение коэффициента динамической добавки, определяемое по формуле

$$k_{\text{д}} = \zeta \frac{\bar{k}_{\text{д}}}{\beta} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - \psi}}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  — коэффициент, учитывающий влияние центробежной силы в кривых участках пути, принимают  $\zeta = 1,2$ ;

$\beta$  — параметр распределения, принимают  $\beta = 1,13$ ;

$\psi$  — расчетная односторонняя вероятность, принимают  $\psi = 0,97$ ;

$\bar{k}_{\text{д}}$  — среднее вероятное значение коэффициента динамической добавки,

$$\bar{k}_{\text{д}} = A + \frac{B \cdot (V - V_0) \cdot b}{(f_1 - 0,5 f_2)}, \quad (4)$$

где  $A = 0,05$ ;  $B = 3,6 \cdot 10^{-4}$  м/(м/с);  $V_0 = 15$  м/с;

$V$  — средняя скорость движения вагона, м/с;

$b$  — коэффициент, учитывающий влияние числа осей  $n$  в тележке или группе тележек под одним концом вагона,  $b = (n + 2)/(2n)$ ;

$f_1$  — расчетный статический прогиб рессорного подвешивания вагона с максимальной расчетной массой (при неравномерном распределении силы тяжести кузова вагона по тележкам принимают минимальное значение расчетного статического прогиба), м (принимаем  $f_1 = 0,0655$  м);

$f_2$  — наибольший статический прогиб несущей конструкции вагона под действием силы тяжести груза, м (принимаем  $f_2 = 0,004$  м).

Теперь рассмотрим определение испытательных нагрузок в соответствии с требованиями [3]. По п. 2 и табл. 2.3 [3] для проведения испытаний на сопротивление усталости вертикальных стоек кузова полувагона необходимо определить давление от силы тяжести перевозимого груза, действующее на стенки кузова.

Величину максимальной вертикальной нагрузки на стойки кузова  $P_B^{\max}$ , Па, находят по формуле

$$P_B^{\max} = k_{\phi} \cdot P_B, \quad (5)$$

где  $P_B$  — расчетная нагрузка от давления насыпного (или скапывающегося, или жидкого) груза на стенки кузова  $P'$ , Па, с учетом конструктивных размеров кузова и числа стоек.

Давление  $P'$  определяют по формуле

$$\overline{P'} = \frac{(1 + k_{\text{д}}^{\Gamma}) \cdot \gamma \cdot g \cdot y \cdot \sin(\alpha + \varphi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}, \quad (6)$$

где  $k_{\text{д}}^{\Gamma}$  — коэффициент вертикальной динамики с учетом плавности хода вагона,

$$k_{\text{д}}^{\Gamma} = k'_{\text{д}} \cdot (1 + \zeta), \quad (7)$$

где  $\zeta$  — коэффициент, который рекомендуется принимать равным 0,2 [3];

$k'_{\text{д}}$  — наибольшее вероятное значение коэффициента динамической добавки,

$$k'_{\text{д}} = \frac{\overline{k'_{\text{д}}}}{\beta} \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{1 - P(k_{\text{д}})}}, \quad (8)$$

где  $P(k_{\text{д}})$  — расчетная односторонняя вероятность, принимают равной 0,97;

$\overline{k'_{\text{д}}}$  — среднее вероятное значение коэффициента динамической добавки,

$$\overline{k'_{\text{д}}} = A + \frac{B \cdot (V - 15) \cdot b}{f_{\text{ст}}}, \quad (9)$$

где  $f_{\text{ст}}$  — статический прогиб рессорного подвешивания, м.

Особое внимание следует уделить параметру  $\varphi$  — углу естественного откоса груза, образуемого поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью. В ГОСТ 33211-2014 [2] этот параметр выбирают по табл. 2, как описано выше. А согласно нормам [3] угол устанавливают в зависимости от расчетных режимов. По III расчетному режиму рассматривается относительно частое возможное сочетание умеренных по величине нагрузок, характерное для нормальной работы вагона в движущемся поезде. Основное требование при расчете по этому режиму — не допустить усталостного разрушения узла или детали. По III режиму угол  $\varphi$  принимают равным 0,2 от значений таблицы на с. 28–29 [3].

Коэффициент асимметрии цикла реального процесса в эксплуатации  $r$  (с учетом изменения давления от силы тяжести перевозимого груза при действии боковых нагрузок на кузов вагона) принимаем 0,45–0,55. При  $r = 0,50$  имеем  $P_B^{\min} = P_B^{\max} \cdot r$ .

Таким образом, для форсированного режима испытаний вертикальной промежуточной или шкворневой стоек кузова полувагона имеем среднюю нагрузку цикла  $P_m = (P_B^{\max} + P_B^{\min})/2$ , амплитудное значение силы  $P_a = (P_B^{\max} - P_B^{\min})/2$ .

Результаты расчетов давления от силы тяжести перевозимого груза, максимальных значений сил нагружения и амплитуд по двум действующим нормативным документам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета нагрузок для проведения испытаний на сопротивление усталости вертикальных стоек кузова полувагона

Параметр	Расчетное значение по	
	ГОСТ 33211–2014 [2]	нормам [3]
Среднее вероятное значение коэффициента динамической добавки $k_{\text{д}}$	0,154	0,150
Коэффициент динамической добавки $k_{\text{д}}$	0,345	0,336
Давление от силы тяжести перевозимого груза, действующее на стенки кузова, $\overline{P}$ , Па	4866,79	25910,02
<i>Стойка промежуточная</i>		
Максимальная нагрузка $P_B$ , тс	1,832	5,164
Средняя нагрузка $P_m$ , тс	1,374	3,873
Амплитудная нагрузка $P_a$ , тс	0,458	1,291
<i>Стойка шкворневая</i>		
Максимальная нагрузка $P_B$ , тс	2,020	5,692
Средняя нагрузка $P_m$ , тс	1,515	4,269
Амплитудная нагрузка $P_a$ , тс	0,505	1,423

В результате расчета по ГОСТ 33211-2014 [2] значения силы и амплитуды нагружения, которые необходимо устанавливать при испытаниях шкворневой стойки, составляют  $1,515 \pm 0,505$  тс, для промежуточной —  $1,374 \pm 0,458$  тс. А согласно нормам [3] при испытании стоек необходимо нагружать их на величину  $4,269 \pm 1,423$  и  $3,873 \pm 1,291$  тс соответственно.

## ВЫВОДЫ

1. Угол естественного откоса груза, образуемый поверхностью свободно насыпанного груза с горизонтальной плоскостью, оказывает значительное влияние на итоговую величину давления, действующего на стенки кузова вагона.

2. Значения сил и амплитуд нагружения стоек, рассчитанных согласно документам [2, 3] по III режиму (применяется для расчета сопротивления усталости), различаются между собой практически в 3 раза.

3. Отсутствие в формуле (6) квадрата у синуса в числителе при определении давления по методу, изложенному в [3], также принципиальное отличие от формулы (1), применяемой в [2].

4. Выявленные существенные различия между применяемыми расчетными методами и сравнение полученных

результатов дают основание утверждать, что необходимо усовершенствовать методику расчетов и разработать единственный достоверный способ определения сил и амплитуд нагружения деталей, подвергаемых испытаниям на усталостную прочность.

## Литература

1. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. Москва : Стандартинформ, 2016. 41 с.
2. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва : Стандартинформ, 2016. 54 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Москва : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. 212 с.
4. Уралвагонзавод. URL: <http://uralvagonzavod.ru> (дата обращения: 17.12.2020).
5. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Москва : Стандартинформ, 2014. 173 с.

## References

1. GOST 33788-2016. Freight and passenger railcars. Methods of testing structural strength and dynamic performance [Vagony грузовые i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost' i dinamicheskie kachestva]. Moscow : Standardinform, 2016. 41 p.
2. GOST 33211-2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities [Vagony грузовые. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam]. Moscow : Standardinform, 2016. 54 p.
3. Norms for calculation and design of cars of 1520 mm gauge railways of Ministry of Railways (non-self-propelled) [Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)]. Moscow : GosNIIV ; VNIIZhT, 1996. 212 p.
4. Uralvagonzavod [Uralvagonzavod]. URL: <http://uralvagonzavod.ru> (access date: 17.12.2020).
5. GOST 9238-2013. Construction and rolling stock clearance diagrams [Gabarity zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava i priblizheniya stroeniy]. Moscow : Standardinform, 2014. 173 p.

Объем статьи 0,34 авторских листа

УДК 625.151.033

**Борис Эйнихович Глюзберг, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией научного центра «Путевая инфраструктура и вопросы взаимодействия колесо — рельс» АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия,**

**Алексей Алексеевич Локтев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,**

**Ирина Викторовна Шишкина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,**

**Михаил Евгеньевич Березовский, аспирант Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия**

## ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРРЕЛЬСОВЫМ УЗЛАМ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

**Boris Eynikhovich Glyuzberg, DSc in Engineering, Professor, Head of Laboratory of Scientific Centre Track Infrastructure and Issues of Wheel — Rail Interaction, JSC VNIIZhT, Moscow, Russia,**

**Alexey Alexeevich Loktev, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Head of Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,**

**Irina Viktorovna Shishkina, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Construction Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,**

**Mikhail Evgenyevich Berezovskiy, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia**

## Requirements for check-rail switch joints

### Аннотация

Статья посвящена проблеме обеспечения прохождения колесных пар подвижного состава с наименьшим расстройством крестовинного узла стрелочного перевода. Сформулированы критерии, представляющие собой необходимые и достаточные требования, на основании которых могут быть определены допустимые величины износа контррельсов и размеры их желобов. Представлена методика расчета прохождения экипажей по крестовинному узлу, оснащённому контррельсами, не связанными с ходовыми рельсами. При помощи экспериментально-расчетного метода выделены этапы определения напряженно-деформированного состояния контррельсов. Проанализирована работа контррельсов, выполненных из спецпрофилей типа РК, которые крепятся к ходовому рельсу через вкладыши. Дана оценка преимуществ применения контррельсов, крепление которых не связано с ходовым рельсом. Так как методика расчета контррельсов для работы в других узлах стрелочного перевода похожа, проанализирована работа контррельса-протектора для стрелочных переводов, рассмотрены эффективность и недостатки его использования.

**Ключевые слова:** контррельсовый узел, контррельс, не связанный с ходовым рельсом, требования, критерии, износ, размер желоба, контррельс-протектор.

### Summary

The paper is devoted to a problem of passing of rolling stock wheelsets with minimum deterioration of a crossing joint of a switch. The authors have formulated criteria representing necessary and sufficient requirements, on the basis of which it is possible to determine permissible values of check-rails wear and dimensions of their gutters. The paper also presents a method for calculation of rolling stock passage on the crossing joint equipped with check-rails that are not connected to running rails. With the use of the experimental and calculation method the authors have highlighted stages for determination of stress-strain condition of check-rails. They have analysed the operation of check-rails made of RK special profiles that are mounted to a running rail by inserts. As a result, the authors have assessed the advantages of application of check-rails with mounts that are not connected to running rails. Since the method of check-rails calculation for the operation in other parts of the switch is similar, they have analysed the operation of a protector check-rail for switches and discussed the efficiency and disadvantages of its application.

**Keywords:** check-rail structure, check-rail that is not attached to running rail, requirements, criteria, wear, width of flangeway, protector check-rail.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-48-52

**В** состав стрелочных переводов наиболее массовых конструкций с «жесткими» крестовинами входят контррельсы. Они предназначены для того, чтобы предотвращать уход колеса,двигающегося по крестовине, в желоб, не соответствующий направлению движения, или вкатывание его на сердечник крестовины [1].

Конструкция контррельсовых узлов с контррельсами, не связанными с ходовыми рельсами, дает возможность регулировать желоб в эксплуатации и тем самым существенным образом увеличивать ресурс контррельсовых узлов [2]. Соответственно возникает вопрос о нормировании допустимого положения контррельса в узле, износа и связанных с этим параметром размеров желобов контррельса. Изношенный контррельс, так же как и новый, должен обеспечивать выполнение требований, предъявляемых к контррельсовым узлам.

Поскольку контррельсы в составе стрелочных переводов применяются для обеспечения безопасного прохождения колесных пар подвижного состава по крестовинным узлам (рис. 1), а также другим узлам, включающим в себя контррельсы, главный критерий — это безопасность. Параметры контррельса и контррельсового узла в целом должны обеспечивать прохождение колесных пар без ударов и набеганий колес на острие сердечника крестовины (позиция 5 на рис. 1), на «нерабочий» усовик до горла (по-



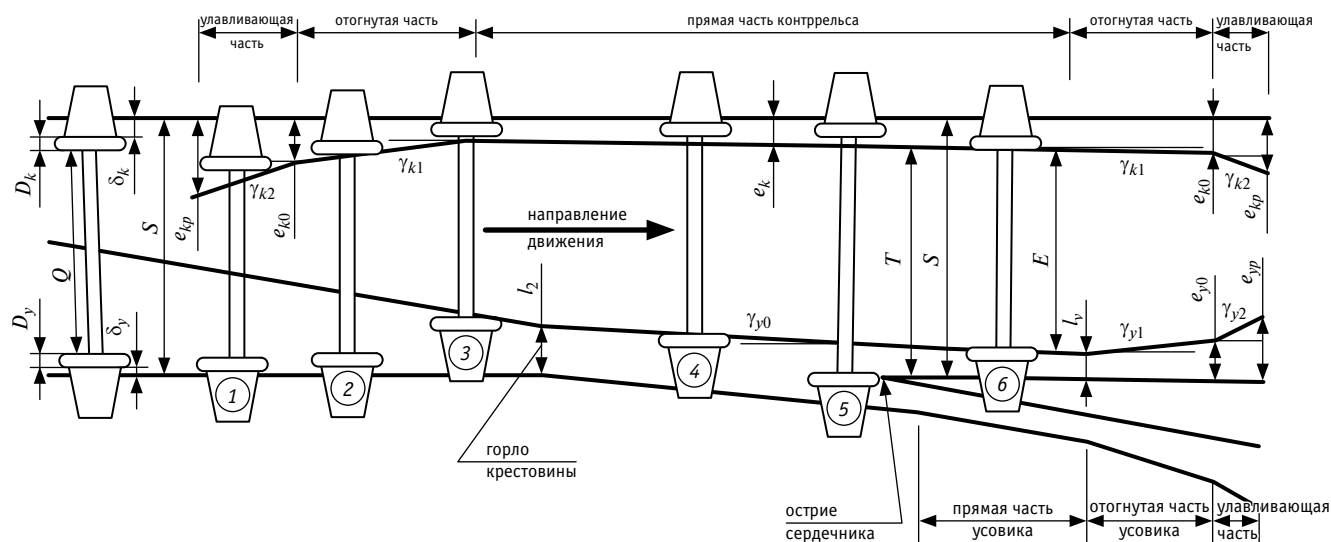


Рис. 1. Прохождение колесных пар по крестовинному узлу

зиция 3), на улавливающую часть усовика, улавливающую часть контррельса (позиция 1), предотвращать возможность распора колесных пар между контррельсом и «нерабочим» усовиком (позиция б). Нежелательными являются случаи набегающих колес на «нерабочий» усовик между горлом крестовины и ее острием (позиция 4 на рис. 1).

На рис. 1 обозначено:  $D_k$ ,  $D_y$  — толщина левого и правого гребня колеса соответственно, мм;  $Q$  — расстояние между гребнями колесной пары, мм;  $\delta_k$  — зазор между левым гребнем колеса и ходовым рельсом, мм;  $\delta_y$  — зазор между правым гребнем колеса и усовиком крестовины, мм;  $S$  — расстояние по прямому направлению между усовиком крестовины и ходовым рельсом, а также между сердечником и ходовым рельсом, мм;  $e_{kr}$ ,  $e_{k0}$  — желоб улавливающей части и отгиба контррельса соответственно, мм;  $\gamma_{k1}$ ,  $\gamma_{k2}$  — угол улавливающей части и отгиба контррельса соответственно, град;  $l_2$ ,  $l_y$  — ширина горла и желоба крестовины соответственно, мм;  $T$  — расстояние между сердечником и рабочей гранью контррельса, мм;  $E$  — расстояние между рабочей гранью контррельса и «нерабочим» усовиком, мм;  $\gamma_{y1}$ ,  $\gamma_{y2}$  — угол улавливающей части и отгиба крестовины соответственно, град;  $e_{yr}$ ,  $e_{y0}$  — желоб улавливающей части и отгиба усовика крестовины, мм.

Третий критерий — обеспечение прочности самого контррельса, т.е. воздействие колес не должно приводить к появлению опасных дефектов или изломов контррельса. Этот критерий проверяется путем сравнения напряжений, возникающих в наиболее нагруженной части контррельса, с допускаемыми значениями.

Перечисленные выше критерии являются необходимыми и достаточными требованиями, на основании которых должны быть сформированы допустимые величины износа контррельсов и размеры их желобов.

Уровни динамических эффектов, возникающих при прохождении экипажей по стрелочному переводу, в значительной степени зависят от взаимного положения колесных пар и эле-

ментов стрелочного перевода, которое определяется сочетанием их основных геометрических размеров [3]. На каждом конкретном крестовинном узле ширина колеи в его пределах имеет величину  $S$ , размеры желобов контррельсов в прямой части, в начале отгибов и в улавливающей части —  $e_{kr}$ ,  $e_{k0}$ ,  $e_{kr}$  соответственно (см. рис. 1), а также размеры желобов крестовины в горле, прямой части усовиков в начале отгиба и в улавливающей части — соответственно  $e_{yr}$ ,  $e_{y0}$ ,  $e_{yr}$ .

Пусть колесная пара, входящая на крестовинный узел, имеет расстояние между внутренними гранями колес по низу  $Q$ , толщину гребней колес (с учетом выкружки на тыльной стороне) со стороны усовика  $D_y$ , а со стороны контррельса  $D_k$ . При подходе к крестовинному узлу колесная пара имеет зазор между гребнем колеса и рабочей гранью ходового рельса при контррельсе  $\delta_k$  и аналогичный зазор — между рабочей гранью усовика и гребнем второго колеса  $\delta_y$ . В зависимости от конкретных значений всех названных размеров при проходе колесной пары по крестовинному узлу возможны следующие ситуации [4].

Набегание тыльной части колеса,двигающегося по ходовому рельсу, на контррельс в пределах его улавливающей части. Условие возникновения этого явления можно записать как

$$(\delta_k + D_k) > e_{k0}. \quad (1)$$

Набегание тыльной части колеса,двигающегося по ходовому рельсу, на контррельс в пределах его отогнутой части. Условие возникновения этого явления:

$$e_{k0} \geq (\delta_k + D_k) \geq e_{kr}. \quad (2)$$

Набегание тыльной части колеса,двигающегося по крестовине, на усовик крестовины до горла. Условие такого прохода колесной пары:

$$(\delta_y + D_y) > e_r. \quad (3)$$

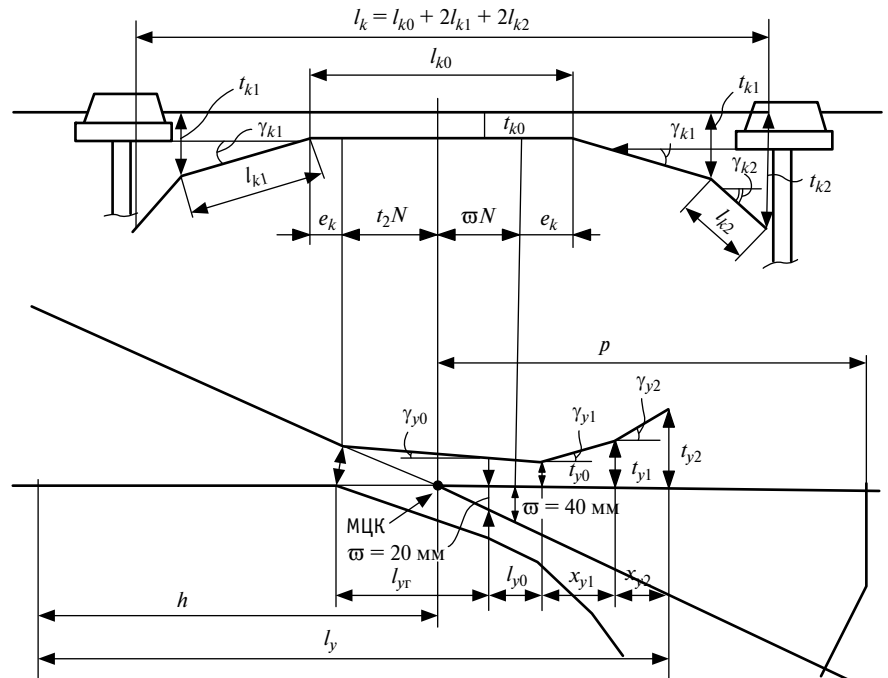
$$e_y \leq (\delta_k + D_k) < e_\Gamma. \quad (4)$$

$$Q + D_k + D_v + \delta_k \geq S - e_k = T. \quad (5)$$

$$Q \leq S - e_k - e_y = E. \quad (6)$$

$$(\delta_k + D_k) > e_{v0}; \quad (7)$$

$$e_{y0} \geq (\delta_y + D_y) \geq e_y. \quad (8)$$



$$\begin{cases} l_{k0} = (t_\Gamma + w_c) \cdot N + 2e_k \\ l_{k1} = \frac{t_{k1} - t_{k0}}{\sin \gamma_{k1}} \\ l_{k2} \geq [l_{k2}]_{\min} \\ l_k = l_{k0} + 2l_{k1} + 2l_{k2} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\sin \gamma_{k1} = \frac{W_k}{V_n}, \quad (10)$$

В конструкции стрелочных переводов, использующей контррельсы из спецпрофилей РК, которые крепятся к ходовому

рельсу через вкладыши, регулировка желобов крайне затруднительна и, как правило, в эксплуатации не выполняется [10]. Если износ контррельса не позволяет обеспечить требуемые нормами размеры желобов и безопасность, то контррельс вместе с рельсом крестовины подлежит замене.

Использование контррельсовых узлов с контррельсами, не связанными с ходовыми рельсами, позволяет регулировать размеры желобов в процессе эксплуатации за счет установки прокладок между контррельсом и опорной частью контррельсовых башмаков. Это дает возможность продлить срок службы контррельсов, так как их износ уже не будет препятствием для установления нормируемых величин размеров желобов и для обеспечения безопасности движения.

В связи с тем что воздействие колес по длине контррельсов неодинаковое, последние изнашиваются неравномерно. Наибольшему износу подвержена средняя часть, поэтому при постановке регулировочных прокладок углы отогнутой части контррельса увеличиваются [11], соответственно «эффект удара», определяемый по формуле (10), возрастает.

Наибольший износ контррельса будет лимитироваться предельно допустимым углом набегания колес на контррельс. Этот критерий проверяется сравнением напряжений, возникающих в наиболее нагруженной части контррельса, с допускаемыми напряжениями, МПа:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma].$$

По мере износа контррельса размеры его поперечного сечения изменяются. При этом составляющие напряжений от изгиба и кручения возрастают, а геометрические характеристики сечения (моменты инерции и момент сопротивления) снижаются [12]. При решении вопроса о допустимом износе контррельса необходимо исходить из необходимости обеспечения требований прочности не только для нового, но и для изношенного контррельса. Воздействие колес не должно приводить к появлению опасных дефектов или изломов контррельса. Провести серию испытаний, охватывающую возможные условия работы контррельсов с различным износом при разных сочетаниях размеров колеи и желобов дорожного и практически не реально. Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния контррельсов целесообразно пользоваться экспериментально-расчетным методом. Такое исследование выполняется в два этапа.

Первый этап — динамико-прочностные испытания с подробным изучением параметров напряженно-деформированного состояния контррельсов. Цель этого этапа — получить данные о наиболее нагруженных сечениях контррельса и соотношения, позволяющие проверить адекватность моделей, которые будут использоваться в дальнейшем для расчетов прочности контррельса и узлов его прикрепления к брускам.

Второй этап — расчеты напряженно-деформированного состояния контррельсов при различных сочетаниях размеров узлов и различном износе самого контррельса. Цель этапа — проверка прочности контррельса и узлов его прикрепления к брускам, а также определение допускаемой величины износа контррельсов по условиям прочности. Простейшая модель контррельса — неразрезная балка конечной длины на  $N$  опо-

рах. Она позволяет определить необходимые расчетные величины напряжений в контррельсе, однако получаемые данные приводят к неоправданному запасу прочности и излишним ограничениям величин допустимого износа контррельсов. Значительно более точные результаты дают модели, основанные на методе конечных элементов, соответственно при расчетах целесообразно использовать именно их [13].

Контррельсы-протекторы устанавливаются на стрелочных переводах перед острьями в зоне переднего вылета рамного рельса. Они предназначены для улучшения условий движения по стрелкам стрелочных переводов и уменьшения износа острьков и рамных рельсов на стрелочных переводах, основное движение по которым осуществляется на ответвление в противоположном направлении. Контррельсы-протекторы целесообразно также устанавливать на симметричных стрелочных переводах подгорочных парков на направлениях преимущественного движения.

Конструкция контррельсов-протекторов и их узлов прикрепления к брускам такая же, как и у контррельсов крестовинных узлов [14]. Размеры желобов контррельсов-протекторов и допускаемый износ контррельсов должны определяться по тем же методикам, которые используются для контррельсов крестовинных узлов.

Самая оптимальная длина направляющей части контррельса-протектора — на 10 % больше расстояния между осями колесных пар тележки наиболее массового подвижного состава. На практике длина направляющей части контррельса-протектора ограничивается возможностями его размещения в пути. Чаще всего контррельсы-протекторы имеют длину, позволяющую разместить их в переднем вылете рамного рельса стрелочного перевода [15]. В этом случае эффект их использования снижается, однако целесообразность применения контррельсов-протекторов сохраняется.

Эффективность использования контррельсов-протекторов заключается в увеличении сроков службы комплекта «рамный рельс — криволинейный остряк» по наработке на допускаемый износ от 3 до 8 раз.

Недостатком контррельсов-протекторов является возможная необходимость ограничивать скорости движения по прямому направлению стрелочного перевода из-за больших углов набегания колес на отогнутую часть контррельса (ограничения по динамико-кинематическим критериям). В первую очередь это относится к укороченным контррельсам-протекторам, у которых угол отгиба  $\gamma_{k1}$  может значительно превышать аналогичные углы отводов контррельсов крестовинных узлов.

В целом можно сделать такие выводы.

1. Требуется пересмотреть нормы содержания контррельсов, что необходимо не только для уменьшения износа крестовин, но и для предотвращения ряда дефектов, свойственных данному элементу стрелочного перевода.

2. Следует изучить возможность увеличения длины контррельса в сторону стрелки стрелочного перевода для благоприятного прохождения колесных пар по крестовинному узлу.

3. Для расчета возможного изменения параметров желобов улавливающей части и отгиба контррельса необходимо использовать математическое моделирование.

## Литература

1. Глюзберг Б. Э., Калачев А. М., Королев В. В. Повышение эксплуатационных качеств крестовин стрелочных переводов за счет изменения их геометрии в контакте «колесо — рельс» // Наука и техника транспорта. 2004. № 1. С. 70–81. ISSN 2074–9325.
2. Королев В. В. Сравнительные исследования напряженного состояния контрельсов стрелочных переводов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2009. № 6. С. 38–39. ISSN 2223–9731.
3. Этапы проектирования технических средств инфраструктуры железных дорог / Б. Э. Глюзберг, Н. В. Зверкова, В. В. Королев, И. В. Шишкина // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 2. С. 20–22. ISSN 0131–5765.
4. Королев В. В. Контрельс-протектор для стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 10. С. 21–24. ISSN 0131–5765.
5. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Увеличение ресурса крестовин стрелочных переводов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сборник материалов XV научно-технической конференции. Москва : Изд-во РУТ-МИИТ, 2018. С. 186–187.
6. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Элементы стрелочных переводов для российских железных дорог // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 1. № 14. С. 17–20.
7. Королев В. В. Новый контрельс для стрелочных переводов // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2014. № 10. С. 46–48.
8. Королев В. В. Разработка нового контрельса, не связанного с ходовым рельсом // Безопасность движения поездов : сборник трудов 11-й научно-практической конференции. Москва : Изд-во МИИТ, 2010. С. 14–36.
9. Шишкина И. В. Цельнолитая подкладка с подушкой для стрелочных переводов // Наука и техника транспорта. 2019. № 1. С. 37–51. ISSN 2074–9325.
10. Шишкина И. В. Организация раздельного движения по стрелочным переводам // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 1. № 14. С. 26–30.
11. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 621–638. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_60).
12. Korolev V. Selecting a turnout curve form in railroad switches for high speeds of movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 156–172. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_15).
13. Shishkina I. Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 834–844. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_82](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_82).
14. Counter-rail special profile for new generation railroad switch / B. Glusberg, A. Savin, A. Loktev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 571–587. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_54).
15. Deformations and life periods of the switch chairs of the rail switches / B. Glusberg, A. Loktev, V. Korolev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 184–196. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_17).

## References

1. Glyuzberg B. E., Kalachev A. M., Korolev V. V. Increase of operational properties of switch crossings by the change of their geometry in «wheel — rail» contact [Povyshenie ekspluatatsionnykh kachestv krestoviny strelochnykh perevodov za schet izmeneniya ikh geometrii v kontakte «koleso — rel's»] // Science and technology in transport. 2004. No. 1. Pp. 70–81. ISSN 2074–9325.
2. Korolev V. V. Comparative study of stress condition of switch check-rails [Sravnitel'nye issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya kontr'el'sov strelochnykh perevodov] // Railway Research Institute Bulletin. 2009. No. 6. Pp. 38–39. ISSN 2223–9731.
3. Stages of designing technical means of railway infrastructure [Etapy proektirovaniya tekhnicheskikh sredstv infrastruktury zheleznykh dorog] / B. E. Gluzberg, N. V. Zverkova, V. V. Korolev, I. V. Shishkina // Railway Track and Facilities. 2018. No. 2. Pp. 20–22. ISSN 0131–5765.
4. Korolev V. V. Protector check-rail for switches [Kontrel's-protector dlya strelochnykh perevodov] // Railway Track and Facilities. 2017. No. 10. Pp. 21–24. ISSN 0131–5765.
5. Glyuzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Increase of life of switch crossings [Uvelichenie resursa krestoviny strelochnykh perevodov] // Modern problems of design, construction and operation of railway tracks : collection of proceedings of XV research and technical conference. Moscow : Publishing House of MIIT, 2018. Pp. 186–187.
6. Glyuzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Elements of switches for Russian railways [Elementy strelochnykh perevodov dlya rossiyskikh zheleznykh dorog] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2019. Vol. 1. No. 14. Pp. 17–20.
7. Korolev V. V. New check rail for switches [Novyy kontr'el's dlya strelochnykh perevodov] // Modern problems of railway transport work improvement. 2014. No. 10. Pp. 46–48.
8. Korolev V. V. Development of a new check-rail not connected to a running rail [Razrabotka novogo kontr'el'sa, ne svyazannogo s khodovym rel'som] // Safety of railway operation: proceedings of the 11th research and practice conference. Moscow : Publishing House of MIIT, 2010. Pp. 14–36.
9. Shishkina I. V. Solid plate with pad for switches [Tsel'nolitaya podkladka s podushkoy dlya strelochnykh perevodov] // Science and technology in transport. 2019. No. 1. Pp. 37–51. ISSN 2074–9325.
10. Shishkina I. V. Organization of separate passing of switches [Organizatsiya razdel'nogo dvizheniya po strelochnym perevodam] // Implementation of modern structures and advanced technologies in the track economy. 2019. Vol. 1. No. 14. Pp. 26–30.
11. Korolev V. Guard Rail Operation of Lateral Path of Railroad Switch // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 621–638. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_60](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_60).
12. Korolev V. Selecting a turnout curve form in railroad switches for high speeds of movement // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 156–172. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_15).
13. Shishkina I. Determination of Contact-Fatigue of the Crosspiece Metal // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 834–844. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_82](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_82).
14. Counter-rail special profile for new generation railroad switch / B. Glusberg, A. Savin, A. Loktev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. Pp. 571–587. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19756-8_54).
15. Deformations and life periods of the switch chairs of the rail switches / B. Glusberg, A. Loktev, V. Korolev et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1258. Pp. 184–196. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_17).

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 691.32

**Борис Владимирович Гусев**, член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), президент Российской инженерной академии (РИА), Москва, Россия,

**Лев Михайлович Добшиц**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

**Алина Андреевна Николаева**, старший преподаватель кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Boris Vladimirovich Gusev**, Corresponding Member of the Academy of Sciences of Russia, DSc in Engineering, Professor, Head of Building Materials and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT), President of Russian Academy of Engineering (RAE), Moscow, Russia,

**Lev Mikhaylovich Dobshits**, DSc in Engineering, Professor, Building Materials and Technologies Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

**Alina Andreevna Nikolaeva**, Senior Lecturer, Buildings on Transport Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

## Assessment of vibrocompaction quality of concrete mixtures for making reinforced-concrete products

### Аннотация

Статья посвящена определению влияния параметров вибрационного воздействия при уплотнении жестких бетонных смесей, предназначенных для изготовления железобетонных шпал. При некачественном уплотнении бетонной смеси происходит неравномерное распределение физико-механических показателей по длине и ширине изделий, что негативно сказывается на их дальнейшей эксплуатации. В статье представлены исследования по определению параметров вибрационного воздействия при уплотнении бетонных смесей и даны рекомендации по улучшению работы существующих технологических линий.

**Ключевые слова:** виброуплотнение, бетон, железобетонные шпалы, прочность, удобоукладываемость.

### Summary

The paper is devoted to determination of influence of vibration influence parameters at compaction of hard concrete mixtures designed for making reinforced-concrete sleepers. At poor quality compaction of a concrete mixture there is an uneven distribution of physical and mechanical indicators by length and width of products that negatively affects their future operation. The paper presents studies on determination of vibration influence parameters at compaction of concrete mixtures and provides recommendations on improvement of operation of existing technological lines.

**Keywords:** vibrocompaction, concrete, reinforced-concrete sleepers, strength, workability.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-53-56

Обследования железобетонных шпал на различных участках железнодорожных линий выявили, что прочностные, физические и другие свойства бетона одной и той же шпалы могут различаться как по ее высоте, так и по длине. Эта неоднородность бетона существенно искажает реальные показатели качества шпалы и может вызвать ее разрушение на локальном участке, что способно послужить толчком к началу дальнейшего разрушения и привести к выходу из строя всей шпалы.

Одна из крайне важных характеристик бетона — удобоукладываемость, она определяет формирование смеси и позволяет получить предел этого свойства в изготовлении бетонных смесей заданных технических параметров для каждой конкретной технологии. Удобоукладываемость зависит от выбранного состава и прежде всего от количества воды и сочетания мелко- и крупнодисперсной составляющих. Чтобы надежно работать, железобетонные шпалы должны обладать высокими показателями прочности, водонепроницаемости и морозостойкости, поэтому при изготовлении высокопрочных железобетонных изделий используют жесткие бетонные смеси, требующие высококачественного равномерного уплотнения.

Исследований, посвященных изучению процесса вибрирования бетонных смесей, достаточно много [1–7]. Оптимальное значение амплитуды колебаний взаимосвязано с частотой, крупностью заполнителя, жесткостью бетонной смеси [1, 2]. Каждый конкретный способ уплотнения требует определенной оптимальной амплитудной области в зависимости от свойств бетонной смеси. Значения между минимальной и максимальной

амплитудой характеризуют область технологической устойчивости режимов виброуплотнения.

Процесс уплотнения условно разделяется на стадии. В связи с представлением о бетоне как о композиционном материале, имеющем макро- и микроособенности, выделяются две стадии: первая — перекомпоновка крупных составляющих (щебня) и образование макроструктуры; вторая — более глубокие тиксотропные изменения в мелкодисперсной (цементной) системе и формирование микроструктуры.

На первой стадии рекомендуются колебания низкой частоты с большой амплитудой перемещения, когда преодолеваются силы сцепления и сухого трения неуплотненных частиц бетонной смеси, что соответствует представлениям о бетонной смеси как о модели с пластическими свойствами. Для этого требуются достаточно большие амплитуды (1–5 мм) и необходимая интенсивность по ускорению 1,5–3,5  $g$  для преодоления предельного напряжения сдвигу в зависимости от свойств среды и размеров крупного заполнителя [4, 5, 8].

На второй стадии происходит дополнительное уплотнение, которое интенсивно протекает при значительных тиксотропных изменениях [3, 9–11]. Для разжижения растворной составляющей целесообразны повышенные частоты [4, 5, 12] или введение пластифицирующих добавок [3, 6, 8, 12]. Снижение вязкости описывается с использованием модели Кельвина — Фойгта.

Оба процесса происходят одновременно, но для низких частот и больших амплитуд быстрее протекает первая стадия. При средних (50 Гц) и повышенных частотах на процесс уплотнения большее влияние оказывает тиксотропное разжижение [9–11]. При уплотнении плитных изделий на виброплощадках с многокомпонентными колебаниями главный фактор, влияющий на распределение прочности бетона, — вертикальное ускорение и его распределение по площади рамы. Ускорение и перемещение — основные факторы, влияющие на качество уплотнения бетонной смеси [3, 12].

Согласно анализу научных исследований, значения ускорения и перемещения — это показатели, от которых главным образом зависят физико-механические свойства бетонных изделий. Цель нашей работы заключалась в оценке влияния параметров вибрационного уплотнения на качество бетона при изготовлении железобетонных шпал.

Для этого мы использовали виброметр ZET 7151-N, который фиксирует в установленной точке на форме амплитуду, частоту и ускорение вибрирования по трем направлениям одновременно и при помощи которого возможно оценить равномерность уплотнения по всей площади формы.

Были исследованы две виброустановки: прямоугольной формы для 4 изделий и прямоугольной вытянутой формы для 10 изделий. Датчики, установленные в определенные места на форме, фиксировали показатели процесса виброуплотнения. Пример одного из вариантов расположения датчиков представлен на рис. 1. Виброуплотнение оценивали при использовании бетонных смесей с добавлением суперпластификатора (он позволяет разжижать растворную составляющую бетонной смеси для снижения требуемой частоты виброуплотнения) в количестве, обеспечивающем марку удобоукладываемости Ж1.

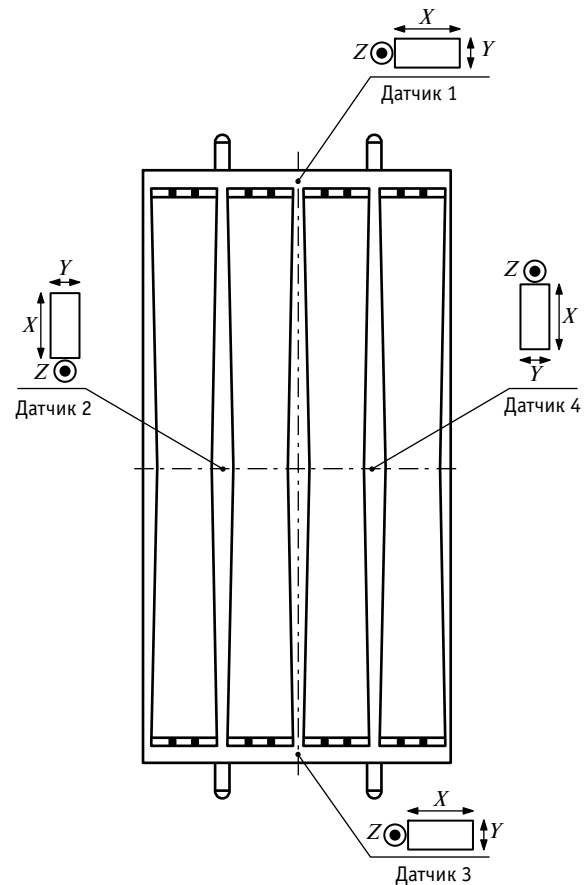


Рис. 1. Пример расположения датчиков прибора на форме

Поскольку только сила тяжести стремится уплотнить бетонную смесь, а силы трения и сцепления препятствуют этому процессу, то качественное виброуплотнение в первую очередь характеризуется движением формы по горизонтальной оси. Эти значения и были приняты за расчетные.

Оценка критерия эффективности вибрации основывается на сочетании параметров частоты и амплитуды. В работах по физико-химической механике в качестве интенсивности принята скорость колебаний  $A\omega$  ( $A$  — амплитуда колебаний, мм;  $\omega$  — угловая частота колебаний, рад/с;  $F = 2\pi\omega$ , где  $f$  — частота колебаний, Гц). В качестве критерия вибровоздействия для железобетонных изделий приняты следующие сочетания при оценке ускорения и энергии:  $A\omega^2$  — ускорение ( $g$ );  $A^2\omega^3$  — энергия ( $E$ ).

Ускорение и энергетический потенциал примерно однозначно определяют процесс уплотнения. Однако если частота колебаний  $f$  варьируется по длине изделия, то угловая частота определяется для каждой точки отдельно. В таком случае более достоверным критерием оценки будет энергетический потенциал.

Точно выбранная частота вибрации — определяющий фактор для правильного распределения бетона. Благодаря такой системе можно менять частоту и оптимизировать ее в зависимости от характеристик используемого бетона. Исследуемая виброустановка позволяет с помощью инвентора изменять ча-



Рис. 2. Графики ускорения во времени по оси Z для точек 14 (зеленая линия) и 8 (сиреневая линия)

стоту вибрации каждого мотор-вибратора, что создает определенные трудности в эксплуатации. Поэтому первоначально были выявлены участки, где частота вибрации не соответствует требуемой частоте, и дальнейшие исследования проводились при постоянной частоте на всей рабочей поверхности.

В процессе исследований получены значения ускорения и перемещения в каждой точке формы изделия. Как показали результаты испытаний, крайние ребра при уплотнении не деформируются, происходит равное уплотнение, за исключением краев форм, в которых наблюдаются более высокие показатели ускорения и перемещения. Пример такого расхождения представлен на совмещенном графике ускорения во времени (рис. 2). Расстояние между фиксируемыми точками составляет 4,5 м, тогда как ускорение на конце формы в точке 14 в четыре раза превышает ускорение в точке 8. На конце формы происходят сильные удары, тогда как в другом месте наблюдается недостаточная энергия уплотнения. Подобный случай может быть вызван некорректной работой вибромоторов, а также неточной регулировкой по горизонтальной оси, что выключает их из процесса виброуплотнения.

В средних и крайних боковых частях некоторых форм наблюдается так называемое биеение, которое свидетельствует о неплотном прижатии форм к раме виброплощадки. Биеение очень негативно сказывается на прочности бетона и равномерности распределения, а также на эксплуатации форм и вибрационного оборудования. Вероятно, оно является следствием изменения геометрии форм в процессе эксплуатации так называемой пропеллерности. В подобных случаях устанавливают пригрузы на концах форм, если это позволяют конструктивные особенности виброплощадки.

В местах резкого изменения ускорений возможно появление неоднородности бетона и снижение его физико-механических свойств. Поэтому были отобраны изделия, которые уплотнялись в тех местах формы, где наблюдались отклонения. После

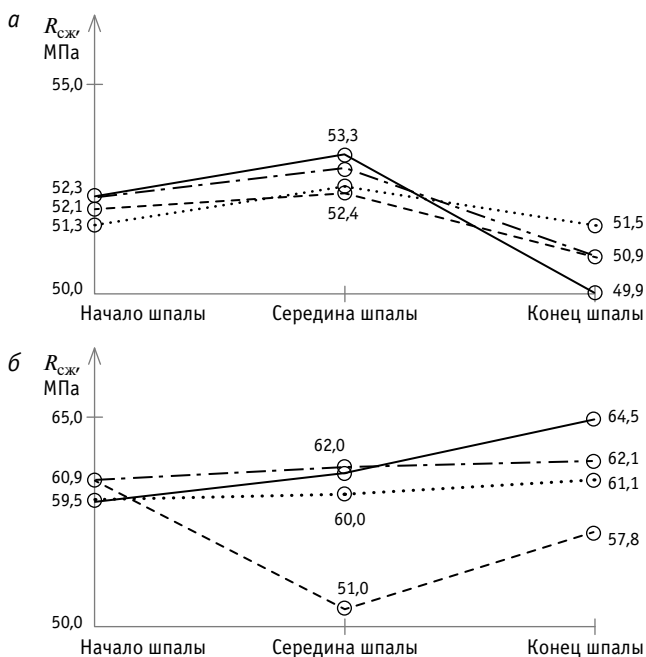


Рис. 3. Графики прочности со всех сторон двух изделий, уплотняемых в местах неравномерного распределения энергии уплотнения:

правая сторона: — — верхний слой; - - - - нижний слой;  
левая сторона: - · - · - верхний слой; · · · · · - нижний слой;

твердения шпал в пропарочной камере неразрушающим методом определяли прочность бетона в 6 местах каждой шпалы: вверху и внизу на концах и по середине.

Как видно из рис. 3а, прочность шпалы, на конце которой наблюдалось неравномерное уплотнение, изменяется по ее длине, но не изменяется по высоте. В то же время рис. 3б

показывает более серьезное расхождение прочности по высоте в середине и конце по двум сторонам. Было установлено, что если в углах и торцевых частях формы наблюдаются повышенные ускорения, то прочность шпал в этих местах значительно различается по высоте.

Как показали результаты испытаний, амплитуды перемещений и ускорений в большинстве исследованных мест у форм с бетонными смесями имеют стабильное ускорение в пределах 3–6 g, что оптимально для качественного уплотнения бетонной смеси. Кроме того, ускорение и перемещение форм с бетонными смесями, имеющими добавку, оказались более гармоничными, чем те же самые параметры у форм с бетонными смесями без добавок. При этом качество готовой поверхности бетона шпал с использованием добавки более высокое (меньше пор, ровнее поверхность), чем у бетона шпал без добавки [8].

Таким образом, в процессе исследования были оценены параметры виброуплотнения всей площади формы. Как правило, снятые показания не выходили за границы оптимальных значений ускорения и перемещения для качественного

уплотнения смеси, однако были выявлены места, требующие корректировки.

В целом по результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Виброустановки обеспечивают уплотнение бетонных смесей, удобоукладываемость которых имеет марку Ж1, по всей поверхности формы на уровне ускорения, равного 3,5–6,0 g.

2. Выявлены места, в которых показатели ускорения и перемещения выходят за рекомендуемые значения, что связано либо с разным расположением вибраторов по высоте, либо с деформацией формы (пропеллерностью).

3. Неравномерное уплотнение бетонных смесей приводит к тому, что прочность бетона одного и того же изделия различается как по длине, так и по высоте. Оценка параметров виброуплотнения позволяет определить места, в которых некачественное уплотнение наиболее вероятно.

4. Целесообразно периодически исследовать равномерность распределения параметров виброуплотнения по площади форм, а также определять степень уплотнения бетона.

## Литература

- Десов А. Е. Вибраторы для бетонов. Москва : Госстройиздат, 1949. 208 с.
- Десов А. Е. Вибрированный бетон. Москва : Госстройиздат, 1956. 229 с.
- Гусев Б. В., Зазимко В. Г. Вибрационная технология бетона. Киев : Будівельник, 1991. 160 с.
- Шмигальский В. Н. Формование изделий на виброплощадках. Ленинград : Стройиздат, 1968. 102 с.
- Савинов О. А., Лавринович В. В. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных смесей. Ленинград : Стройиздат, 1986. 278 с.
- Руководство по технологии заводского вибрирования / Под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездова. Москва : НИИЖБ, 2005. 270 с.
- Ромаско В. С., Чернявский В. Л. О прочности цементного бетона, полученного в условиях длительной вибрации // Известия вузов. Строительство. 1999. № 11. С. 34–37. ISSN 0536–1052.
- Гусев Б. В., Добшиц Л. М., Николаева А. А. Оптимизация процессов виброуплотнения // Международное аналитическое обозрение АЛИТинформ: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2019. № 3 (56). С. 34–40. ISSN 1998–1295.
- Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. Москва : Знание, 1958. 64 с.
- Овчинников П. Ф., Круглицкий Н. Н., Михайлов Н. В. Реология тиксотропных систем. Киев : Наукова думка, 1972. 120 с.
- Урьев Н. Б., Дубинин И. С. Коллоидные цементные растворы. Ленинград : Стройиздат, 1980. 192 с.
- Гусев Б. В., Файвусович А. С. Технологическая механика вибрируемых бетонных смесей. Москва : Воентехлит, 2002. 250 с.

## References

- Desov A. E. Concrete vibrators [Vibratory dlya betonov]. Moscow : Gosstroyizdat, 1949. 208 p.
- Desov A. E. Vibrated concrete [Vibrirovanny beton]. Moscow : Gosstroyizdat, 1956. 229 p.
- Gusev B. V., Zazimko V. G. Vibration technology of concrete [Vibratsionnaya tekhnologiya betona]. Kiev : Builder, 1991. 160 p.
- Shmigalskiy V. N. Forming of products on vibrating tables [Formovanie izdeliy na vibroploshhadrakh]. Leningrad : Stroyizdat, 1968. 102 p.
- Savinov O. A., Lavrinovich V. V. Vibration technique of compacting and forming of concrete mixtures [Vibratsionnaya tekhnika uplotneniya i formovaniya betonnykh smesey]. Leningrad : Stroyizdat, 1986. 278 p.
- Guidelines on technology of plant vibration [Rukovodstvo po tekhnologii zavodskogo vibrirvaniya] / Ed. by B. A. Krylov, S. A. Ambartsumyan, A. I. Zvezdov. Moscow, 2005. 270 p.
- Romasko B. C., Chernyavskiy V. L. On strength of cement concrete created in conditions of long-term vibration [O prochnosti tsementnogo betona, poluchennogo v usloviyakh dlitel'noy vibratsii] // News of higher educational institutions. Construction. 1999. No. 11. Pp. 34–37. ISSN 0536–1052.
- Gusev B. V., Dobshits L. M., Nikolaeva A. A. Optimization of vibrocompaction processes [Optimizatsiya protsessov vibrouplotneniya] // International Analytical Review «ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures». 2019. No. 3 (56). Pp. 34–40. ISSN 1998–1295.
- Rebinder P. A. Physical-chemical mechanics [Fiziko-khimicheskaya mekhanika]. Moscow : Knowledge, 1958. 64 p.
- Ovchinnikov P. F., Kruglitskiy N. N., Mikhaylov N. V. Rheology of thixotropic systems [Reologiya tiksootropnykh sistem]. Kiev : Scientific Thought, 1972. 120 p.
- Uryev N. B., Dubinin I. S. Colloidal cement grouts [Kolloidnye tsementnye rastvory]. Leningrad : Stroyizdat, 1980. 192 p.
- Gusev B. V., Fayvusovich A. S. Technological mechanics of vibrated concrete mixtures [Tekhnologicheskaya mekhanika vibriruyemykh betonnykh smesey]. Moscow : Voentekhlit, 2002. 250 p.

Объем статьи 0,5 авторских листа



УДК 625.111+519.816

Вячеслав Анатольевич Подвербный, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия,  
Анастасия Анатольевна Перелыгина, аспирант кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

## ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ТИПА УКРЕПЛЕНИЯ ВОДООТВОДНЫХ И НАГОРНЫХ КАНАВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Vyacheslav Anatolyevich Podverbnyy, DSc in Engineering, Professor, Construction of Railways,  
Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia,  
Anastasiya Anatolyevna PereLygina, postgraduate student, Construction of Railways,  
Bridges and Tunnels Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

## Decision-making on choosing the type of strengthening of drains and upholstery ducts based on the ideal point method

### Аннотация

Рассмотрены современные материалы и технологии для укрепления водоотводных и нагорных канав, проанализированы их преимущества и недостатки. При выборе типа укрепления инженеру-проектировщику железных дорог необходимо выполнить сравнение вариантов типов укрепления канав с точки зрения таких критериев, как снижение трудоемкости и ресурсоемкости, продолжительность выполнения строительных работ, повышение долговечности, улучшение экологичности, потребность в спецоборудовании, и др.

Предложен метод идеальной точки для решения многокритериальной детерминированной задачи по выбору типа укрепления канав. Разработана программа — прототип системы поддержки принимаемых решений по выбору типа укрепления на основе метода идеальной точки. Программа содержит четыре области: область исходных данных; область расчета; справочник по типам укрепления канав, в котором отдельно выделены инновационные типы укрепления канав; область результатов расчета и рекомендаций. С помощью программы решена тестовая задача выбора типа укрепления. Из трех альтернатив рекомендовано бетонное полотно — инновационное укрепление канавы.

**Ключевые слова:** укрепление водоотводных и нагорных канав, современные материалы и технологии для укрепления канав, критерии сравнения вариантов укрепления, метод идеальной точки, бетонное полотно.

### Summary

Modern materials and technologies for strengthening drainage and upland ditches, their advantages and disadvantages are considered. When choosing the type of reinforcement, the railway design engineer must compare the options for the types of reinforcement of ditches in terms of various criteria: reducing labour and resource intensity, duration of construction work, increasing durability, improving environmental friendliness, the need for special equipment, and others.

An ideal point method is proposed for solving a multi-criteria deterministic problem of choosing the type of ditch reinforcement. A prototype program of the decision support system for choosing the type of reinforcement using the ideal point method has been developed. The program contains four areas: the source data area; the calculation area; the guide to the types of ditch reinforcement, which separately identifies innovative types of ditch reinforcement; the area of calculation results and recommendations. With the help of the program, the test problem of choosing the type of reinforcement is solved. Of the three alternatives, a concrete roadbed is recommended—an innovative strengthening of the ditch.

**Keywords:** strengthening of drainage and upland ditches, modern materials and technologies for strengthening ditches, criteria for comparing reinforcement options, the ideal point method, concrete roadbed.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-57-62

## ВВЕДЕНИЕ

**В**одоотводные и нагорные канавы служат для перехвата воды, стекающей по склону к железной дороге, и для отвода этой воды к ближайшим искусственным сооружениям поперечного водоотвода, в резервы или пониженные места рельефа. При проектировании применяют системы автоматизированного проектирования железных дорог на основе трехмерных моделей местности [1].

Значение водоотводных и нагорных канав, представляющих собой защитные водоотводные сооружения для обеспечения надежности земляного полотна и в целом железнодорожного пути, чрезвычайно велико [2].

Отказы постоянных устройств и сооружений инфраструктуры, вызванные неправильным проектированием канав или их ненадлежащим содержанием, снижают эксплуатационную надежность участка железной дороги [3].

При неправильном проектировании или плохом содержании канав происходит подтопление и размыв земляного полотна, деформации которого, в свою очередь, приводят к росту неисправностей верхнего строения пути, ограничению скоростей движения поездов, снижению

пропускной и провозной способности железной дороги, нарушению ритмичности этапов жизненного цикла железнодорожного пути [4].

При проектировании канав необходимо обеспечить выполнение двух основных условий:

— канава должна пропускать весь расчетный расход воды без размыва, заиливания и переполнения;

— строительные расходы на сооружение канавы и эксплуатационные расходы на ее содержание и ремонт должны быть минимальными.

Основные нормы по проектированию водоотводных и нагорных канав приведены в СП 32-104-98 [5].

В статье поставлена задача изучить новые материалы и технологии укрепления канав и предложить метод принятия решения по многокритериальному сравнению и выбору наилучшего варианта укрепления.

## СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УКРЕПЛЕНИЯ КАНАВ

Инженер-проектировщик железных дорог при выборе типа укрепления, когда он выступает в роли лица, принимающего решение (ЛПР), должен сравнить варианты типов укрепления канав с точки

зрения различных критериев: снижения трудоемкости и ресурсоемкости, продолжительности выполнения строительных работ, повышения долговечности, улучшения экологичности и других.

Существует множество типов укрепления канав, фрагмент справочника по ним представлен на рис. 1.

Рассмотрим современные инновационные геосинтетические материалы, эффективно применяемые для укрепления водоотводных, нагорных канав и откосов земляного полотна от размыва [6], в порядке постепенного увеличения степени защиты, которая характеризуется допускаемой неразмывающей скоростью течения воды ( $V_{\text{неразмыв}}$ , м/с) в канаве после ее укрепления.

**Бентонитовый мат (бентомат)** — двуслойное полотно с прослойкой из натриевого бентонита, природного гидроизолятора, который обеспечивает качественную защиту от влаги [6].

**Биомат (биотекстиль)** — многослойный нитепрошивной либо нетканый материал. В качестве основы биополотна применяются волокна и другое сырье органического происхождения, которые разлагаются, не нанося ущерб окружающей экосистеме. Использование биомата гарантирует восстановление почвенно-растительного слоя за один сезон, позволяя избежать технологии защиты с последующим ежегодным посевом трав [6].

**Геоматы** — водопроницаемая трехмерная волоконная структура, выполненная из полимерных материалов в виде сот, которые соединены между собой механическим или термическим способом. Возможны различные технологии укладки геоматов: с посевом травами, укреплением щебнем, битумом [6]. Для данных материалов  $V_{\text{неразмыв}} = 1,0$  м/с [7].

**Георешетки Армогрид.** Их основная задача — защита поверхности канав от размыва. Укрепление канавы георешеткой сочетают с укреплением откоса. Допускаемая неразмывающая скорость течения воды в канаве, укрепленной георешеткой с системой «грунт + газон»  $V_{\text{неразмыв}} = 1,5$  м/с, при укреплении георешеткой с заполнением щебнем крупных фракций  $V_{\text{неразмыв}} = 2,2$  м/с [7].

**Матрацы Рено** из сетки двойного кручения — это объемные сетчатые конструкции (плоские габионы), име-

Справочник					
по типам укрепления водоотводных и нагорных канав					
Шифр	Вид укрепления	Коэффициент шероховатости $n$	Допускаемая скорость, м/с [ $V_{\text{неразмыв}}$ ]	Фото	
БК (без укрепления)	Канавы без укрепления в грунте:	0,0333	1,00		
	глина				
	дубовый				
	супесь				
	песок				
	гравий				
	галун				
	булыжник				
ТР (травосеяние, сплошная дорожка, плиты с посевом трав, биоматы и т.п.)	Укрепление травосеянием, одновесной, укладкой геотекстиля, геоматов	0,0333	1,00		
	Укрепление каменной наброской по подстилающему слою дорнита, геотекстиля	0,0222	2,20		

Рис. 1. Фрагмент справочника по различным типам укрепления канав из программы RASCHET.KANAV.xlsx

ющие небольшую толщину, но значительные по площади. Допускаемая неразрывающая скорость течения воды в канаве, укрепленной матрацами Рено,  $V_{\text{неразрыв}} = 3,5 \text{ м/с}$  [7].

**Бетонное полотно**, например марки Concrete Canvas, — это пропитанная бетоном ткань, которая затвердевает после увлажнения [8]. В 2015 г. в Бразилии 7 рабочих уложили  $4000 \text{ м}^2$  бетонного полотна, выполнив укрепление водоотводных и нагорных канав вдоль железной дороги. Скорость укладки составила примерно  $300 \text{ м}$  в день. Работы осложнялись тем, что участок железной дороги проходил по крутым склонам (рис. 2) [8]. Неразрывающая скорость течения воды в канаве, укрепленной бетонным полотном,  $V_{\text{неразрыв}} = 6,0 \text{ м/с}$  [7].

### СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ УКРЕПЛЕНИЯ КАНАВ ПО МЕТОДУ ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ

При проектировании инженер-проектировщик железных дорог старается обеспечить гидравлически наиболее выгодное поперечное сечение канавы (чтобы условия протекания воды были наилучшими), учитывая площадь, шероховатость, уклон ее дна и допускаемые неразрывающие скорости течения воды в канаве при принятом типе укрепления.

Кроме того, он учитывает требование экономичности запроектированной канавы и сравнивает варианты в первую очередь по критерию приведенных строительно-эксплуатационных затрат. В тех случаях, когда варианты близки по экономическому критерию (в пределах точности расчетов), инженер-проектировщик как лицо, принимающее решение (ЛПР), сравнивает их по критериям, которые важны для данной конкретной задачи.

Таковыми критериями могут быть трудоемкость и ресурсоемкость, продолжительность выполнения строительных работ и условия их производства, долговечность и экологичность конструкции и др. Например, при высоких скоростях течения воды в канаве, имеющей криволинейный план, повышается значение критерия «точность разбивки канавы в плане». В данной ситуации могут быть рекомендованы методы расчета, приведенные в работе [9].



Рис. 2. Укрепление канав на железной дороге в Бразилии [8]: а — общий вид участка работ; б — выпуск нагорной канавы в виде быстрого течения

Наиболее целесообразно решать многокритериальную задачу выбора варианта проектного решения на основе метода идеальной точки [10]. Для повышения эффективности работы ЛПР разработана специальная программа UKREPLENIE\_KANAV.xls. Методика принятия решений в многокритериальной задаче на основе метода идеальной точки известна и применяется во многих задачах проектирования железных дорог [11, 12]. Последовательность расчета по методу идеальной точки приведена ниже.

Определяются  $R_j^i$  — значения частных  $j$ -х критериев эффективности по каждому  $i$ -му варианту проектного решения.

Выбираются максимальное  $R_j^+$  и минимальное  $R_j^-$  значения частных критериев эффективности. Рассчитывается диапазон  $R_j^+ - R_j^-$ .

По формулам (1) и (2) определяются нормализованные значения частных критериев эффективности  $r_j^i$  соответственно для максимизируемых (1) и минимизируемых (2) критериев:

$$r_j^i = (R_j^+ - R_j^i) / (R_j^+ - R_j^-) \quad \text{для } j = 1 \dots s; \quad (1)$$

$$r_j^i = (R_j^i - R_j^-) / (R_j^+ - R_j^-) \quad \text{для } j = s + 1 \dots m. \quad (2)$$

Назначаются прямым (экспертным) способом весовые коэффициенты частных критериев эффективности  $c_j$  с учетом условия

$$\sum c_j = 1, j = 1, \dots, m \text{ при } 0 < c_j < 1. \quad (3)$$

По формуле (4) рассчитываются значения глобального критерия  $\rho_i$  (расстояние до идеальной точки в  $m$ -мерном критериальном пространстве):

$$\rho_i = \left[ \sum (c_j (r_j^i)^2) \right]^{1/2} \quad \text{для всех } j = 1 \dots, m, \quad (4)$$

где  $c_j$  — весовые коэффициенты частных критериев эффективности, учитывающие вес (значимость) каждого критерия, безразмерные, причем должно выполняться условие (3).

Для тестирования программы была решена задача выбора из трех альтернатив по укреплению нагорной канавы, для которой  $V_{\text{неразрыв}} \leq 6,0 \text{ м/с}$ :

X1 — монолитное бетонирование (традиционное укрепление);

X2 — бетонное полотно (инновационное укрепление);

X3 — бетонные лотки (традиционное укрепление).

В качестве ЛПР выступали авторы статьи. Нами были назначены четыре критерия сравнения вариантов с направлениями их оптимизации:

R1 — продолжительность укладки укрепления канавы (минимизируемый критерий);

R2 — трудоемкость работ по укладке укрепления канавы (минимизируемый);

R3 — необходимость спецоборудования для укладки укрепления канавы (минимизируемый);

R4 — необходимость подготовки поверхности для укладки укрепления канавы (минимизируемый).

Исходные данные для расчета и его результат — значения глобального критерия по вариантам укрепления канавы — приведены в табл. 1. Серой заливкой выделены наилучшие значения. В Парето-оптимальное множество входят две альтернативы — X2 и X3.

Величины весовых коэффициентов были назначены ЛПР следующими:

$$C1 = 0,1; C2 = 0,1; C3 = 0,6; C4 = 0,2.$$

Таблица 1

Решение задачи по выбору типа укрепления нагорной канавы методом идеальной точки

Вариант укрепления канавы	Реальные (нормализованные) значения частных критериев эффективности и направление их оптимизации				Глобальный критерий $\rho_i$
	R1 (r1) продолжительность укладки укрепления канавы (миним.)	R2 (r2) трудоемкость работ по укладке укрепления канавы (миним.)	R3 (r3) необходимость спецоборудования для укладки укрепления канавы (миним.)	R4 (r4) необходимость подготовки поверхности для укладки укрепления канавы (миним.)	
X1 — монолитное бетонирование (традиционное укрепление)	12 (1,00)	4 (1,00)	3 (1,00)	5 (1,00)	1,00
X2 — бетонное полотно (инновационное укрепление)	3 (0,18)	3 (0,50)	1 (0,00)	1 (0,17)	<b>0,17</b>
X3 — бетонные лотки (традиционное укрепление)	1 (0,00)	2 (0,00)	2 (0,75)	4 (0,51)	0,51
$R_j^+$	12	4	3	5	
$R_j^-$	1	2	1	1	
$R_j^+ - R_j^-$	11	2	2	4	
$c_j$	0,1	0,1	0,6	0,2	$\sum c_j = 1$

Наибольшее значение придавалось критерию R3 (необходимость спецоборудования для укладки укрепления канавы).

Расчет выполняли в программе UKREPLENIE\_KANAV.xlsx. Общий вид программы представлен на рис. 3.

Программа разбита на 4 области (см. рис. 3):

- 1) область исходных данных;
- 2) область расчета;
- 3) справочник по типам укрепления водоотводных и нагорных канав, отдель-

но выделены инновационные типы укрепления канав;

- 4) область результатов расчета.

В области исходных данных и расчета (рис. 4) пользователь заносит исходные задаваемые параметры:

- альтернативы;
- критерии и направление их оптимизации;
- весовые коэффициенты критериев.

Область результатов расчета включает две области (см. рис. 3):

- распределение значимости весовых коэффициентов в виде круговой диаграммы;
- графическое представление результатов сравнения по глобальному критерию расстояния до идеальной точки в виде линейного графика.

В примере расчета был сделан выбор в пользу варианта X2 — бетонное полотно (инновационное укрепление), так как этот вариант имеет наименьшее значение глобального критерия  $\rho_2 = 0,17$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изложены основные сведения по проектированию нагорных и водоотводных канав, обоснована важность вопроса.

2. Рассмотрены современные материалы и технологии для укрепления водоотводных и нагорных канав.

3. Для решения многокритериальной детерминированной задачи по выбору

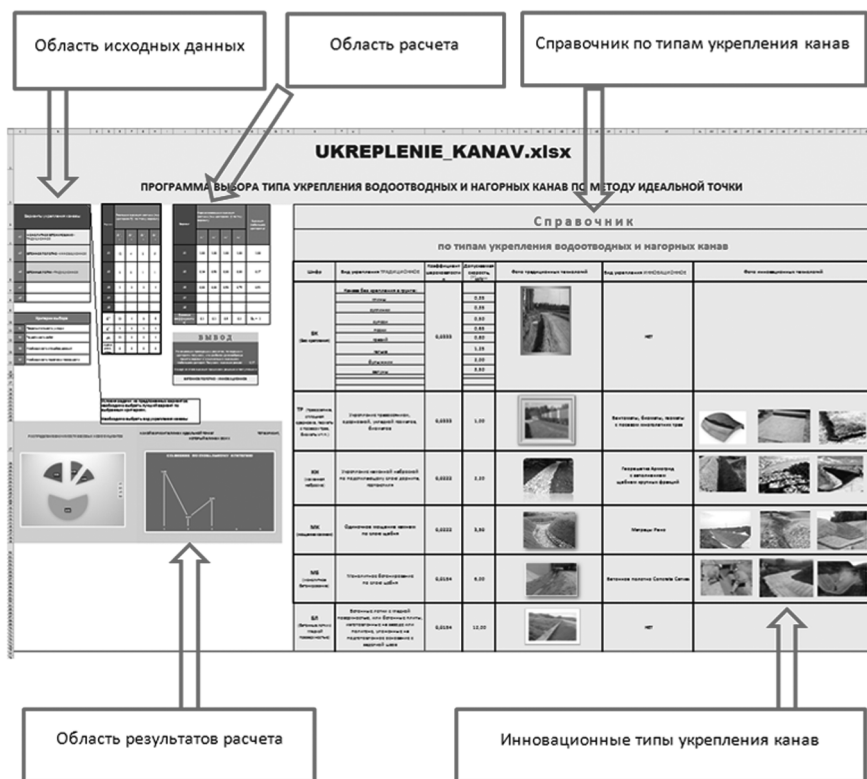


Рис. 3. Общий вид программы UKREPLENIE\_KANAV.xlsx

типа укрепления водоотводных и нагорных канав предложен метод идеальной точки. Его использование обосновано в тех случаях, когда по экономическому критерию приведенных конструктивно-эксплуатационных затрат варианты близки по стоимости (в пределах точности расчетов).

4. Разработана программа выбора типа укрепления водоотводных и нагорных канав по методу идеальной точки UKREPLENIE\_KANAV.xlsx. Программа содержит четыре области: область исходных данных; область расчета; справочник по типам укрепления водоотводных и нагорных канав, в котором отдельно выделены инновационные типы укрепления канав; область результатов расчета и рекомендаций ЛПР.

5. С помощью программы решена тестовая задача выбора типа укрепления из трех альтернатив (X1 — монолитное бетонирование, традиционное укрепление; X2 — бетонное полотно, инновационное укрепление; X3 — бетонные лотки, традиционное укрепление).

Варианты укрепления канавы		Реальные значения частных $j$ -ых критериев $R_j$ по $i$ -тому варианту					Нормализованные значения частных $j$ -ых критериев $r_j$ по $i$ -тому варианту					Значение глобального критерия $g_i$			
Вариант		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Вариант				$r_1$	$r_2$		$r_3$	$r_4$	
3	X1	МОНОЛИТНОЕ БЕТОНИРОВАНИЕ - ТРАДИЦИОННОЕ					X1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
4	X2	БЕТОННОЕ ПОЛОТНО - ИННОВАЦИОННОЕ					X2	0,18	0,50	0,00	0,00	0,17			
5	X3	БЕТОННЫЕ ЛОТКИ - ТРАДИЦИОННОЕ					X3	0,00	0,00	0,50	0,75	0,51			
6	X4						X4								
7	X5						X5								
8	X6						X6								
9	X7						X7								
10	Критерии выбора		$R_j$	12	4	3	5	Веса коэффициентов $q_j$					$\Sigma g_i = 1$		
11	X1	Продолжительность укладки	$R_1$	1	2	1	1	0,1	0,1	0,6	0,2				
12	X2	Трудоемкость работ	$\Delta R_j$	11	2	2	4								
13	X3	Необходимость спецоборудования	индекс $Q_{тип}, j$ -этап	0	0	0	0								
14	X4	Необходимость подготовки поверхности													
15															
16															
17															
ВЫВОД												0,17			
на основании проведенных расчетов, по заданным критериям получаем, что наиболее целесообразно принять вариант с минимальным значением глобального критерия. Получаем значение равно															
исходя из этого значения принимаем решение о поступлении в												БЕТОННОЕ ПОЛОТНО - ИННОВАЦИОННОЕ			

Рис. 4. Области исходных данных и расчета программы UKREPLENIE\_KANAV.xlsx

традиционное укрепление) с использованием четырех критериев (R1 — продолжительность укладки; R2 — трудоемкость работ; R3 — необходимость спецоборудования; R4 — необходимость подготовки поверхности).

По результатам решения задачи выбран инновационный тип укрепления канавы: X2 — бетонное полотно.

## Литература

1. The Functional Models of System of the Automated Design of the Railroads on the Basis of Use of Three-dimensional Terrain Models / V. A. Anisimov, K. A. Malykh, A. V. Anisimov, A. R. Edigarian // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1873–1879.
2. Подвербный В. А., Филатов Е. В. Проектирование защитных сооружений на Восточно-Сибирской железной дороге // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (33). С. 236–243. ISSN 1813–9108.
3. Анисимов В. А., Нестерова Н. С. Методика оценки эксплуатационной надежности железнодорожного участка // Транспорт Урала. 2016. № 1 (48). С. 35–40. ISSN 1815–9400.
4. Ковенькин Д. А., Подвербный В. А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сборник научных трудов / Под ред. В. С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 151–157.
5. Свод правил. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. СП 32-104-98. Москва : Госстрой России ; ГУП ЦПП, 1999. 91 с.
6. Геоматериалы и производство геосинтетических. URL: <https://mineralnye-vody.td-geo.ru/contacts> (дата обращения: 13.04.2020).
7. Расчет водоотводных и нагорных канав / П. Н. Холодов, В. А. Подвербный, Д. А. Ковенькин, Е. В. Филатов // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сборник научных трудов / Под ред. А. В. Никитина. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2020. Вып. 8. С. 45–56.

## References

1. The Functional Models of System of the Automated Design of the Railroads on the Basis of Use of Three-dimensional Terrain Models / V. A. Anisimov, K. A. Malykh, A. V. Anisimov, A. R. Edigarian // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 1873–1879.
2. Podverbnyy V. A., Filatov E. V. Designing protective constructions on the East-Siberian railroad [Proektirovaniye zashhitnykh sooruzheniy na Vostochno-Sibirskoy zheleznoy doroge] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. No. 1 (33). Pp. 236–243. ISSN 1813–9108.
3. Anisimov V. A., Nesterova N. S. Method to determine operating reliability of a railway section [Metodika otsenki ekspluatatsionnoy nadezhnosti zheleznodorozhnogo uchastka] // Transport of the Urals. 2016. No. 1 (48). Pp. 35–40. ISSN 1815–9400.
4. Kovenkin D. A., Podverbnyy V. A. Stages of life cycle of railway track [Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti] // Designing development of regional railway network: collection of scientific papers / Ed. by V. S. Shvartsfeld. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2015. Issue 3. Pp. 151–157.
5. Set of rules. Designing of railway formation for 1520 mm gauge. SP 32-104-98 [Svod pravil. Proektirovaniye zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm. SP 32-104-98]. Moscow : The Russian Federation State Committee for Construction ; State Unitary Enterprise Centre for Design Products in Construction, 1999. 91 p.
6. Geomaterials and production of geosynthetics [Geomaterialy i proizvodstvo geosintetiki]. URL: <https://mineralnye-vody.td-geo.ru/contacts> (access date: 13.04.2020).
7. Calculation of drainage and intercepting ditches [Raschet vodootvodnykh i nagornykh kanav] / P. N. Kholodov, V. A. Podverbnyy, D. A. Kovenkin, E. V. Filatov // Designing development of regional railway network: collection of scientific papers / Ed. by A. V. Nikitin. Khabarovsk : Publishing House of FESTU, 2020. Issue 8. Pp. 45–56.

8. Железные дороги: применение бетонного полотна CONCRETE CANVAS®. URL: <https://uccr.su/primenenie/ukreplenie-transhey-i-kanav> (дата обращения: 15.04.2020).
9. Мамитко А. А., Подвербный В. А. Комбинирование стреловых и координатных методов съемки железнодорожного пути с целью повышения точности определения пространственных очертаний плана пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (33). С. 274–278. ISSN 1813–9108.
10. Подвербный В. А., Холодов П. Н., Титов К. М. Методы принятия проектных решений в строительстве : учебно-методическое пособие. Иркутск : ИрГУПС, 2010. 72 с.
11. Подвербный В. А., Ченцова Е. О. Выбор оптимального варианта комплекса защитных сооружений от размыва откоса и заиливания железнодорожного моста на основе метода идеальной точки // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы третьей всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 15–19 мая 2012 г., Иркутск. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. Т. 1. С. 465–472.
12. Перелыгина А. А., Подвербный В. А. Пример принятия решения в области проектирования железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой международной научно-практической конференции, 10–13 апреля 2018 г., Иркутск. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. Т. 1. С. 606–611.
8. Railways: application of CONCRETE CANVAS® [Zheleznyye dorogi: primeneniye betonnogo polotna CONCRETE CANVAS®]. URL: <https://uccr.su/primenenie/ukreplenie-transhey-i-kanav> (access date: 15.04.2020).
9. Mamitko A. A., Podverbnyy V. A. Combining coordinate and curvature railway track survey methods to improve accuracy of spatial outline estimation of track horizontal alignment [Kombinirovaniye strelovykh i koordinatnykh metodov s'emki zheleznodorozhnogo puti s tsel'yu povysheniya tochnosti opredeleniya prostranstvennykh ochertaniy plana puti] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. No. 1 (33). Pp. 274–278. ISSN 1813–9108.
10. Podverbnyy V. A., Kholodov P. N., Titov K. M. Methods of decision-making in construction [Metody prinyatiya proektnykh resheniy v stroitel'stve] : textbook. Irkutsk : ISTU, 2010. 72 p.
11. Podverbnyy V. A., Chentsova E. O. Selection of optimal variant for complex of protecting facilities from washing the slope and silting the railway bridge on the basis of «ideal point» method [Vybor optimal'nogo varianta kompleksa zashhitnykh sooruzheniy ot razmyva otkosa i zailivaniya zheleznodorozhnogo mosta na osnove metoda ideal'noy tochki] // Transport Infrastructure of the Siberian Region : proceedings of the third All-Russian research and practice conference with international participation, 15–19 May 2012, Irkutsk. Irkutsk : Publishing House of ISTU, 2012. Vol. 1. Pp. 465–472.
12. Perelygina A. A., Podverbnyy V. A. Example of decision-making in sphere of designing of railways [Primer prinyatiya resheniya v oblasti proektirovaniya zheleznykh dorog] // Transport Infrastructure of the Siberian Region : proceedings of the 9 international research and practice conference, 10–13 April 2018, Irkutsk. Irkutsk : Publishing House of ISTU, 2018. Vol. 1. Pp. 606–611.

Объем статьи 0,66 авторских листа

УДК 691.32

Владимир Николаевич Моргун, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерно-строительных дисциплин Южного федерального университета (ЮФУ), Ростов-на-Дону, Россия,

Алла Юрьевна Богатина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия,

Алексей Анатольевич Ревякин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия,

Любовь Васильевна Моргун, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы» Донского государственного технического университета (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНО АРМИРОВАННЫХ БЕТОНОВ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Vladimir Nikolaevich Morgun, PhD in Engineering, Associate Professor, Engineering and Construction Disciplines Department, Southern Federal University (SFU), Rostov-on-Don, Russia,

Alla Yuryevna Bogatina, PhD in Engineering, Associate Professor, Research, Design and Construction of Railways Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia,

Alexey Anatolyevich Revyakin, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Research, Design and Construction of Railways Department, Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia,

Lubov Vasilyevna Morgun, DSc in Engineering, Professor, Building Materials Department, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russia

## Perspectives of application of complex-reinforced concretes in engineering structures of transport infrastructure objects

### Аннотация

Обоснована необходимость совершенствования эксплуатационных свойств строительных изделий и конструкций, применяемых при возведении сооружений транспортного назначения. Показано, что современный подход к обозначенной проблеме лежит в русле дисперсного армирования бетонов литой и ячеистой структур. Приведены справочные и экспериментально полученные данные о мере положительного влияния металлической и синтетической фибры на эксплуатационные свойства бетонов различной структуры. На основе результатов экспериментальных исследований показана принципиальная возможность комплексного совершенствования свойств строительных конструкций за счет использования стержневой стеклопластиковой арматуры. Сформулирован перечень перспективных технологий, пригодных для изготовления конструктивных элементов из фибро- и комплексно армированных бетонов в строительных сооружениях транспортного назначения.

**Ключевые слова:** фибробетон, конструкции, стержневая стеклопластиковая арматура, элементы транспортной инфраструктуры.

### Summary

The paper substantiates a necessity to improve operational properties of building products and structures that are used at construction of transport objects. It shows that the modern approach to designated problem is in the course of fibre reinforcement of fused and cellular concretes. The work provides reference and experimental data on the level of positive influence of metal and synthetic fibre on operational properties of concretes of various structures. On the basis of experimental results the authors have presented a fundamental possibility of complex improvement of engineering structures properties by using bar fibre-glass reinforcement. As a result, they have formulated a number of perspective technologies suitable for creating building elements from fibre and complex-reinforced concretes for transport objects.

**Keywords:** fibrous concrete, constructions, bar fibre-glass reinforcement, transport infrastructure elements.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-63-67

**А**ктивно растущие объемы строительства зданий и инженерных сооружений определяют повышенные требования не только к качеству проектирования и возведения объектов капитального строительства, но и к эксплуатационным качествам строительных материалов [1].

Современный подход к строительству железнодорожных зданий и сооружений требует эффективных решений, в которых индивидуальность архитектурного облика сочеталась бы с минимальным расходом материалов на единицу строительного объема. Кроме того, здания должны обладать необходимым уровнем санитарно-гигиенических свойств, обеспечивающих требуемую практикой экологичность, эффективными тепло- и звукоизоляционными свойствами, минимальными сроками возведения и небольшими затратами при эксплуатации [2–4].

Здания и сооружения железнодорожного транспорта, кроме длительно и кратковременно действующих нагрузок, дополнительно подвергаются негативному воздействию динамических транспортных нагрузок и агрессивных сред [5], что предопределяет повышение требований к величинам прочности, трещиностойкости и химической стойкости применяемых материалов.

На сегодняшний день важнейший конструкционный материал, используемый для возведения гражданских и промышленных зданий, объектов транспортной инфраструктуры и т. п., — железобетон в сборном, сборно-монолитном и монолитном исполнении [6, 7].

Современная технология бетонов обеспечивает возможность изготовления композиционных материалов с прочностью на сжатие, превышающей 200 МПа [8]. Но основной недостаток конструкционных бетонов заключается в относительно низком сопротивлении растягивающим напряжениям, которые системно возникают в условиях эксплуатации конструкций транспортного назначения.

Практика показывает [9], что с ростом прочности на сжатие увеличивается мера хрупкости бетонов слитной структуры. В большей степени это опасно для конструкций транспортных сооружений, которые подвергаются непрерывно-



**Рис. 1. Особенности трещинообразования фибробетона при испытаниях железобетонной перемычки на несущую способность**

му воздействию знакопеременных динамических нагрузок. Поэтому перед современной наукой стоит актуальная задача поиска технологических и рецептурных способов повышения энергоемкости разрушения высокопрочных бетонов.

Один из эффективных приемов решения обозначенной проблемы, который заключается в повышении энергоемкости разрушения бетонов, — это дисперсное армирование их волокнами [10, 11]. Он положительно влияет на структуру и свойства цементного камня, в результате высокопрочный бетон обретает способность в разы увеличивать ударную вязкость железобетонных конструкций и их устойчивость к знакопеременным нагрузкам [10]. Главным преимуществом дисперсно армированных бетонов является то, что волокна, равномерно размешанные в структуре минерального цементного камня, за счет сил сцепления с ним способны воспринимать значительную долю растягивающих нагрузок, а после появления трещин в растянутой зоне эффективно тормозить их развитие (рис. 1).

Анализ свойств бетонов разной структуры, содержащих дисперсную арматуру различной вещественной природы, показывает, что фибра способна положительно и существенно влиять на эксплуатационные свойства бетонов (табл. 1).

*Таблица 1*

**Эксплуатационные свойства фибробетонов различной структуры**

Вид и плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, МПа		Морозостойкость, циклы	Равновесная влажность, % по объему/массе	Паропроницаемость, мг / м · ч · Па
	при сжатии	растяжение при изгибе			
ФПБ 700	2,0–4,0	1,5–3,5	Более 75	3,3/4,7	0,12
ФПБ 800	3,0–5,0	2,5–4,0	Более 100	4,0/5,0	0,10
ФПБ 900	5,0–9,0	3,5–5,0	Более 100	4,7/5,2	0,08
ФПБ 1000	7,5–12,5	3,5–6,0	Более 100	5,4/5,4	0,05
КБ 1200	7,5–30	1,0–3,0	35–100	6,0/5,0	0,11
ТБ 2400	7,5–200	1,2–10	50–500	4,8/2,0	0,03
ТФБ 2300	10–40	3,5–7,0	100–500	3,5/1,5	0,02
ТФБ 2400	20–80	5,0–12	100–500	3,5/1,5	0,02

*Примечание: ФПБ — фибропенобетон нормального твердения; КБ — керамзитобетон средней плотности 1200 кг/м<sup>3</sup>; ТБ — тяжелый бетон средней плотности 2400 кг/м<sup>3</sup>; ТФБ 2300 — фибробетон с синтетическими волокнами плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>; ТФБ 2400 — сталефибробетон плотностью 2400 кг/м<sup>3</sup>.*



Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что фибропенобетон плотностью  $1000 \text{ кг/м}^3$  по прочности на сжатие может соответствовать бетону слитной структуры класса В12,5, а по прочности на растяжение при изгибе достигает класса В60. Он очень близок к тяжелому бетону по показателям равновесной влажности и морозостойкости, обладает несколько лучшей паропроницаемостью и, безусловно, более высоким сопротивлением теплопередаче.

Фибробетон слитной структуры, содержащий синтетическую фибру (ТФБ), по показателям прочности на сжатие может несколько уступать своему аналогу без фибры (см. табл. 1), но по величине прочности на растяжение при изгибе, начальной морозостойкости, равновесной влажности такой материал, безусловно, лучше. Что касается сталефибробетона, то он достаточно давно зарекомендовал себя как надежнейший для устройства банковских хранилищ и сооружений, устойчивых к взрыву и удару.

Опыт практического применения фибробетонов показывает, что с 2004 г. из пористых материалов плотностью  $700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$  предприятия стройиндустрии Ростова-на-Дону изготавливают фибропеножелезобетонные перемычки для жилых и общественных каркасных зданий с величиной перекрываемого пролета до 3 м. Из сталефибробетона уже почти полвека на передовых предприятиях стройиндустрии изготавливают оголовки забивных свай. Фибробетоны слитной структуры, дисперсно армированные синтетическими волокнами, зарекомендовали себя как прекрасный материал для устройства полов в цехах промышленных зданий и в торговых центрах.

Современные технологии изготовления фибробетонных изделий и конструкций открывают возможность использования в конструкциях транспортного назначения не только традиционной металлической стержневой арматуры, которую нужно защищать от коррозии при наличии даже волосных трещин, но и стекло- или базальтопластиковой, которая может иметь гладкую или профилированную поверхность. Такая композитная арматура состоит из высокопрочных минеральных волокон, связанных в структуре стержней синтетическими полимерами.

Она обладает обширным перечнем достоинств, если рассматривать композитную арматуру как компонент конструкции транспортного назначения:

- не проводит электрический ток;
- не корродирует во влажной среде в присутствии кислорода;
- при растяжении обладает удлинением, близким к предельной растяжимости бетона, однако прочность ее выше.

Коллективом сотрудников ФГБОУ ВО РГУПС, ЮФУ и ДГТУ была проведена экспериментальная оценка сцепления стержневой стеклопластиковой арматуры с бетоном и фибробетоном слитной структуры (рис. 2). В результате испытаний по определению прочности сцепления бетонов с композитной арматурой путем выдергивания стержней было установлено следующее:

образцы-кубы из бетона без фибры после нарушения сцепления со стержнем раскалываются на части;

образцы из фибробетона, содержащие синтетическую фибру в количествах 0,5 и 1 % от массы цементного камня, после утраты сцепления образуют види-

мые трещины на наружных поверхностях, но сохраняют исходную форму и не разделяются на части (см. рис. 2а).

Контрольная оценка механических свойств исследуемых материалов показала, что фибробетоны слитной структуры класса В20 снизили свою прочность на сжатие примерно на 4–9 % по отношению к прочности бетона без фибры. Вместе с тем при расчете прочности сцепления установлено, что, несмотря на некоторое снижение показателя прочности на сжатие, фактическая прочность сцепления со стержневой арматурой возросла.

Если судить по величине абсолютных показателей (табл. 2), то прочность сцепления бетона в транспортной конструкции со стержневой арматурой каркаса будет зависеть от двух факторов:

- диаметра стержневой арматуры;
- концентрации фибры в цементном камне.

По мере роста диаметра стержней абсолютные значения прочности сцепления уменьшаются, а по мере насыщения бетона фиброй прочность сцепления растёт.



**Рис. 2. Особенности разрушения бетонных образцов в результате испытаний на выдергивание стеклопластиковой стержневой арматуры диаметром 6 и 12 мм:**  
а — фибробетон; б — бетон

Таблица 2

Результаты оценки прочности сцепления стеклопластиковой стержневой арматуры с бетоном слитной структуры

Диаметр стержневой арматуры, мм	Вид бетона	Содержание фибры, %	Относительная прочность сцепления ( $R_{сш}/R_{сж}$ )	Прочность сцепления, МПа
6	ТБ	0	0,45	10,18
	ТФБ	1	0,62	13,51
	ТФБ	0,5	0,60	12,10
12	ТБ	0	0,31	6,64
	ТФБ	1	0,42	8,97
	ТФБ	0,5	0,40	8,86

Но для обоих исследованных диаметров различия в прочности сцепления стержней с бетоном и фибробетоном составили примерно 35 %, что мы полагаем весьма важным положительным результатом, необходимым для обоснования применения фибробетонов в транспортном строительстве.

Обобщая изложенное, считаем важным отметить, что для повышения эффективности строительства зданий и сооружений на железнодорожном транспорте следует учитывать современный уровень развития технологий в области полимерного и строительного материаловедения. Поэтому предлагаем к рассмотрению перечень перспективных технологий, пригодных для изготовления конструктивных элементов из фибры и комплексно армированных бетонов в строительных сооружениях транспортного назначения.

Технология фибропенобетонов опирается на исключительно отечественное сырье и позволяет изготавливать высокоточные конструктивные элементы сложной формы и малой материалоемкости, отличающиеся увеличенными межремонтными сроками эксплуатации и не требующие применения мощного подъемно-транспортного оборудования. К ним относятся:

полносорные конструкции — пассажирские павильоны, переездные будки, здания военизированной охраны и т.д.;

изделия для стеновых ограждений, плиты и балки покрытия и перекрытий, пригодные для зданий пассажирского, путевого, энергетического и локомотивного хозяйства, а также зданий и сооружений систем водоснабжения и канализации.

Технология фибробетонов с комплексным армированием позволит обеспечить надежную работу строительных конструкций при воздействии на них вибрационных, взрывных и сейсмических нагрузок. Она предназначена для строительства и ремонта объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта:

при обустройстве станций и остановочных пунктов (высокие и низкие пассажирские платформы, грузовые платформы);

для содержания железнодорожного пути (шумозащитные и заградительные экраны, мобильные и стационарные снегозащитные ограждения);

в инженерных конструкциях (водопротисные сооружения, путевые развязки, конкурсы);

в конструкциях верхнего строения пути (подрельсовые основания, безбалластное мостовое полотно на эстакадах, мостах и в туннелях).

Таким образом, из анализа литературных и полученных авторами экспериментальных данных следует, что по сравнению с традиционными видами бетонов соответствующих классов дисперсно армированные обладают улучшенными физико-механическими свойствами, а именно повышенной ударной вязкостью и прочностью на растяжение.

В ходе освоения технологий фибробетонов в транспортном строительстве могут быть достигнуты следующие преимущества: частичный или полный отказ от вибрационного уплотнения в связи с возможностью изготовления самоуплотняющихся смесей (улучшение условий и безопасности труда на линии по производству ЖБИ);

снижение энергоемкости производства за счет сокращения расходов энергии на укладку, уплотнение и термообработку бетонных смесей;

возможность изготовления высокоточных изделий сложной формы за счет универсальных формообразующих свойств фибробетонных смесей и высокой прочности на растяжение затвердевшего бетона;

повышение уровня безопасности строительного объекта при его разрушении в результате возникновения чрезвычайных ситуаций (разрушение фибробетонов происходит пластично, фибропенобетонов — в виде каменной крошки с размерами частиц 3–7 мм);

повышение надежности и безопасности строительных конструкций при вибрационных, взрывных и сейсмических воздействиях в связи с изменением характера их разрушения с хрупкого на вязкий;

снижение материалоемкости строительных конструкций за счет комплексного улучшения физико-механических свойств бетонных материалов.

## Литература

1. Казин А. С. Индустриальное домостроение: вчера, сегодня, завтра // Жилищное строительство. 2018. № 10. С. 22–26. ISSN 0044-4472.
2. Субботин О. С. Архитектура железнодорожных комплексов в системе города // Жилищное строительство. 2013. № 2. С. 9–13. ISSN 0044-4472.
3. Фаррахов А. Г. Особенности ресурсосбережения в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 11 (296). С. 53–60. ISSN 2073-2872.
4. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. 1994. 618 p.
5. Петрова Т. М., Сорвачева Ю. А. Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства // Наука и транспорт. 2012. № 4. С. 56–60. ISSN 2306-9112.

## References

1. Kazin A. S. Industrial housing construction: yesterday, today, tomorrow [Industrial'noe domostroenie: vchera, segodnya, zavtra] // Housing Construction. 2018. No. 10. Pp. 22–26. ISSN 0044-4472.
2. Subbotin O. S. Architecture of railway complexes in urban system [Arkhitektura zheleznodorozhnykh kompleksov v sisteme goroda] // Housing Construction. 2013. No. 2. Pp. 9–13. ISSN 0044-4472.
3. Farrakhov A. G. Resource-saving in construction and housing-and-utilities sector [Osobennosti resursosberezheniya v stroitel'stve i zhilishhno-kommunal'nom khozyaystve] // National Interests: Priorities and Security. 2015. No. 11 (296). Pp. 53–60. ISSN 2073-2872.
4. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. 1994. 618 p.
5. Petrova T. M., Sorvacheva Yu. A. Internal concrete corrosion as a factor of decrease of transport objects life [Vnutrennyaya korrozziya betona kak faktor snizheniya dolgovечnosti ob'ektov transportnogo stroitel'stva] // Science and Transport. 2012. No. 4. Pp. 56–60. ISSN 2306-9112.
6. Varakin M. Yu., Ovchinnikov I. G. Features of application of modern types of concrete in transport construction [Osobennosti primeneniya sovremennyykh tipov betona v transportnoy stroitel'stve]

6. Варакин М. Ю., Овчинников И. Г. Особенности применения современных видов бетона в транспортном строительстве // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 2. <https://t-s.today/PDF/22SATS220.pdf>. DOI: 10.15862/22SATS220. eISSN 2413–9807.
7. Функ А. А. Строительство зданий и сооружений в экстремальных климатических условиях: особенности организации работ и используемых стройматериалов // Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 4. <https://t-s.today/PDF/06SATS418.pdf>. DOI: 10.15862/06SATS418. eISSN 2413–9807.
8. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. Москва : АСВ, 2006. 368 с.
9. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / С. Н. Леонович, Д. А. Литвиновский, О. Ю. Чернякевич, А. В. Степанова : монография : в 2 ч. Минск : БНТУ, 2016. 393 с.
10. Талантова К. В., Михеев Н. М. Сталефибробетон и конструкции на его основе : монография. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2014. 280 с.
11. Возможность применения неавтоклавного фибропенобетона в крупнопанельном домостроении / Л. В. Моргун, В. Н. Моргун, Е. В. Пименова [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 19–23. ISSN 0585-430X.
- mennykh vidov betona v transportnom stroitel'stve] // Russian Journal of Transport Engineering. 2020. Vol. 7. No. 2. <https://t-s.today/PDF/22SATS220.pdf>. DOI: 10.15862/22SATS220. eISSN 2413–9807.
7. Funk A. A. The construction of buildings and structures in extremally climatic conditions: features of the organization of works and used materials [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzheniy v ekstremal'nykh klimaticheskikh usloviyakh: osobennosti organizatsii rabot i ispol'zuemykh stroymaterialov] // Russian Journal of Transport Engineering. 2018. Vol. 5. No. 4. <https://t-s.today/PDF/06SATS418.pdf>. DOI: 10.15862/06SATS418. eISSN 2413–9807.
8. Bazhenov Yu. M., Demyanova V. S., Kalashnikov V. I. Modified high-quality concretes [Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony]. Moscow : ASV, 2006. 368 p.
9. Strength, crack resistance and life of constructional concrete at thermal forces and corrosion effects [Prochnost', treshhinostoykost' i dolgovечnost' konstruktсионного бетона pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh] / S. N. Leonovich, D. A. Litvinovskiy, O. Yu. Chernyakevich, A. V. Stepanova : monograph : in 2 books. Minsk : Belarusian National Technical University, 2016. 393 p.
10. Talantova K. V., Mikheev N. M. Steel-fibre-concrete and constructions on its basis [Stalefibrobeton i konstruktсии na ego osnove] : monograph. St. Petersburg : PSTU, 2014. 280 p.
11. Possibility of application of non-autoclave fibrous foam concrete in large-panel construction [Vozmozhnost' primeneniya neavtoklavного fibropenobetona v krupnopanel'nom domostroenii] / L. V. Morgun, V. N. Morgun, E. V. Pimenova et al. // Construction Materials. 2011. No. 3. Pp. 19–23. ISSN 0585-430X.

Объем статьи 0,54 авторских листа

УДК 625.171

Елена Александровна Колисниченко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Россия

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОПУСКА МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЕФЕКТОСКОПИИ НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ

Elena Alexandrovna Kolisnichenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Track and Track Facilities Department, Irkutsk State Transport University (ISTU), Irkutsk, Russia

### Organization of mobile defectoscopy passage at the Eastern polygon

#### Аннотация

Рассмотрен порядок организации пропуска мобильных средств диагностики, в частности дефектоскопии, при реализации полигонных технологий в условиях постоянного роста грузопотока и грузонапряженности на дорогах Восточного полигона. Данная проблема одна из самых актуальных, поскольку мобильные средства дефектоскопии следуют с ограничением скорости, и для их пропуска по участку контроля требуется значительный сьем «ниток» грузовых поездов, что, в свою очередь, является определенным барьером. При существующей схеме пропуска дефектоскопных вагонов возникают срывы в графиках их работы. На основе анализа причин таких срывов предложена иная модель организации пропуска мобильных средств дефектоскопии в рамках Восточного полигона.

**Ключевые слова:** полигонные технологии, дефектоскопия, Восточный полигон, мобильные средства диагностики, безопасность движения.

#### Summary

The paper discusses the procedure for organizing of mobile diagnostic tools passage, in particular, defectoscopy during the implementation test site technologies in the context of a constant increase and growth of freight traffic, traffic density on the roads of the Eastern polygon. This issue is relevant, since mobile flaw detection devices follow with a speed limit and to pass them through the control section requires a significant removal of freight train lines, which in turn is a certain barrier. With the existing scheme for the passage of flaw detection cars, disruptions occur in their work schedules. The analysis of the reasons for the failures made it possible to propose a different model for organizing the passage of mobile flaw detection equipment within the framework of the Eastern polygon.

**Keywords:** polygon technologies, defectoscopy, Eastern polygon, mobile diagnostics, traffic safety.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-68-72

На протяжении всего периода эксплуатации железнодорожного транспорта его развитию уделялось и уделяется большое внимание. В настоящее время на Транссибирской и Байкало-Амурской магистралях одними из приоритетных направлений признаны развитие железнодорожной инфраструктуры и увеличение пропускной и провозной способности [1]. Комплексный план модернизации и расширения магистральной транспортной инфраструктуры до 2024 г. предусматривает увеличение провозной способности БАМа и Транссиба в 1,5 раза — до 180 млн т, а к 2025 г. — до 210 млн т. Стоит отметить, что провозная способность Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей в 2020 г. уже достигла 144 млн т [2]. Рост обеспечен благодаря системному развитию Восточного полигона железных дорог.

С внедрением полигонной технологии на Восточном полигоне наблюдается повышение эффективности перевозочного процесса, увеличение участковой и маршрутной скорости, снижение одиночного пробега локомотивов. Все это было бы невозможно без своевременного мониторинга и качественной диагностики объектов путевого комплекса. Несмотря на совершенствование диагностического оборудования и программного обеспечения, проблема беспрепятственного пропуска мобильных средств диагностики (МСД) в условиях постоянного увеличения грузопотока и грузонапряженности на дорогах Восточного полигона остается актуальной.

Совместное планирование графиков работы вагонов-дефектоскопов с центрами диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры и составление графиков работы вагонов-путеизмерителей в Центре управления содержанием инфраструктуры на Восточном полигоне позволило выявить непроизводительные потери на стыках дорог.

Основные причины потерь — проверка состояния участка пути дорожными диагностическими вагонами только до границы своей дороги и дальнейшая транспортировка без работы до станции разворота или обгона на соседней дороге. Такие участки выявлены в границах Восточно-Сибирской и Забайкальской, Восточно-Сибирской и Дальневосточной железных дорог (участок Олонгодо — Хани). Чтобы исключить подобные случаи, сектор эксплуатации Центра управления содержанием инфраструктуры на Восточном полигоне разработал порядок провер-



срыва графика работы и, как следствие, может привести к нарушению безопасности движения поездов.

Однако мобильные средства дефектоскопии следуют по участку контроля с ограничением скорости ( $40 \pm 5$  км/ч), поэтому для их пропуска потребуется значительный съём «ниток» грузовых поездов, что, в свою очередь, на дорогах Восточного полигона при самой высокой по сети грузонапряжённости реализовать затруднительно. В среднем ежесуточно в границах Восточного полигона работают 15 мобильных средств дефектоскопии, причем в период их работы в среднем снимается 6 «ниток» грузовых поездов, поэтому в целом по полигону ежедневный съём может составить 88 «ниток». Причем для пропуска грузопотока необходимо заблаговременное планирование всех «ниток» поездов (пассажирских, контейнерных, грузовых, хозяйственных единиц) в системе АПК «Эльбрус» с дальнейшей выгрузкой в систему ГИД «Урал-ВНИИЖТ».

Одним из вариантов решения проблемы может стать автоматизация процесса планирования прохода мобильных средств дефектоскопии и исключение влияния человеческого фактора, что позволит снизить риск возможных случаев срыва графиков работы диагностических вагонов и обеспечить рациональный пропуск подвижного состава.

В настоящее время, для того чтобы выделить «нитку» следования на каждое мобильное средство дефектоскопии, в исполненном графике движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» посредством автоматизированной системы АПК «Эльбрус» необходимо в ручном режиме (с участием специалистов отдела планирования и разработки «окон» Дирекции управления движением на Восточном полигоне) пройти стадии согласования по утвержденным месячным графикам работы МСД [4]. А именно РЦДМ разрабатывает проект графиков работы вагонов-дефектоскопов и дефектоскопных автомотрис на месяц с учетом технологических «окон» большой продолжительности и длительных

«закрытий», предназначенных для ремонта объектов инфраструктуры, и передает их для согласования в сектор эксплуатации ЦУСИ ВП [5, 6]. После согласования РЦДМ утверждает данные графики у Первого заместителя начальника железной дороги (НЗ-1) и направляет в адреса причастных подразделений, а также в сектор ЦУСИ ВП. Далее на основании утвержденных графиков сектор эксплуатации ЦУСИ ВП [7] составляет планы на каждое МСД (с указанием литеры поезда и времени отправления согласно нормативному расписанию) и передает их в отдел планирования и разработки «окон» Д ВП, специалисты которого прокладывают маршруты и утверждают «нитки» следования каждого мобильного средства дефектоскопии в автоматизированной системе АПК «Эльбрус» и затем выгружают готовые маршруты в ГИД «Урал-ВНИИЖТ». Кроме того, специалисты отдела учитывают планы работы средств диагностики при разработке вариантов графиков движения. Любые изменения графиков в течение месяца также направляются в сектор ЦУСИ ВП для дальнейшей передачи изменений в Д ВП. Такая схема взаимодействия показана на рис. 5.

Специалисты РЦДМ, помимо графиков работы МСД, составляют ежемесячные планы работ на каждое мобильное средство дефектоскопии и вносят их в автоматизированную систему ЕКАСУИ ДМ НК в виде месячного плана работы [8] согласно утвержденным графикам. Далее из месячных планов составляется рабочее задание на каждый день. Кроме того, специалисты РЦДМ, согласно нормативным документам [9], вносят в автоматизированную программу АС АПВО заявки на локомотивы для работы мобильных средств диагностики. Утверждение «ниток» в программном комплексе АПК «Эльбрус» осуществляет отдел планирования и разработки «окон» Д ВП на основании представленных сектором эксплуатации ЦУСИ ВП планов.

Как следует из всего вышеизложенного, при такой схеме существует риск возникновения ошибок по причине челове-

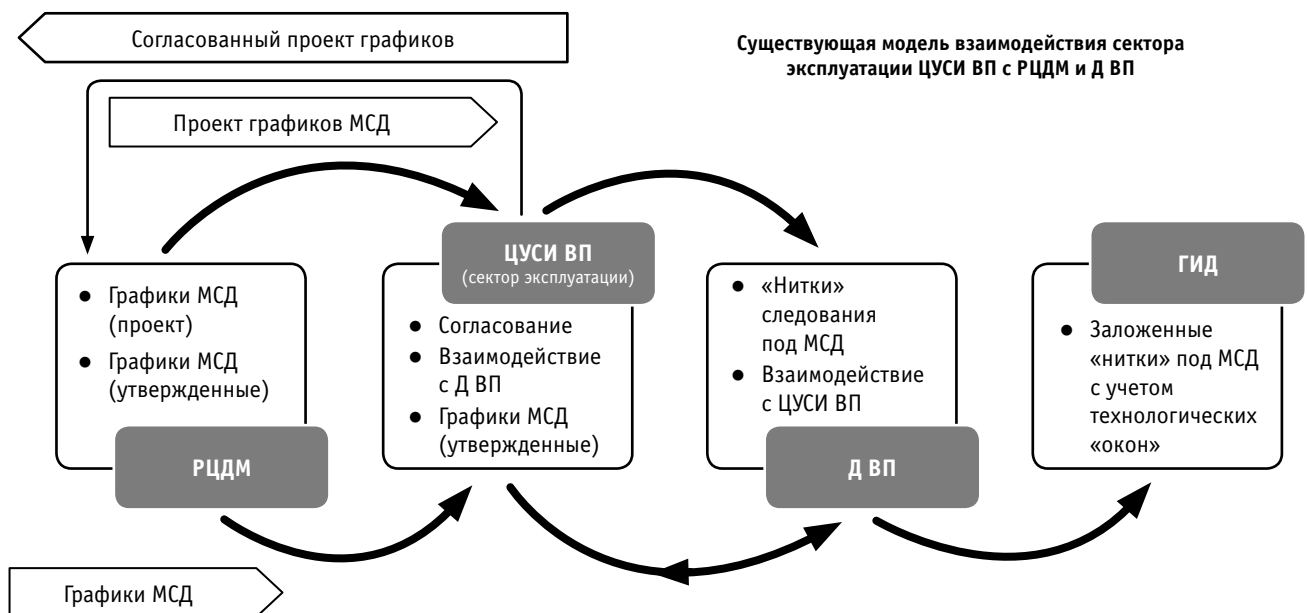


Рис. 5. Схема взаимодействия сектора эксплуатации ЦУСИ ВП с РЦДМ и Д ВП

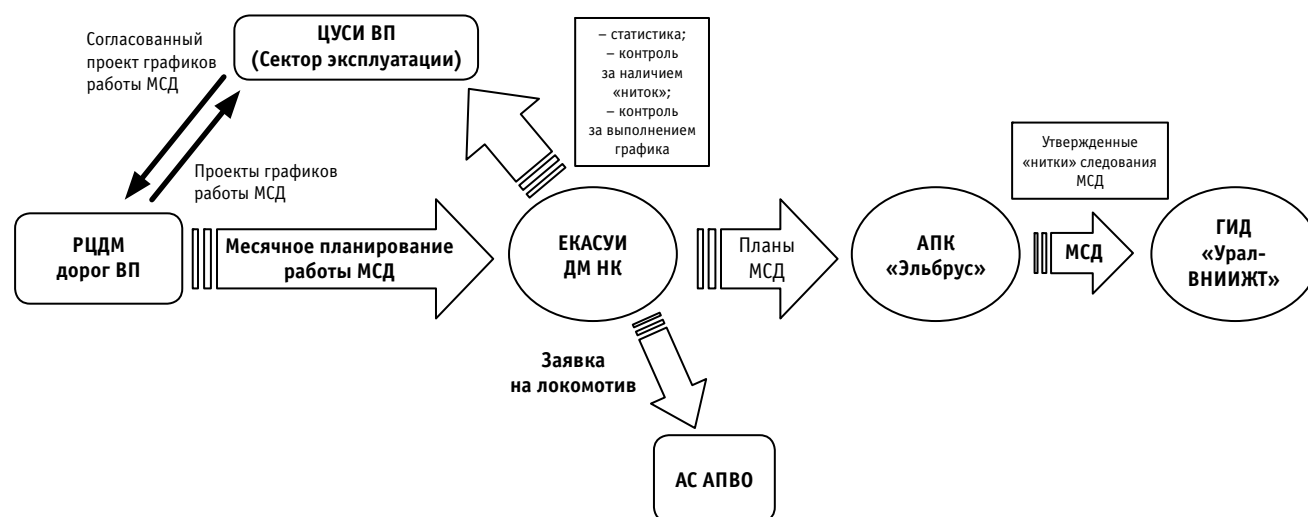


Рис. 6. Предлагаемая схема взаимодействия сектора эксплуатации ЦУСИ ВП с РЦДМ и Д ВП

ского фактора (неверно указаны литер поезда, время отправления), кроме того, может отсутствовать «нитка» следования из-за многократных изменений графиков, временного отсутствия специалистов отдела планирования и разработки «окон» Д ВП (отпуск, больничный), либо при утверждении маршрута следования имеются отклонения от разработанного нормативного расписания (не учтена рабочая скорость вагона-дефектоскопа или дефектоскопной автомотрисы, проследование осуществляется с установленной скоростью без ограничения).

К числу недостатков действующей схемы можно отнести и отсутствие полной аналитики маршрутов проследования, так как в настоящее время статистика и учет ведутся не в автоматизированных системах, а выполняются начальниками смены мобильного средства диагностики в ручном режиме и в свободной форме.

Чтобы исключить перечисленные ошибки, возникающие по причине человеческого фактора, предлагается интегрировать существующие системы ЕК АСУИ ДМ НК и АПК «Эльбрус» для автоматизации процесса по планированию проходов мобильных средств дефектоскопии. Предполагается, что планирование работы МСД будет выглядеть следующим образом. Специалисты РЦДМ разрабатывают проект графика работы мобильных средств дефектоскопии на месяц и передают его в сектор эксплуатации ЦУСИ ВП для согласования графиков с учетом «окон» большой продолжительности и длительных «закрытий», предназначенных для ремонта объектов инфраструктуры. Затем данный проект графиков вводится в систему ЕКАСУИ ДМ НК в виде месячного планирования средств дефектоскопии, а далее на основе месячного планирования создаются рабочие задания на каждый день и на каждое МСД.

Рабочее задание попадает в систему АПК «Эльбрус» в виде участка следования по определенному маршруту (из точки

А в точку В с заложенной скоростью контроля) и далее выгружается в ГИД «Урал-ВНИИЖТ». Также из системы ЕКАСУИ ДМ НК автоматически формируются заявки на выделение локомотивов под средства диагностики в системе АС АПВО. Интегрирование систем ЕКАСУИ ДМ НК и АПК «Эльбрус» позволит получать достоверные статистические данные и полную аналитику о плановом и исполненном маршруте, плановом и фактическом времени отправления и прибытия, контролировать наличие утвержденной «нитки» следования и соответствие ее нормативному расписанию, выполнение заданного маршрута, своевременность готовности экипажа. Предлагаемая схема представлена на рис. 6.

В АПК «Эльбрус» необходимо также предусмотреть возможность корректировки «нитки» следования МСД при условии обязательного согласования данных в системе ЕКАСУИ ДМ НК. Так, при внесении изменений в маршрут следования системой АПК «Эльбрус» в систему ЕКАСУИ ДМ НК должно прийти соответствующее уведомление с перечнем изменений (время отправления, прибытия, перегонное время хода, место и продолжительность стоянки) и новым расписанием следования. Поскольку системы ЕКАСУИ и АС АПВО уже интегрированы, требуется лишь их увязка с ЕКАСУИ ДМ НК в части автоматического формирования заявки на выделение локомотива под мобильные средства дефектоскопии.

Предлагаемое решение позволит исключить ошибки, возникающие по причине человеческого фактора, и получить согласованный управляемый процесс планирования прохода мобильных средств дефектоскопии. Это, в свою очередь, даст возможность свести к минимуму непроизводительные потери и, как следствие, затраты на проведение контроля мобильными средствами дефектоскопии, а также повысить безопасный пропуск поездов.

## Литература

1. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.09.2018 г. № 2101-р.
2. Провозная способность БАМа и Транссиба достигла 144 млн тонн в 2020 году, что соответствует КПМИ. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=260190> (дата обращения: 03.02.2021).
3. Порядок проведения проверки состояния пути и рельсового хозяйства мобильными средствами диагностики на границах дорог Восточного полигона : утв. распоряжением заместителя начальника Центральной дирекции инфраструктуры по Восточному полигону Е. М. Кондратьева от 17.05.2018 г. № 511р.
4. Положение о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД» : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.07.2017 г. № 1471р; с изменениями и дополнениями от 07.11.2017 г. № 2266/р, от 26.04.2019 г. № 787/р, от 14.01.2020 г. № 31/р, от 10.02.2020 г. № 250/р.
5. Регламент взаимодействия Центра управления содержанием инфраструктуры на Восточном полигоне — структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры с Центрами диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной дирекций инфраструктуры : утв. заместителем начальника Центральной дирекции инфраструктуры по Восточному полигону Е. М. Кондратьевым 22.06.2018 г. № ЦДИ-760.
6. Регламент взаимодействия Центра управления содержанием инфраструктуры на Восточном полигоне — структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры с Центрами управления содержанием инфраструктуры Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной дирекций инфраструктуры : утв. заместителем начальника Центральной дирекции инфраструктуры по Восточному полигону Е. М. Кондратьевым от 02.08.2017 г. № ЦДИ-416.
7. Регламент взаимодействия Центра управления содержанием инфраструктуры на Восточном полигоне с Центром управления перевозками на Восточном полигоне : утв. заместителем начальника Центральной дирекции инфраструктуры по Восточному полигону Е. М. Кондратьевым и заместителем начальника Центральной дирекции управления движением Р. В. Хабидуллиным 24.08.2017 г. № ЦД-179.
8. Концепция развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 27.04.2016 г. № 777р.
9. ЕКАСУИ. Функциональность планирования, учета, согласования и контроля выполнения работ в разделе неразрушающего контроля рельсов (дефектоскопия) с использованием технических средств диагностики Управления диагностики и мониторинга инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры — филиала ОАО «РЖД». Руководство пользователя (управление работами средств диагностики).

## References

1. Comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024 [Kompleksnyy plan modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda] : approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 30.09.2018 No. 2101-r.
2. The carrying capacity of the BAM and Transsib reached 144 million tons in 2020, which corresponds to the KPMI [Provoznaya sposobnost' BAMA i Transsiba dostigla 144 mln tonn v 2020 godu, chto sootvetstvuet KPMI]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=260190> (access date: 03.02.2021).
3. The procedure for checking the condition of the track and rail facilities with mobile diagnostic tools at the borders of the roads of the Eastern polygon [Poryadok provedeniya proverki sostoyaniya puti i rel'sovogo khozyaystva mobil'nymi sredstvami diagnostiki na granitsakh dorog Vostochnogo poligona]: approved by the Order of Deputy Head of the Central Directorate of Infrastructure for the Eastern Polygon E. M. Kondratyev dated 05.17.2018 No. 511r.
4. Standing orders on the system of non-destructive testing of rails and the operation of means of rail flaw detection in the track facilities of the railways of JSC RZD [Polozhenie o sisteme nerazrushayushhego kontrolya rel'sov i ekspluatatsii sredstv rel'sovoy defektoskopii v putevom khozyaystve zheleznnykh dorog ОАО «РЖД»] : approved by the Order of JSC RZD dated 26.07.2017 No. 1471r; with amendments and additions dated 07.11.2017 No. 2266/r, dated 26.04.2019 No. 787/r, dated 14.01.2020 No. 31/r, dated 10.02.2020 No. 250/r.
5. Regulations for interaction of the Infrastructure Maintenance Center at the Eastern polygon — a structural subdivision of the Central Directorate of Infrastructure with the Centers for Diagnostics and Monitoring of Infrastructure Devices of the Krasnoyarsk, East Siberian, Trans-Baikal and Far Eastern Infrastructure Directorates [Reglament vzaimodeystviya Tsentra upravleniya soderzhaniiem infrastruktury na Vostochnom poligone — strukturnogo podrazdeleniya Tsentral'noy direksii infrastruktury s Tsentrami diagnostiki i monitoringa ustroystv infrastruktury Krasnoyarskoy, Vostochno-Sibirskoy, Zabaykal'skoy i Dal'nevostochnoy direktsiy infrastruktury] : approved by the Order of Deputy Head of the Central Directorate of Infrastructure for the Eastern Polygon E. M. Kondratyev dated 22.06.2018 No. TsDI-760.
6. Regulations for interaction of the Infrastructure Maintenance Center at the Eastern polygon — a structural subdivision of the Central Infrastructure Directorate with the Infrastructure Maintenance Centers of the Krasnoyarsk, East Siberian, Trans-Baikal and Far Eastern Infrastructure Directorates [Reglament vzaimodeystviya Tsentra upravleniya soderzhaniiem infrastruktury na Vostochnom poligone — strukturnogo podrazdeleniya Tsentral'noy direksii infrastruktury s Tsentrami upravleniya soderzhaniiem infrastruktury Krasnoyarskoy, Vostochno-Sibirskoy, Zabaykal'skoy i Dal'nevostochnoy direktsiy infrastruktury] : approved by the Order of Deputy Head of the Central Directorate of Infrastructure for the Eastern Polygon E. M. Kondratyev dated 02.08.2017 No. TsDI-416.
7. Regulations for interaction of the Center for Infrastructure Maintenance at the Eastern polygon with the Transportation Control Center at the Eastern Range [Reglament vzaimodeystviya Tsentra upravleniya soderzhaniiem infrastruktury na Vostochnom poligone s Tsentrom upravleniya perevozkami na Vostochnom poligone] : approved by the Order by Deputy Head of the Central Directorate of Infrastructure for the Eastern polygon E. M. Kondratyev and Deputy Head of the Central Directorate of Traffic Control R. V. Khabibullin dated 24.08.2017 No. TsD-179.
8. Concept for development of systems for diagnostics and monitoring of track facilities for the period up to 2025 [Kontseptsiya razvitiya sistem diagnostiki i monitoringa ob'ektov putevogo khozyaystva na period do 2025 goda] : approved by the Order of JSC RZD dated 27.04.2016 No. 777r.
9. EKASUI. Activity accounting, planning, approval and control of work in the section of non-destructive testing of rails (flaw detection) using technical diagnostic tools of the Directorate for diagnostics and monitoring of infrastructure of the Central Directorate of Infrastructure — a branch of JSC RZD. User manual (management of diagnostic tools) [Funktsional'nost' planirovaniya, ucheta, soglasovaniya i kontrolya vypolneniya rabot v razdele nerazrushayushhego kontrolya rel'sov (defektoskopiya) s ispol'zovaniem tekhnicheskikh sredstv diagnostiki Upravleniya diagnostiki i monitoringa infrastruktury Tsentral'noy direksii infrastruktury — filiala ОАО «РЖД». Rukovodstvo pol'zovatelya (upravlenie rabotami sredstv diagnostiki)].

Объем статьи 0,7 авторских листа



УДК 625.143.51(543):625.171:625.172

Виталий Владимирович Атапин, кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия,

Александр Сергеевич Нечушкин, студент факультета «Строительство железных дорог и информационные технологии» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ НА СОСТОЯНИЕ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

Vitaliy Vladimirovich Atapin, PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Head of Rail and Railway Equipment Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia,

Alexander Sergeevich Nechushkin, student, Construction of Track and Information Technology Faculty, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

### Assessment of influence of rail fastening operation on track condition

#### Аннотация

В статье рассматривается один из наиболее важных факторов, который косвенно оценивает работоспособность рельсовых креплений, — количество возникающих отступлений в геометрии рельсовой колеи. На первоначальном этапе исследованы участки железнодорожного пути с типами рельсовых креплений APC-4, ЖБР-65Ш и Vossloh. В процессе исследования получены зависимости и сделаны выводы, характеризующие работоспособность железнодорожного пути на участках с указанными типами рельсовых креплений.

**Ключевые слова:** рельсовое крепление, надежность, работоспособность, верхнее строение пути, анализ, динамика развития, зависимость, отступления, прогнозирование, трудозатраты, подход.

#### Summary

The paper considers the one of the most important factors that indirectly assesses the serviceability of rail fastening — a number of arising faults in geometry of rail track. On the initial stage the authors have studied sections of railway track with ARS-4, ZhBR-65Sh and Vossloh rail fastening. In result of the study, the authors have got dependencies and made conclusions that characterize the serviceability of railway track on sections with specified types of rail fastening.

**Keywords:** rail fastening, reliability, serviceability, track, analysis, development dynamics, dependence, fault, forecasting, labour costs, approach.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-73-78

#### ВВЕДЕНИЕ

**Р**ельсовые крепления — один из важнейших элементов верхнего строения пути, который соединяет рельсы с подрельсовым основанием, т.е. со шпалами [1].

Кроме этого, они решают следующие задачи:

- обеспечение параметров надежности;
- обеспечение параметров геометрии;
- обеспечение пространственной жесткости рельсовой колеи;

снижение вибрации и др.

Согласно [2], промежуточные рельсовые крепления должны также обеспечивать нагрузки, действующие на узел крепления:

горизонтальные продольные силы — 14 кН;

боковые силы в прямых и в кривых радиусами 500 м и более — не менее 50 кН, в кривых радиусами менее 500 м — не менее 100 кН.

При укладке бесстыкового пути каждый узел креплений должен обеспечивать нормативное прижатие рельса к основанию не менее 20 кН. Это достигается затяжкой гаек болтов и шурупов промежуточных креплений с крутящим моментом в соответствии с требованиями, приведенными в [2].

Таким образом, можно сделать вывод, что к работе рельсовых креплений предъявляются достаточно серьезные требования, которые направлены в основном на обеспечение надежности и безопасности в процессе эксплуатации.

#### АНАЛИЗ РАБОТЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

На Куйбышевской дирекции инфраструктуры эксплуатируются разные типы промежуточных рельсовых креплений (табл. 1).

Согласно статистическим данным на 2020 г., в процентном соотношении наибольшую протяженность составляют участки железнодорожного пути со креплением типа

КБ-65 — практически 50 %. Крепления ЖБР уложены на 15 % от общей протяженности укладки. ЖБР-65Ш составляют чуть более 10 %, анкерное крепление APC — около 9 %. Немалую долю занимает бесподкладочное шурупно-дюбельное крепление Vossloh (Фоссло) — 5 %.

При анализе тенденции укладки различных типов рельсовых креплений можно заметить, что именно три вида (ЖБР-65Ш, APC-4 и Vossloh) имеют существенный прирост за последние годы и представляют наибольший интерес с точки зрения изучения их надежности и оценки работоспособности.

Рельсовое крепление APC-4 (рис. 1) — безболтовое анкерное с упругой клеммой. Оно состоит из двух клемм, двух монорегуляторов, двух подклеммников, двух уголков изолирующих и двух резиновых прокладок [3]. Главные преимущества данного крепления — малодетальность и простота в обслуживании.

Рельсовое крепление ЖБР-65Ш (рис. 2) — беспрокладочного типа, крепится к шпале с помощью шурупов и дюбелей. Крепление состоит из двух упорных стальных скоб, упругой прокладки, двух прижимных скоб, двух резиновых прокладок, четырех пружинных клемм,

двух шурупов и двух упругих клемм. Преимущество данного крепления — понижение давления, передаваемого от шпал на земляное полотно.

Рельсовое крепление Vossloh (рис. 3) — с упругой клеммой. Область его применения разнообразна: участки кривых малого и среднего радиуса, грузонапряженные участки и т.д. Крепление состоит из двух упругих клемм, двух рельсовых шурупов с несъемной шайбой, одной рельсовой прокладки, углонаправляющей плитки и двух пластмассовых дюбелей [3]. Особенность этого крепления заключается в регулировке рельсовой колеи  $\pm 15$  мм с шагом 2,5 мм путем использования различных углонаправляющих плиток.

Надежность — это важнейший показатель рельсовых креплений, который отражает общую работоспособность железнодорожного пути и складывается из ряда факторов, напрямую или косвенно связанных с работой рельсовых креплений [4]. Один из таких факторов — количество возникающих в геометрии рельсовой колеи отступлений. Этот фактор косвенный, но именно он определяет количественную и качественную работу железнодорожного пути, а также объем затрат, требуемых для его поддержания в заданном уровне риска и безопасном для пропуска поездов [5, 6].

Для исследования влияния указанного фактора на работу верхнего строения железнодорожного пути были взяты три участка с разными типами рельсовых креплений: APC-4, ЖБР-65Ш и Vossloh. По этим участкам выполнен анализ динамики развития отступлений за шестилетний период от момента их первоначаль-

Таблица 1

Типы эксплуатируемых рельсовых креплений на Куйбышевской дирекции инфраструктуры

Типы промежуточных рельсовых креплений	Протяженность укладки, км	Доля, %
SBS SL-1 — бесподкладочное упругое шурупно-дюбельное (Швихаг)	189	0,003
Vossloh — бесподкладочное шурупно-дюбельное (Фоссло)	362777	5,04
APC — безболтовое анкерное	611109	8,49
Д2 — раздельное шурупно-болтовое с жесткими клеммами	1499	0,03
Д0 — смешанное костыльное	629531	8,74
ЖБР — нераздельное бесподкладочное пружинное	1029100	14,29
ЖБР-65 — бесподкладочное упругое болтовое	277427	3,85
ЖБР-65ПШ — подкладочное упругое шурупно-дюбельное	34042	0,47
ЖБР-65ПШМ — нераздельное подкладочное пружинное модернизированное	32954	0,46
ЖБР-65ПШР — нераздельное подкладочное пружинное с полимерной подкладкой	9258	0,13
ЖБР-65Ш — бесподкладочное упругое шурупно-дюбельное	761635	10,58
К2 — раздельное шурупно-болтовое с жесткими клеммами	2136	0,03
КБ — раздельное клеммно-болтовое с жесткими клеммами	3425853	47,57
КД — раздельное клеммно-болтовое с жесткими клеммами	23250	0,32
Пандрол-350 — безболтовое анкерное упругое	151	0,002
Нет данных	1153	0,02
Общий итог	7202064	100



Рис. 1. Внешний вид рельсового крепления APC-4



Рис. 2. Внешний вид рельсового крепления ЖБР-65Ш



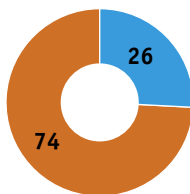
Рис. 3. Внешний вид рельсового крепления Vossloh

ной укладки [7]. Характеристика участков приведена в табл. 2, состояние плана линии на каждом из участков представлено на рис. 4.

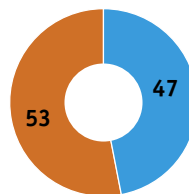
Участки подбирались таким образом, чтобы у них был практически одинаковый пропущенный тоннаж и относительно схожие условия эксплуатации.

В процессе анализа рассматривалась динамика развития отступлений по каждому из видов, а также по их сумме за год и месяцы. Данные по общему количеству отступлений за каждый месяц в определенном году приведены в табл. 3. При анализе сводной ведомости по всем отступлениям по годам видно, что наибольшее количество одних из самых опасных отступлений 3-й степени наблюдается на участке со скреплениями APC-4 — 105 отступлений, в то время как на участках с ЖБР-65Ш и Vossloh — соответственно 21 и 3 отступления (см. табл. 3).

Бугуруслан-Заглядино (APC-4)



Раевка-Давлеканово (ЖБР-65Ш)



Симская-Ерал (Vossloh)

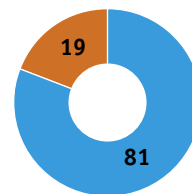


Рис. 4. Количество прямых и кривых на анализируемых участках, %:

■ — кривые; ■ — прямые

Таблица 2

Характеристика анализируемых участков

Показатели	Тип рельсовых скреплений		
	APC-4	ЖБР-65Ш	Vossloh
	Перегон Бугуруслан — Заглядино	Перегон Раевка — Давлеканово	Перегон Симская — Ерал
ПЧ (путь)	ПЧ-14 (1 путь)	ПЧ-15 (1 путь)	ПЧ-18 (1 путь)
Номера километров	1284–1296	1509–1521	1766, 1769–1780
Грузонапряженность на 2020 г., млн ткм брутто/км в год	129	129	113

Таблица 3

Сводная ведомость общего количества отступлений по месяцам

Год	Скрепление APC-4											
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
2015	45	32	82	99	118	107	112/1	57/2	38	67	112/1	112
2016	108/5	106/1	180/1	170/1	159/7	155/5	146	135	141	182/1	198	93
2017	116	161/2	196/1	271/3	260/1	216/3	195	63/1	61	65/1	70	64
2018	59	81	86/1	190	102	105	121	136	145	154	200/5	91/1
2019	112	105	175/3	195/3	207/6	159	184/1	209/5	196/7	183/9	122/4	94
2020	99/3	67/5	148/4	88/2	106	92	78	64	69/5	73/1	59/2	67
Итого по месяцам	539	552	867	1013	952	834	836	664	650	724	761	521
Год	Скрепление ЖБР-65Ш											
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
2015	13	23	44	14	21	14	12	6	8	10	26	31
2016	19	18	54	38	42	38	30	10	22	43	34	45
2017	38	68	75	86	40	45	44	50/1	70	62	50/1	0
2018	57	77	68/1	130	82	88/2	92	81	98/1	130	57/1	68
2019	116	131/2	205/5	132/2	146	137	126/1	162	108	166/1	148	89
2020	59	92	178/2	215	258	102	53	45	70	50	18	18
Итого по месяцам	302	409	624	615	589	424	357	354	376	461	333	251
Год	Скрепление Vossloh											
	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
2015	1	2	1	4	0	3	1	3	1	3	2	1
2016	2	1	2	2	2	0	1	1	2	0	2	3
2017	13	11	9	19/1	9/1	8	9	4	11	11	17	6
2018	8	8	6	30	19	12	13	11	13	14	13	11
2019	7	3	25	15	14	22	19/1	12	19	17	11	15
2020	10	16	17	31	24	14	27	26	33	43	18	0
Итого по месяцам	41	41	60	101	68	59	70	57	79	88	63	36

Примечание: в знаменателе приведено количество отступлений 3-й степени.

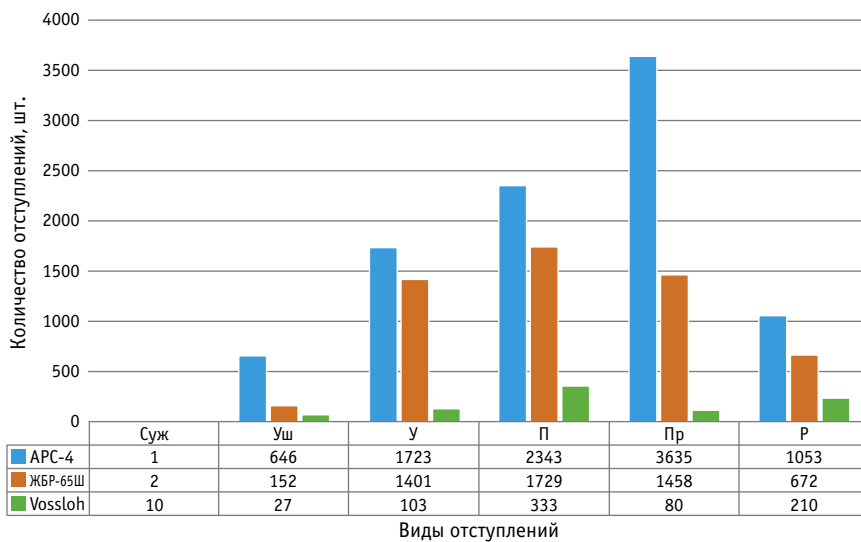


Рис. 5. Распределение общего количества отступлений по видам

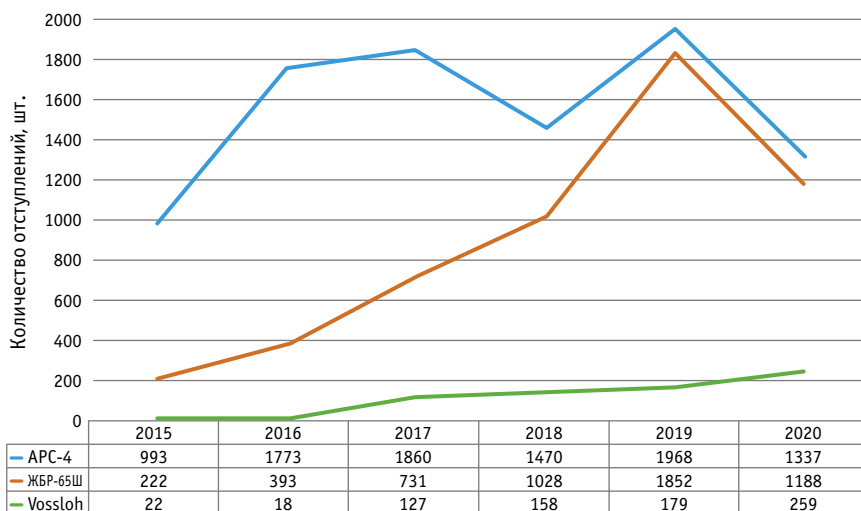


Рис. 6. Динамика изменения общего количества отступлений за 6 лет

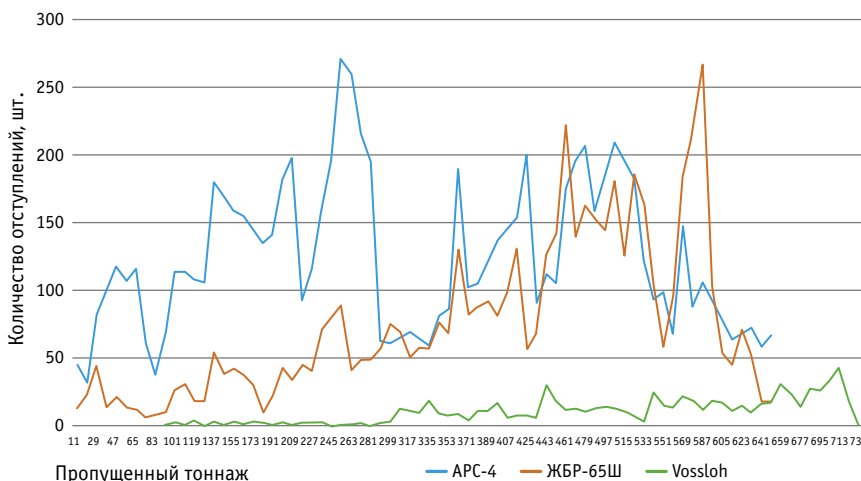


Рис. 7. Динамика развития отступлений в зависимости от пропущенного тоннажа

На рис. 5 представлена гистограмма распределения общего количества отступлений по видам: «сужение», «уширение», «уровень», «перекос», «просадка», «рихтовка». Исходя из анализа данного рисунка можно сделать вывод, что у крепления APC-4 наибольшее количество отступлений возникает по параметру «просадка», у ЖБР-65Ш и Vossloh — по параметру «перекос». Наименьшее количество отступлений для всех типов рельсовых креплений наблюдается по параметру «сужение».

Наибольшее количество отступлений возникает в период с марта по апрель и с сентября по ноябрь, что, вероятнее всего, связано с оттаиванием балласта, а также с выполнением ремонтно-путевых работ.

Динамику развития общего количества отступлений за весь анализируемый период иллюстрируют графики, представленные на рис. 6. Как следует из этих графиков, участок со креплением APC-4 уже в первый год эксплуатации показывает резкий рост отступлений (993 шт.) при относительно благоприятном плане линии (26 % кривых участков пути). Участок со креплением ЖБР-65Ш характеризуется относительно невысоким количеством отступлений (222 шт.) на начальных этапах эксплуатации и их прогнозируемым ростом в последующие годы. Участок со креплением Vossloh имеет наименьшее количество отступлений (22 шт.) и отличается стабильностью работы.

Для оценки влияния различных типов рельсовых креплений на общее состояние верхнего строения пути построены графики динамики развития отступлений в зависимости от пропущенного тоннажа (рис. 7) и сделаны следующие выводы: наименьшее количество отступлений наблюдается на участке со креплением Vossloh;

наибольшее количество отступлений выявляется на участке со креплением APC-4. На протяжении всего периода эксплуатации имеется скачкообразная динамика возникновения отступлений, что свидетельствует о нестабильной работе креплений APC-4;

на участках со креплением ЖБР-65Ш количество отступлений увеличивается постепенно с ростом пропущенного тоннажа;

динамика развития отступлений на участках со скреплениями APC-4 и ЖБР-65Ш после пропуска 300 млн т брутто является схожей;

большинство резких пиковых изменений в количестве возникающих отступлений на всех типах рельсовых скреплений, как правило, приходится на одинаковые показатели пропущенного тоннажа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рельсовые скрепления относятся к тем связующим элементам железнодорожного пути, от работоспособности которых зависит не только состояние верхнего строения пути, но и надежность всей конструкции в целом.

В процессе эксплуатации на работоспособность рельсовых скреплений влияет ряд факторов, одни из которых можно оценить напрямую, а другие — косвенно. Среди всех косвенных факторов наибольший интерес с точки зрения оценки влияния работы различных типов рельсовых скреплений на состояние верхнего строения пути представляет анализ количества возникающих отступлений в геометрии рельсовой колеи. Несмотря на то что данный фактор является косвенным, именно он — главный индикатор, который отражает надежность работы всей конструкции железнодорожного пути.

На первоначальном этапе для оценки этого фактора были проанализированы данные по отдельно выбранным участкам железнодорожного пути со скреплениями типа APC-4, ЖБР-65Ш и Vossloh Куйбышевской дирекции инфраструктуры (остальные типы рельсовых скреплений станут предметом дальнейших исследований). В процессе анализа рассматривалась динамика развития количества отступлений в зависимости от времени года, пропущенного тоннажа, вида возникающих отступлений, типа рельсовых скреплений и иных условий эксплуатации.

По результатам анализа построены зависимости изменения количества отступлений на рассмотренных типах рельсовых скреплений от пропущенного тоннажа.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы.

1. В процессе эксплуатации наименьшее количество отступлений возникает на участке железнодорожного пути со скреплением Vossloh.

2. На участке со скреплением APC-4 наблюдается наибольшее количество отступлений, особенно на начальном этапе эксплуатации. Участок, где уложен этот вид рельсовых скреплений, является нестабильным, имеющим скачкообразное развитие отступлений. Периоды, когда на участке со скреплением APC-4 отмечается резкое снижение количества отступлений, вероятнее всего, связаны с регулярным проведением ремонтно-путевых работ, что влечет за собой дополнительные затраты. Для уточнения данного факта будут проведены отдельные исследования, цель которых — формирование зависимостей динамики развития отступлений от трудозатрат.

3. Динамика развития отступлений на участках со скреплениями ЖБР-65Ш и Vossloh является стабильно изменяющейся и прогнозируемой.

Полученные результаты достаточно наглядно отображают работу железнодорожного пути на участках с разными типами рельсовых скреплений. Сформированные зависимости дают возможность для создания в будущем научно обоснованного подхода, позволяющего оценивать состояние верхнего строения пути и прогнозировать динамику его изменения [8].

Положительный результат данного подхода заключается в том, что при помощи анализа динамики изменения отступлений на участках с различными типами рельсовых скреплений возможно решить следующие задачи:

определить участки с нестабильным состоянием, в том числе уровень их предостказности [9];

выявить участки, где тот или иной тип рельсовых скреплений работает неэффективно;

обнаружить участки, которые требуют излишних трудозатрат; установить причину возникающих расстройств по виду обрзающихся отступлений.

## Литература

1. Петров А. В., Савин А. В., Лебедев А. В. Анализ требований российских и европейских стандартов к рельсовым скреплениям // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 9. С. 22–27. ISSN 0131–5765.
2. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2544/р.
3. Бочкарев Д. И., Лапушкин А. С. Современное состояние, анализ работы и перспективы развития промежуточных рельсовых скреплений // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 2 (47). С. 85–92. ISSN 1995–0470.
4. Аккерман Г. Л., Щепин К. М. Основные факторы и причины возникновения отказов в работе железнодорожного пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2015. № 3. С. 18–22.

## References

1. Petrov A. V., Savin A. V., Lebedev A. V. Analysis of requirements of Russian and European standards for rail fastenings [Analiz trebovaniy rossiyskikh i evropeyskikh standartov k rel'sovym skrepleniya] // Railway Track and Facilities. 2016. No. 9. Pp. 22–27. ISSN 0131–5765.
2. Instructions on laying, maintenance and repair of continuous welded rail track [Instruktsiya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besстыkovogo puti] : approved by the Order of JSC RZD dated 14.12.2016 No. 2544/p.
3. Bochkarev D. I., Lapushkin A. S. Modern condition, analysis of work and prospects of development of intermediate rail fastenings [Sovremennoe sostoyanie, analiz raboty i perspektivy razvitiya promezhutochnykh rel'sovykh skrepleny] // Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials. 2019. No. 2 (47). Pp. 85–92. ISSN 1995–0470.
4. Akkerman G. L., Schepin K. M. The main factors and causes of failure in service of railway track [Osnovnye faktory i prichiny vozniknoveniya otkazov v rabote zheleznodorozhnogo puti] // Designing of development of regional railway network. 2015. No. 3. Pp. 18–22.

5. Атапин В. В., Чекин А. А. Анализ динамики изменения состояния железнодорожного пути с целью повышения скоростей движения // Наука и образование транспорту. 2018. № 2. С. 114–118.
6. Седелкин Ю. А., Атапин В. В. Анализ состояния верхнего строения пути и земляного полотна на основе результатов обследования диагностическими средствами // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 7. С. 13–15. ISSN 0131–5765.
7. Каргапольцев С. К., Даваадорж Б. Анализ надежности рельсового крепления пути при ограниченном объеме данных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2 (50). С. 123–128. ISSN 1813–9108.
8. Садырин Е. А. Использование метода прогнозирования для сравнительного анализа технического состояния рельсовых креплений // Молодая наука Сибири. 2020. № 2 (8). С. 88–93. ISSN 2658–610X.
9. Седелкин Ю. А., Атапин В. В. Методология УРРАН для определения предотказного состояния инфраструктуры // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 3. С. 8–11. ISSN 0131–5765.

5. Atapin V. V., Chekin A. A. Analysis of dynamics of changing the condition of railway track in order to increase train speeds [Analiz dinamiki izmeneniya sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti s tsel'yu povysheniya skorstey dvizheniya] // Science and Education for Transport. 2018. No. 2. Pp. 114–118.
6. Sedelkin Yu. A., Atapin V. V. Analysis of track and railway formation condition on the basis of results of monitoring by means of diagnostic facilities [Analiz sostoyaniya verkhnego stroeniya puti i zemlyanogo polotna na osnove rezul'tatov obsledovaniya diagnosticheskimi sredstvami] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 7. Pp. 13–15. ISSN 0131–5765.
7. Kargapoltsev S. K., Davaadorzh B. Rail fastening reliability analysis with a limited amount of data [Analiz nadezhnosti rel'sovogo skrepleniya puti pri ogranichennom ob'eme dannykh] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2016. No. 2 (50). Pp. 123–128. ISSN 1813–9108.
8. Sadyrin E. A. The forecasting method in comparative analysis of the condition of the rail fastening system [Ispol'zovanie metoda prognozirovaniya dlya sravnitel'nogo analiza tekhnicheskogo sostoyaniya rel'sovykh skrepleny] // Young Science of Siberia. 2020. No. 2 (8). Pp. 88–93. ISSN 2658–610X.
9. Sedelkin Yu. A., Atapin V. V. URRAN (Management of resources, risks and reliability during life-cycle) methodology for determination of pre-failure condition of infrastructure [Metodologiya URRAN dlya opredeleniya predotkaznogo sostoyaniya infrastruktury] // Railway Track and Facilities. 2015. No. 3. Pp. 8–11. ISSN 0131–5765.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 625.46

Артеми́й Дми́триевич Фе́досов, аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия,

Евге́ний Серге́евич Антере́йкин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия

## СРАВНЕНИЕ ОБЪЕМОВ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ УЧАСТКОВ ТРАМВАЙНОГО ПУТИ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Artemiy Dmitrievich Fedosov, postgraduate student, Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia,

Evgeniy Sergeevich Antereykin, PhD in Engineering, Associate Professor, Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University (STU), Novosibirsk, Russia

### Comparison of work volumes on maintenance of tram track sections on various stages of life cycle

#### Аннотация

В статье на примере двух трамвайных участков по ул. Титова и ул. Связистов в Новосибирске дана оценка технического состояния рельсовых путей. Выполнено сравнение участков по коэффициенту виновности в сходах подвижного состава с трамвайного пути, выявлены основные причины таких сходов. Установлены объемы текущего содержания трамвайных путей и требуемые для этого трудозатраты, а также определены работы, составляющие основную долю трудозатрат за 5 лет по обоим рассматриваемым участкам. Для контроля положения рельсового пути с целью обеспечения комфортабельной и безопасной перевозки пассажиров рекомендовано использование путеизмерительной тележки.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, трамвайный путь, балльная оценка, сход вагона, верхнее строение пути, трудозатраты, неисправность.

#### Summary

The paper presents the assessment of technical condition of track on the example of two tram sections on Titov and Svyazistov streets in Novosibirsk. The authors have compared sections by the number of derailments and have revealed the main reasons of the derailments. As a result, they have established the volumes of maintenance of tram tracks and the required labour costs, as well as the works that make the main share of labour costs for 5 years on both considered sections. In order to control the track position for the provision of comfortable and safe transportation of passengers the authors recommend to use a track measuring truck.

**Keywords:** maintenance, tram track, numerical assessment, derailment, track, labour costs, fault.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-79-84

Трамвайная система Новосибирска была открыта в 1934 г. [1]. В настоящее время общая протяженность трамвайных линий в левобережной части города составляет 83,65, в правобережной — 63,86 км. Их эксплуатация осуществляется автономно в связи с ликвидацией в начале 1990-х гг. трамвайного движения по Октябрьскому мосту через Обь. Перевозки пассажиров трамвайным транспортом выполняет муниципальное казенное предприятие «Горэлектротранспорт» (МКП «ГЭТ») — структурное подразделение Управления пассажирских перевозок департамента транспорта и дорожно-благоустроительного комплекса мэрии Новосибирска [2]. В состав МКП «ГЭТ» входят два трамвайных филиала — «Левобережный трамвайный» и «Правобережный трамвайный». С февраля 2020 г. капитальные ремонтные работы и текущее содержание трамвайных путей выполняет подрядная организация ООО «Служба пути», ранее — ООО ПСК «Пикет».

Для сравнительного анализа объемов работ по техническому обслуживанию трамвайного пути выбраны два участка, которые отличаются между собой техническим состоянием. Первый участок — от остановочного пункта (далее — о.п.) «Микрорайон Чистая Слобода» до о.п. «ул. Бийская» (ул. Титова) — проложен в 2017 г. В связи с хорошим состоянием трамвайного пути от о.п. «Микрорайон Чистая Слобода» до узла «Клуб им. Чехова» было решено рассмотреть данный участок полностью. Второй участок — от кривой ул. Невельского до узла «Юго-Западный железнодорожный мост» (ул. Связистов) — имеет глухое пересечение с ул. Титова и характеризуется частично неудовлетворительным и удовлетворительным техническим состоянием трамвайных путей. Ведомость рассматриваемых участков за последние 5 лет, составленная на основе норм [3], приведена в табл. 1. В соответствии с [3] состояние трамвайного пути считается по количеству баллов на 1 км

одиноким пути и имеет следующие значения: отличное, если сумма баллов не превышает 200, хорошее — от 201 до 300 баллов, удовлетворительное — от 301 до 500 баллов, неудовлетворительное — более 500 баллов.

В табл. 1 приведены данные по тем участкам трамвайных путей, которые характеризуются наиболее плохим и хорошим техническим состоянием. На протяжении последних 5 лет балльные оценки всех участков существенно не изменялись.

Значение балльной оценки участка ул. Связистов от кривой ул. Невельского до узла «ул. Волховская» в несколько раз превышало показатели других участков. Поскольку этот трамвайный участок находится в неудовлетворительном состоянии, можно увидеть, что с 2016 по 2019 г. наблюдается значительное снижение балльной оценки с небольшим ее приростом в 2020 г.

На ул. Связистов от кривой ул. Невельского до глухого пересечения с ул. Титова уложен трамвайный путь, включающий трамвайные желобчатые рельсы ТВ60 в прямых участках и ТВ65 в кривых, а также железнодорожные рельсы Р65, закрепленные к деревянной шпале костыльным скреплением на щебеночном основании. Со времени укладки (1978 г.) работы по капитальному ремонту трамвайного пути здесь ни разу не проводились. Необходимо отметить, что этот участок подтопляется талыми водами весной и дождевыми в осенне-летний период, однако системы водоотведения отсутствуют. От глухого пересечения с ул.

Титова до узла «Юго-Западный ж.-д. мост» уложены железно-дорожные рельсы Р65 на железобетонных шпалах трамвайного типа. В пределах данного участка также находится кривая ул. Оборонной, переукладка которой выполнена в 2010 г. Этот отрезок путей не входит в зону подтопляемых участков, что положительно сказывается на его балльной оценке.

По ул. Титова от узла «Клуб им. Чехова», прошедшего капитальный ремонт в 2009 г., проложен участок до о.п. «ул. Бийская» на железобетонных шпалах и рельсах Р65. Он характеризуется хорошим состоянием, поэтому за последние 5 лет здесь не было ни одного случая сходов подвижного состава с трамвайных путей. На участке от о.п. «ул. Бийская» до о.п. «Микрорайон Чистая Слобода», построенном в 2017 г., уложены деревянные шпалы на костыльном скреплении с щебеночным балластом. Грунты участка имеют недостаточную несущую способность, поэтому сооружаемые насыпи не раз теряли свою форму. Одним из способов усиления трамвайного пути стало сооружение двухметровых насыпей (самые высокие в трамвайной сети города Новосибирска), укрепленных георешеткой. В настоящее время на новом участке проблемы при пассажироперевозках сведены к минимуму.

При эксплуатации подвижного состава бесперебойность его движения может быть нарушена сходами вагонов с рельсового пути. Статистика сходов на двух рассматриваемых участках за последние 5 лет приведена в табл. 2.

Таблица 1

Ведомость трамвайных путей с оценкой технического состояния

Участок		Год укладки / капитального ремонта	Протяженность, км	Оценка состояния, балл				
				2016	2017	2018	2019	2020
Ул. Титова	уз. «Клуб им. Чехова»	1967/2009	0,384	36	36	30	36	60
	уз. «Клуб им. Чехова» – уз. «ул. Связистов»	1997	2,78	130	100	130	90	160
	уз. «ул. Связистов» – о.п. «ул. Бийская»	1995	2,88	240	280	160	148	238
	о.п. «ул. Бийская» – о.п. «Микрорайон Чистая Слобода»	2017	2,53	—	—	20	40	160
Ул. Связистов	кривая ул. Невельского – уз. «ул. Волховская»	1977/1978	5,31	6700	5800	4700	3180	3480
	кривая ул. Оборонной	2010	0,19	30	30	20	0	20
	уз. «ул. Волховская»	1987	0,534	580	580	520	460	498
	уз. «ул. Волховская» – уз. «Юго-Западный ж.-д. мост»	1987	1,5	540	580	660	590	630
	уз. «Юго-Западный ж.-д. мост»	1987	1,267	460	460	580	406	460

Таблица 2

Коэффициент виновности и причины сходов трамвайных вагонов с 2016 по 2020 г.

Год	ул. Титова				ул. Связистов			
	Трамвайный филиал		Вина 000 «Служба пути»	Прочее	Трамвайный филиал		Вина 000 «Служба пути»	Прочее
	Вина водителя	Неисправность вагона			Вина водителя	Неисправность вагона		
2020	—	1	1	1	4	—	2	—
2019	1	2	—	—	1,5	3	1,5	1
2018	1	—	—	—	1,5	2	0,5	1
2017	—	—	—	—	4	6	7	1
2016	2	—	—	—	2,5	3	7,5	1
Всего	4	3	1	1	13,5	14	18,5	4



Коэффициент виновности указывает на вину конкретного филиала или подрядчика. Поскольку виновность может зависеть от нескольких факторов, таких, как, например, неисправность пути и невнимательность водителя, то коэффициент может иметь нецелые значения.

Классификация причин сходов показала, что для участка ул. Титова суммарный коэффициент виновности сходов по вине водителей (нарушение скоростного режима, неверное прохождение специальных частей [4, 5] и др.), а также в результате технической неисправности вагонов (неправильная обточка бандажа колес, обрыв крепления рельсового тормоза и др.) примерно сопоставим, в то время как сход по вине ООО «Служба пути» зафиксирован только 1 раз из-за температурного выброса трамвайного пути. Что касается участка ул. Связистов, здесь сходы по причине плохого состояния верхнего строения пути (уширение или сужение колеи, излом рельса и др.) наиболее распространенные.

Зависимость коэффициента виновности сходов от года строительства трамвайного участка или последнего капитального ремонта представлена на рис. 1.

Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что на участках с большим периодом эксплуатации суммарный коэффициент сходов возрастает многократно. В их число входит участок от кривой ул. Невельского до узла «ул. Волховская», уложенный в 1978 г. (15 сходов), и участки от узла «ул. Волховская» до узла «Юго-Западный ж.-д. мост», уложенные в 1987 г. (34 схода).

Наглядное представление о причинах сходов дают круговые диаграммы, построенные для двух рассматриваемых участков (рис. 2). Из диаграмм следует, что хорошее состояние трамвайного пути позволяет значительно сократить количество сходов подвижного состава по причине неисправности верхнего строения пути.

Эффективный способ, позволяющий избежать стабильного ухудшения состояния трамвайного пути, — проведение капитального ремонта. Как видно из рис. 3, в Новосибирске протяженность участков, требующих ремонта, плавнo нарастает, тогда как выполнение капитального ремонта за последние годы сведено

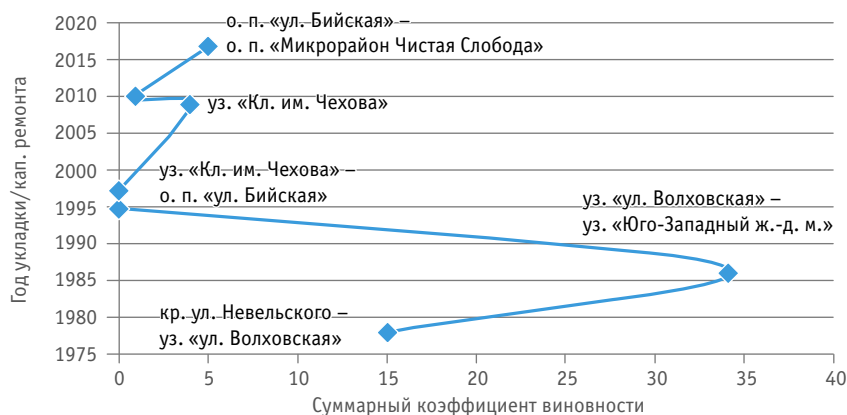


Рис. 1. Зависимость коэффициента виновности сходов от года укладки / капитального ремонта трамвайного участка

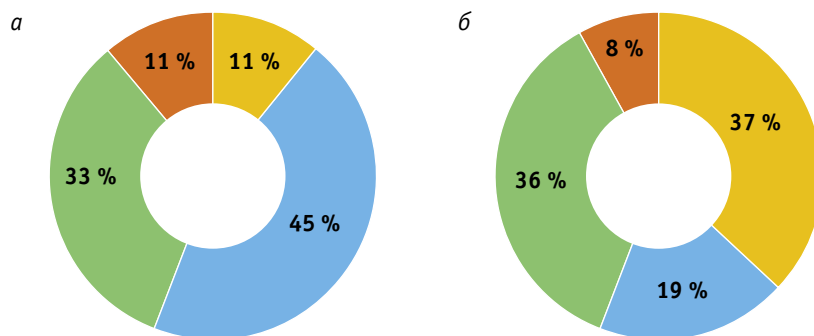


Рис. 2. Классификация сходов по ул. Титова (а) и ул. Связистов (б):

■ — вина ООО «Служба пути»; ■ — вина водителей; ■ — неисправность подвижного состава; ■ — прочее

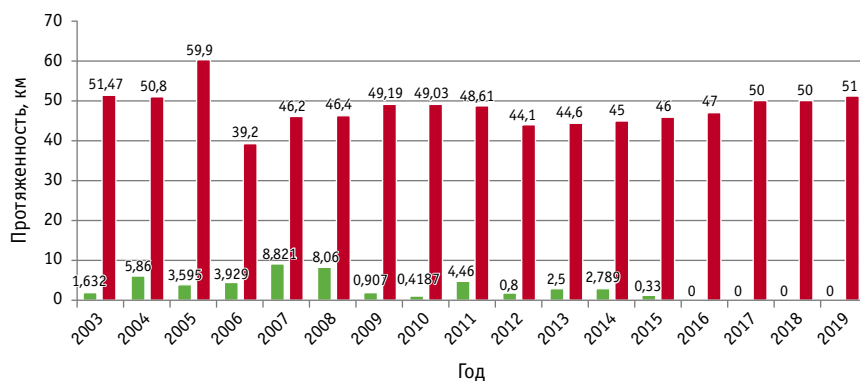


Рис. 3. Динамика объемов капитального ремонта трамвайных путей в 2003–2019 гг.:

■ — капитальный ремонт; ■ — потребность в ремонте

к нулю. В первую очередь это обусловлено тем, что капитальный ремонт заменяется текущим ремонтом.

Для определения объемов текущего содержания трамвайных путей по рассматриваемым участкам были проанализированы ежедневные отчеты ООО «Служба пути» за последние 5 лет. В этих отчетах представлены данные о видах, объемах

и местах выполнения работ по текущему содержанию трамвайных путей.

Также на основе ЕНиР [6] и норм [7] были рассчитаны трудозатраты на выполнение работ. В табл. 3 для ул. Связистов приведена обобщенная характеристика основных работ, в наибольшей мере оказывающих влияние на балльную оценку участка.

Таблица 3

Работы по текущему содержанию путей для ул. Связистов в 2016–2020 гг.

Наименование работ	Кривая ул. Невельского – уз. «ул. Волховская»	Кривая ул. Оборонной	Уз. «ул. Волховская»	Уз. «ул. Волховская» – уз. «Юго-Западный ж.-д. мост»	Уз. «Юго-Западный ж.-д. мост»	Пересечение Титова – Связистов	Трудозатраты на единицу объема работы, чел.-ч	Общие трудозатраты, чел.-ч
1. Одиночная смена шпал, шт.	583	—	—	—	47	45	1,6	1080
2. Одиночная смена рельсов, м	512,3	—	15	—	43,2	56	1,55	971
3. Ремонт стыков, шт.	274	2	21	18	23	15	2,3	811,9
4. Сплошная смена рельсов, м	31,25	—	49,8	—	—	—	8,67	702,7
5. Подъемка пути, м	865	—	16	—	48	179	0,25	277
6. Перешивка пути, м	220,5	—	25	—	15	1	0,89	232,74
7. Рихтовка пути, м	771	—	27	48	34	165	0,2	209
8. Наплавка стыков, шт.	349	3	19	20	32	9	0,46	198,72
9. Наплавка крестовин, шт.	13	—	51	—	49	84	0,78	153,66
10. Установка и ремонт вкладышей, шт.	70	—	8	—	17	1	1,55	148,8
11. Приварка рельсовых электросоединителей, шт.	441	34	85	91	33	25	0,14	99,26
12. Установка путевых тяг, шт.	168	—	32	40	17	9	0,36	95,76
13. Крепление и смазка болтов, шт.	1064	2	264	104	232	125	0,04	71,64
14. Установка контррельсов (охранных брусев), м	—	—	—	—	16,62	—	0,74 на 1 м	12,3
15. Добивка костылей, шт.	221	—	392	—	68	—	0,36 на 100	2,45
Итого								5066,93

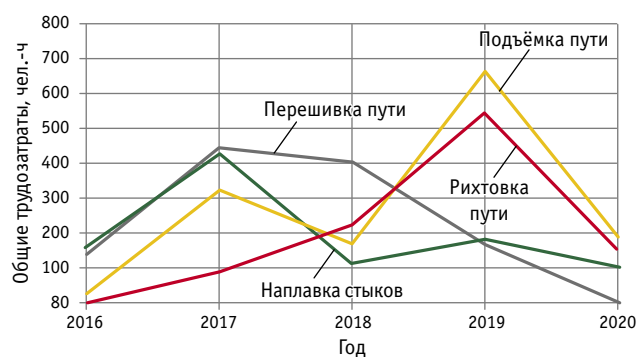
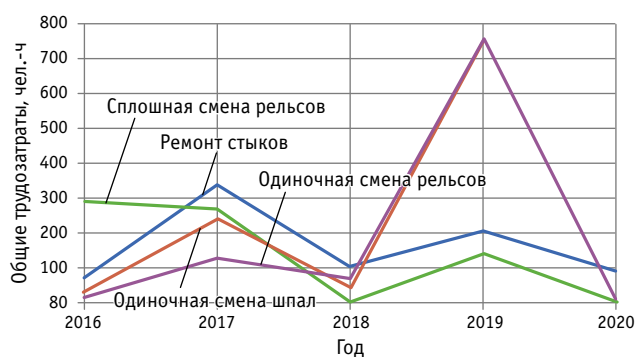


Рис. 4. Динамика изменения трудозатрат по ул. Связистов

Таблица 4

Работы по текущему содержанию путей по ул. Титова в 2016–2020 гг.

Наименование работ	Уз. «Клуб им. Чехова»	Уз. «Клуб им. Чехова» – уз. «ул. Связистов»	Уз. «ул. Связистов» – о.п. «ул. Бийская»	О. п. «ул. Бийская» – о. п. «Микрорайон Чистая Слобода»	Пересечение Титова – Связистов	Трудозатраты на единичный объем работы, чел.-ч	Общие трудовые затраты, чел.-ч
1. Наплавка крестовин, шт.	43	—	—	4	84	0,78	102,18
2. Ремонт стыков, шт.	7	—	1	22	14	2,3	101,2
3. Одиночная смена рельсов, м	—	—	—	5,7	56	1,55	95,64
4. Подъемка пути, м	—	—	—	146,75	179	0,25	81,44
5. Одиночная смена шпал, шт.	—	—	—	—	45	1,6	72
6. Рихтовка пути, м	—	—	—	24	160	0,2	36,8
7. Крепление и смазка болтов, шт.	12	44	44	684	124	0,04	36,32
8. Приварка рельсовых электросоединителей, шт.	12	—	—	173	24	0,14	29,26
9. Установка и ремонт вкладышей, шт.	1	—	—	16	—	1,55	26,35
10. Наплавка стыков, шт.	1	6	8	9	8	0,46	14,72
11. Перешивка пути, м	—	—	—	8,25	1	0,89	8,23
12. Установка путевых тяг, шт.	1	—	—	4	9	0,36	5,04
13. Добивка костылей, шт.	15	—	—	386	—	0,36 на 100	1,44
14. Сплошная смена рельсов, м	—	—	—	—	—	8,67	—
15. Установка контррельсов (охранных брусев), м	—	—	—	—	—	0,74 на 1 м	—
Итого							610,62

Из анализа табл. 3 следует, что наибольшее количество работ выполнялось на особо проблемных участках (кривая ул. Невельского — узел «ул. Волховская», узел «ул. Волховская» и узел «Юго-Западный ж.-д. мост»). По показателю трудозатрат лидируют одиночная смена шпал (1080 чел.-ч), ремонт стыков (811,9 чел.-ч), а также сплошная смена рельсов (702,7 чел.-ч).

Динамика изменения трудозатрат за 5 последних лет по ул. Связистов представлена на рис. 4. Для разных лет характерно преобладание различных видов работ. В частности, в 2019 г. с большой разницей в показателе трудозатрат оказалась одиночная смена шпал и рельсов, в 2017-м — ремонт стыков, в 2016-м — сплошная смена рельсов.

Для ул. Титова аналогичные данные приведены в табл. 4 и на рис. 5.

Можно заметить, что на текущее содержание пути на ул. Титова расходуется значительно меньше трудозатрат в связи с его хорошим состоянием и минимальным влиянием факторов, угрожающих верхнему строению пути.

Из рис. 5 следует, что за последние 5 лет в 2019 г. расходовался наибольший объем трудозатрат. Самыми трудозатратными оказались одиночная смена рельсов и шпал, а также ремонт стыков.

## Выводы

1. На рассмотренных участках наблюдается несоответствие года потребности и объемов проведения капитального ремонта трамвайных путей.

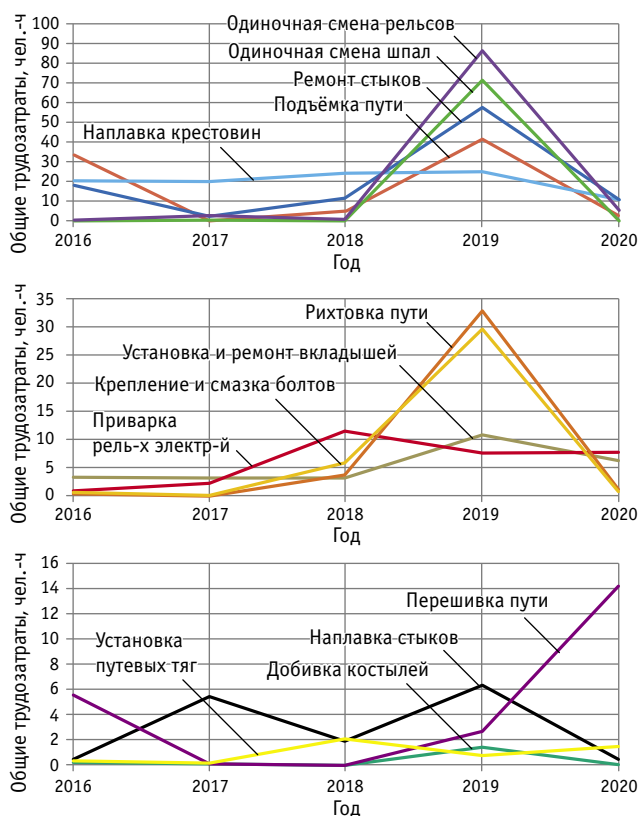


Рис. 5. Динамика изменения трудозатрат по ул. Титова

2. Наихудшая балльная оценка (3480 — неудовлетворительное состояние трамвайных путей) среди рассматриваемых участков ул. Титова и ул. Связистов установлена на отрезке от кривой ул. Невельского до узла «ул. Волховская». Чтобы сохранять балльную оценку участков на одном уровне либо понижать ее, требуется проведение работ в полном объеме по текущему содержанию трамвайных путей.

3. На участках с большим периодом эксплуатации коэффициент виновности в сходах вагонов с рельсов возрастает многократно, при этом хорошее состояние трамвайного пути способствует сокращению данного коэффициента, вызванному неисправностью верхнего строения пути.

4. Общие трудозатраты по текущему содержанию пути на участке ул. Связистов составляют 5066,93 чел.-ч, что на 4456,31 чел.-ч больше, чем на участке ул. Титова (12 % от ул. Связистов). За последние 5 лет основная доля трудозатрат по обоим участкам приходится на работы по ремонту стыков (913,1 чел.-ч), одиночной смене шпал (1152 чел.-ч) и одиночной смене рельсов (1066,64 чел.-ч).

5. Большая часть неисправностей пути связана с наличием неровностей в плане и профиле. Поэтому предлагается регулярно осуществлять сплошной контроль геометрических параметров трамвайного пути при помощи путеизмерительной тележки.

## Литература

1. Золотой век трамвая. Новосибирск: Горэлектротранспорт, 2014. 48 с.
2. Новосибирский «Горэлектротранспорт». URL: <http://www.get-nsk.ru/about/> (дата обращения: 14.03.2021).
3. Инструкция по техническому содержанию трамвайных путей: утв. приказом президента концерна «Росгорэлектротранс» Л. А. Пещеровым от 30.12.1992 г. № 116. Москва, 1992. 95 с.
4. Правила технической эксплуатации трамвая : утв. распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 30.11.2001 г. № АН-103-р. Москва, 2001. 46 с.
5. Должностная инструкция водителя трамвая : утв. муниципальным казенным предприятием г. Новосибирска «Горэлектротранспорт» от 23.04.2019 г. № 14. Новосибирск, 2019. 11 с.
6. ЕНиР. Сборник Е38. Строительство линий электрифицированного городского транспорта. Вып. 1. Устройство трамвайных путей / Госстрой СССР. Москва : Стройиздат, 1987. 48 с.
7. Типовые нормы времени на работы по техническому обслуживанию (текущему содержанию) трамвайных путей / Центральное бюро нормативов по труду при Научно-исследовательском институте труда Государственного комитета СССР по труду и социальным вопросам. Москва, 1985. 61 с.

## References

1. Golden century of tram [Zolotoy vek tramvaya]. Novosibirsk: Gorelektrotransport, 2014. 48 p.
2. The Novosibirsk Gorelektrotransport [Novosibirskiy «Gorelektrotransport»]. URL: <http://www.get-nsk.ru/about/> (access date: 14.03.2021).
3. Instructions on maintenance of tram tracks [Instruktsiya po tekhnicheskomu soderzhaniyu tramvaynykh putey] : approved by the Order of President of Rosgorelektrotrans concern L. A. Peshherov dated 30.12.1992 No. 116. Moscow, 1992. 95 p.
4. Tram engineering instructions [Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii tramvaya] : approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 30.11.2001 No. AN-103-r. Moscow, 2001. 46 p.
5. Job description of a tram driver [Dolzhnostnaya instruktsiya voditelya tramvaya] : approved by the Municipal State Enterprise of Novosibirsk «Gorelektrotransport» dated 23.04.2019 No. 14. Novosibirsk, 2019. 11 p.
6. Unified Norms and Prices. E 38 Collection. Construction of lines of electrified urban transport. Issue 1. Construction of tram tracks [ENiR. Sbornik E38. Stroitel'stvo liniy elektrifitsirovannogo gorodskogo transporta. Vyp. 1. Ustroystvo tramvaynykh putey] / The USSR State Committee for Construction. Moscow : Stroyizdat, 1987. 48 p.
7. Typical time standards on works on maintenance of tram tracks [Tipovye normy vremeni na raboty po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu (tekushhemu soderzhaniyu) tramvaynykh putey] / Central bureau of standards on labour at Research Institute of Labour of the USSR State Committee on Labour and Social Affairs. Moscow, 1985. 61 p.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 621.436

Леонид Валерьевич Плотников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,  
Никита Игоревич Григорьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), главный конструктор ООО «Уральский дизель-моторный завод» (УДМЗ), Екатеринбург, Россия,

Леонид Евгеньевич Осипов, аспирант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия,

Олег Алексеевич Плотников, магистрант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), Екатеринбург, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОМЕХАНИКИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ГАЗА ВО ВПУСКНЫХ СИСТЕМАХ С КАНАВКАМИ ПРИМЕНительно К АВТОМОБИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЯМ

Leonid Valeryevich Plotnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,  
Nikita Igorevich Grigoryev, PhD in Engineering, Associate Professor, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU),  
Chief Designer of Ural Diesel Engine Plant LLC, Ekaterinburg, Russia,

Leonid Evgenyevich Osipov, postgraduate student, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia,

Oleg Alexeevich Plotnikov, graduate student, Turbines and Engines Department, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (UrFU), Ekaterinburg, Russia

## Features of thermomechanics of pulsating gas flows in inlet systems with grooves applicable to automotive engines

### Аннотация

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) широко используются как тепловые машины для преобразования химической энергии топлива в механическую работу на коленчатом валу. Аэродинамические и теплофизические процессы в системах газообмена существенно влияют на эффективность ПДВС. В статье исследуется возможность оказать влияние на газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков газа во впускной системе посредством размещения канала с канавками. Как известно, наличие канавок в канале приводит к формированию значительных вторичных вихрей, которые кардинально меняют физическую картину течения газа. Исследования проводились на лабораторном стенде, который представлял собой одноцилиндровую модель ПДВС с турбонаддувом. Описана система измерений основных физических величин с учетом их высокой динамики. Приведены методики обработки экспериментальных данных. Представлены первичные данные о мгновенных значениях газодинамических и теплообменных характеристик пульсирующих потоков. Установлено, что наличие канала с канавками во впускной системе приводит к снижению степени турбулентности до 40 % и интенсификации теплообмена в диапазоне на 5–50 % по сравнению с базовой системой. Показан положительный эффект в виде роста мощности двигателя на 3 % при использовании модернизированной системы.

**Ключевые слова:** автомобильный двигатель, система газообмена, турбонаддув, аэромеханика потоков газа, теплоотдача, эксплуатационные показатели.

### Summary

Reciprocating internal combustion engines (RICE) are widely used as heat engines for converting the chemical energy of a fuel into mechanical work on the crankshaft. Aerodynamic and thermophysical processes in gas exchange systems significantly affect the efficiency of the RICE. This paper examines the possibility of influencing the gas dynamics and heat transfer of pulsating gas flows in the inlet system by placing a channel with grooves. It is known that the presence of grooves in the channel leads to the formation of significant secondary vortices, which radically change the physical picture of the gas flow. The studies were carried out on a laboratory bench, which was a single-cylinder model of a turbocharged RICE. A system of measurements of basic physical quantities is described, taking into account their high dynamics. Techniques for processing experimental data are presented. Primary data on instantaneous values of gas-dynamic and heat-exchange characteristics of pulsating flows are presented. It was found that the presence of a channel with grooves in the inlet system leads to a decrease in the degree of turbulence to 40 % and an intensification of heat transfer in the range of 5–50 % compared to the basic inlet system. A positive effect is shown in the form of an increase in engine power by 3 % when using the modernized system.

**Keywords:** automotive engine, gas exchange system, turbocharging, aeromechanics of gas flows, heat transfer, performance indicators.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-85-89

## ВВЕДЕНИЕ

**П**оршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) — самые распространенные аппараты периодического действия, которые предназначены для преобразования химической энергии топлива в механическую работу на коленчатом валу. ПДВС широко применяются в транспортном энергомашиностроении, в частности в автомобилестроении. ПДВС также могут использоваться в мобильной энергетике и промышленности в качестве силовых установок. Известно, что двигатель во многом определяет эффективность технического изделия, на котором он установлен. Поэтому совершенствование двигателей остается актуальной задачей в развитии автомобилестроения и энергетики. Конструкция и показатели эффективности системы газообмена существенно влияют на эксплуатационные показатели ПДВС [1, 2]. Теплофизические процессы в данных системах определяют массовый расход и подогрев воздуха, тепловые напряжения в деталях и т.д. Например, в работах [3–5] показано, что за счет совершенствования конструкции впускных и выпускных трубопроводов можно снизить расход топлива (до 5 % по сравнению с базовой модификацией) и улучшить экологические показатели двигателей (вплоть до 15 %). В свою очередь, в статьях [6–8] рассматривается, как на основе применения различных технических устройств в системах газообмена (когенерация, комбинированные циклы, термоэлектрический генератор) также удалось повысить эффективный КПД двигателя (в диапазоне 1–3 %) и снизить количество вредных выбросов в отработавших газах (в среднем почти в два раза по сравнению с базовой конструкцией ПДВС). Кроме того, существуют исследования по настройке системы наддува для повышения эффективности и надежности ПДВС различного назначения [9–11]. Указанные работы подтверждают актуальность научных исследований в этой области, а также свидетельствуют о наличии некоторого потенциала в улучшении эксплуатационных показателей энергетических установок на базе ПДВС.

Известен эффективный способ влияния на газодинамику и теплообмен потоков воздуха для различных приложений, который заключается в нанесении канавок или лунок разных геометрических размеров на поверхность теплообмена [12–14]. Наличие канавок позволяет сформировать за ними сильные вторичные течения, которые приводят к значимой интенсификации теплообмена при незначительном увеличении гидравлического сопротивления.

Научная гипотеза данного исследования состояла в оценке эффективности применения канавок в системах газообмена поршневых ДВС с целью управления теплофизическими процессами и повышения их эффективности. Соответственно задачами исследования были изучение влияния канала с канавками на газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков газа во впускной системе ПДВС, а также расчетно-аналитическая оценка положительных эффектов для автомобильного двигателя от модернизации рассматриваемой системы.

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СТЕНДЫ И ОПИСАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков газа во впускной системе изучали на одноцилиндровой модели автомобильного двигателя (размерность 8,2/7,1), оснащенной системой наддува на базе турбокомпрессора (ТК) типа ТР-6 (рис. 1).

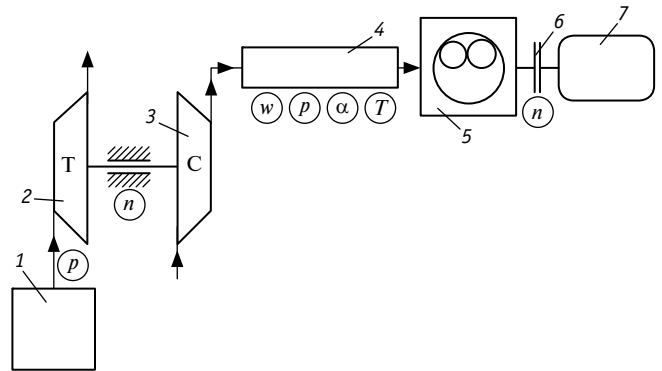


Рис. 1. Компоновка экспериментального стенда и места расположения датчиков:

1 — источник сжатого воздуха для привода ротора ТК; 2 — турбина ТК (Т); 3 — компрессор ТК (С); 4 — впускной трубопровод; 5 — одноцилиндровая модель поршневого двигателя (8,2/7,1); 6 — соединительная муфта; 7 — электрический двигатель для привода коленчатого вала;  $p$  — датчик давления;  $n$  — датчик частоты вращения;  $w$  — датчик скорости потока газа;  $T$  — датчик температуры;  $\alpha$  — датчик для измерения локального коэффициента теплоотдачи

Привод коленчатого вала производили посредством электродвигателя. Привод ротора турбокомпрессора осуществляли за счет подачи сжатого воздуха от внешнего источника на лопаточный аппарат турбины ТК. Диапазон изменения частоты вращения коленвала  $n$  установки составлял 600–3000 мин<sup>–1</sup>, ротора турбокомпрессора  $n_{TC} = 25000–55000$  мин<sup>–1</sup>. Следует отметить, что исследования проводили на «холодной» установке, т.е. без учета процесса сгорания топливно-воздушной смеси в цилиндре двигателя.

В ходе проведения опытов измеряли: 1) давление воздуха на входе в турбину (манометром); 2) скорости вращения ротора ТК  $n_{TC}$  и коленчатого вала ПДВС  $n$  (тахометрами); 3) мгновенные значения скорости потока  $w_x$  (термоанемометром постоянной температуры), давления потока  $p_x$  (быстродействующим датчиком давления) и температуры стенок и потока  $T$  (термопарами) во впускном канале двигателя; 4) локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$  во впускном канале (нитиевым датчиком термоанемометра — аналогией Рейнольдса). Подробно методы определения физических величин изложены в работе [15].

На основании полученных данных определяли расход воздуха  $Q$  через впускную систему двигателя, степень турбулентности потока  $Tu_c$  за один рабочий цикл двигателя, коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}_c$ , осредненный за рабочий цикл двигателя. Расход воздуха находили путем интегрирования характеристики  $w_x = f(\tau)$  за период процесса впуска и последующего

умножения на количество циклов, соответствующее  $n/2$ . Степень турбулентности  $Tu_c$  определяли как отношение средне-квадратичной пульсационной составляющей скорости потока к средней величине скорости потока в канале. Осреднение скорости потока для расчета  $Tu_c$  осуществляли за один рабочий цикл двигателя (т.е. за два оборота коленчатого вала). Интенсивность теплоотдачи  $\alpha_x$  определяли интегрированием зависимости  $\alpha_x = f(\tau)$  также за один рабочий цикл.

Исследования проводили для двух конфигураций впускной системы. Базовый канал имел внутренний диаметр 42 и длину 150 мм. При этом общая длина впускной системы составляла 450 мм. Модифицированный канал имел такие же габаритные размеры, но на его внутренней поверхности были нанесены канавки (рис. 2) овальной формы с размерами  $2,5 \times 5$  мм глубиной около 1,65–1,75 мм. Канавки размещали в шахматном порядке в три ряда.

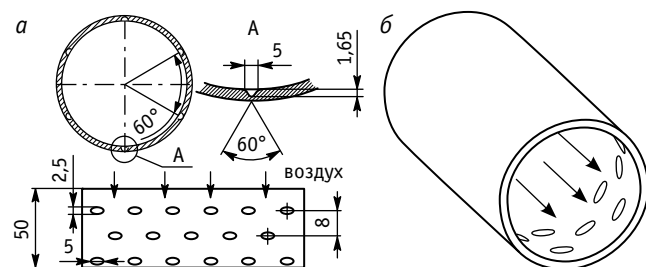


Рис. 2. Геометрические размеры канавок во впускном трубопроводе ПДВС (а) и изометрический вид канала (б): стрелками показано направление движения воздуха

Научная гипотеза применения канавок во впускной системе двигателя с турбокомпрессором состояла в том, чтобы турбулизировать поток, тем самым улучшить теплообмен, что должно привести к некоторому охлаждению воздуха и увеличению его плотности, а соответственно к повышению мощности двигателя (за счет роста массового расхода через цилиндры ПДВС).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первичные данные по измерению физических величин пульсирующих потоков в базовом впускном канале и канале с канавками представлены на рис. 3, из которого видно, что наличие канавок в канале оказывает незначительное влияние на зависимость  $w_x = f(\tau)$ . Это связано с тем, что чувствительный элемент датчика термоанемометра находился примерно в центре канала, а активная турбулизация потока посредством канавок происходит вблизи стенок трубопровода. Наличие канавок в канале имеет более значимое влияние на зависимость  $p_x = f(\tau)$ , на которой наблюдается снижение средней величины давления потока во впускном канале на 5–7 % в течение всего рабочего цикла по сравнению с базовой системой. Это свидетельствует о некотором росте аэродинамического сопротивления системы при наличии канала с канавками. Наибольшее влияние канавки оказывают на зависимость  $\alpha_x = f(\tau)$ : наблюдается существенный рост локального коэффициента (в среднем на 22 %) по сравнению с базовой системой. Это объясня-

ется упомянутым выше вихревым механизмом интенсификации теплообмена посредством канавок, связанным со значительными скоростями вторичных течений, которые они генерируют. По данным других исследователей, эти же вторичные течения определяют рост аэродинамического сопротивления впускной системы [12–14].

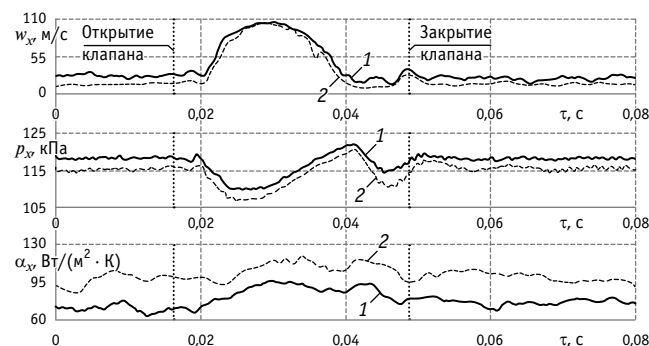


Рис. 3. Зависимости местной скорости  $w_x$  и давления  $p_x$  потока, а также локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  во времени для базовой впускной системы (1) и впускной системы, состоящей из канала с канавками (2), для частот вращения  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  и  $n_{TC} = 46000 \text{ мин}^{-1}$

Степени турбулентности за рабочий цикл  $Tu_c$  автомобильного двигателя рассчитаны для базового и модернизированного впускного трубопровода при разных частотах вращения ротора ТК и коленчатого вала ПДВС (рис. 4).

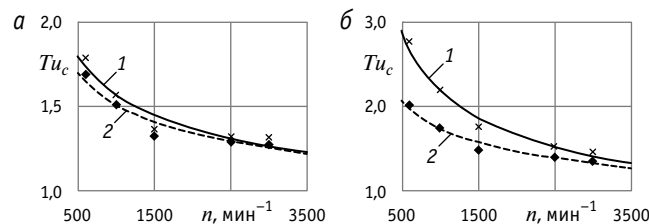


Рис. 4. Зависимости степени турбулентности  $Tu_c$  от частоты вращения коленвала ПДВС  $n$  для базовой впускной системы (1) и впускной системы, состоящей из канала с канавками (2), при  $n_{TC} 30000$  (а) и  $50000 \text{ мин}^{-1}$  (б)

Из рис. 4 видно, что при низких частотах вращения ротора ТК наличие канавок во впускном канале фактически не оказывает влияния на турбулентность ядра потока (отличия  $Tu_c$  не превышают 5 %). При этом с ростом  $n_{TC}$  отличия в значениях степени турбулентности возрастают. Установлено, что при высоких значениях  $n_{TC}$  наличие канавок во впускном канале двигателя приводит к снижению степени турбулентности вплоть до 40 %. Это может оказать положительное влияние на степень заполнения цилиндра воздухом, поскольку известно, что стабилизация пульсирующего потока способствует росту коэффициента наполнения двигателя [16]. Также следует отметить, что при высоких частотах вращения коленчатого вала ДВС значения  $Tu_c$  становятся фактически одинаковыми (разница не превышает 3 %), и это характерно для всех частот вращения ротора турбокомпрессора.

Влияние канала с канавками на интенсивность теплоотдачи во впускной системе двигателя можно проследить по рис. 5. Установлено, что использование впускного канала с канавками приводит к интенсификации теплообмена в рассматриваемой системе до 50 % по сравнению с базовой системой впуска. Это характерно для всех исследованных режимов работы двигателя и турбокомпрессора. Физический механизм роста коэффициента теплоотдачи в рассматриваемом случае описан выше.

Аналитическая оценка потенциально-го положительного эффекта от модернизации впускной системы осуществлялась путем расчета коэффициента наполнения и мощности для двухцилиндрового бензинового двигателя с базовой системой впуска и системой, состоящей из канала с канавками. Установлено, что коэффициент наполнения возрастет примерно на 3,59 % за счет снижения подогрева заряда в процессе заполнения и небольшого роста плотности воздуха. Это соответственно приведет к росту мощности рассматриваемого ПДВС на 2,87 %.

Примечательно, что противоположный по физическому механизму способ совершенствования газодинамики и теплообмена пульсирующих потоков во впускной системе, а именно стабилизация течения (выравнивание, сглаживание пульсационных составляющих

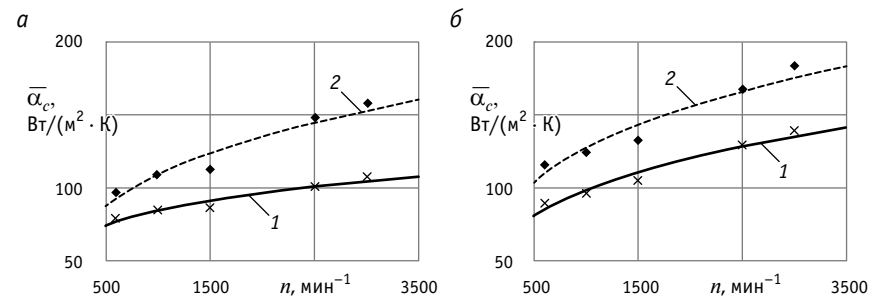


Рис. 5. Зависимости среднего за рабочий цикл коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}_x$  от частоты вращения коленвала ПДВС  $n$  для базовой впускной системы (1) и впускной системы, состоящей из канала с канавками (2), при  $n_{tc}$  30000 (а) и 50000 мин<sup>-1</sup> (б)

потока) также оказывает положительное влияние на эксплуатационные показатели автомобильного ПДВС [17].

## ВЫВОДЫ

1. Разработан лабораторный стенд, который имитирует физические процессы в автомобильном двигателе с турбонаддувом, а также выбрана измерительная система для исследования газодинамики и теплообмена пульсирующих потоков газа во впускной системе ПДВС.

2. Установлено, что наличие канала с канавками во впускной системе ПДВС приводит к следующим изменениям в газодинамике и теплообмене потоков по сравнению с базовой системой впуска: снижает степень турбулентности до 40 % при высоких скоростях вращения ротора ТК; интенсифицирует теплообмен в ди-

апазоне от 5 до 50 % во всем исследованном поле режимов работы ПДВС и ТК.

3. Рассчитан потенциальный положительный эффект от использования впускной системы, состоящей из канала с канавками, в автомобильном двигателе, работающем на бензине. Выявлено, что максимальное увеличение мощности может составить до 3 %.

4. Данные о теплофизических процессах в газодинамических системах с разной геометрической конфигурацией расширяют базу знаний в области механики жидкости и газов, а также могут найти практическое применение при проектировании систем газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 18-79-10003.

## Литература

1. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. London : Palgrave, 1999. 641 p.
2. Матюхин Л. М. Теория поршневых ДВС: прикладная термодинамика. Москва : КНОРУС, 2021. 284 с.
3. Bordjane M., Chalet D. Analysis of the exchange process in ice using a moving mesh approach // International journal of fluid mechanics research. 2019. Vol. 46. No. 1. Pp. 63–87.
4. Шестаков Д. С., Лашманов Д. А. Модернизация выпускных коллекторов тепловозного дизель-генератора ДГ882Л // Транспорт Урала. 2020. № 3 (61). С. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71. ISSN 1815–9400.
5. Jemni M. A., Kantchev G., Abid M. S. Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations // Energy. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2701–2715.
6. Dyskin V. G., Tursunbaev I. A. Features of working process in stirling engines with direct and reverse cycles // Applied Solar Energy. 2009. Vol. 45. No. 4. Pp. 266–268.

## References

1. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. London : Palgrave, 1999. 641 p.
2. Matyukhin L. M. Theory of piston ICE: applied thermodynamics [Teoriya porshnevyykh DVS: prikladnaya termodinamika]. Moscow : KNORUS, 2021. 284 p.
3. Bordjane M., Chalet D. Analysis of the exchange process in ice using a moving mesh approach // International journal of fluid mechanics research. 2019. Vol. 46. No. 1. Pp. 63–87.
4. Shestakov D. S., Lashmanov D. A. Modernization of exhaust manifolds of DG882L diesel-generator for diesel locomotives [Modernizatsiya vypusknikh kolektorov teplovoznogo dizel'-generatora DG882L] // Transport of the Urals. 2020. No. 3 (61). Pp. 68–71. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-3-68-71. ISSN 1815–9400.
5. Jemni M. A., Kantchev G., Abid M. S. Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations // Energy. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2701–2715.
6. Dyskin V. G., Tursunbaev I. A. Features of working process in stirling engines with direct and reverse cycles // Applied Solar Energy. 2009. Vol. 45. No. 4. Pp. 266–268.



7. Hung T.C., Shai M.S., Pei B.S. Cogeneration approach for near shore internal combustion power plants applied to seawater desalination // *Energy Conversion and Management*. 2003. Vol. 44. No. 8. Pp. 1259–1273.
8. Повышение эффективности рабочего процесса поршневого двигателя путем прямого преобразования теплоты выпускных газов в электрическую энергию / А. И. Леонтьев, Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. 2016. Т. 54. № 1. С. 99–107. ISSN 0040–3644.
9. Turbocharger nonlinear response with engine-induced excitations: predictions and test data / L.S. Andrés, A. Maruyama, K. Gjika, S. Xia // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010. Vol. 132. No. 3. Article 032502.
10. Kartashev A., Martynov A., Mashkov O. Numerical and experimental studies of a turbocharger centrifugal compressor for combustion engine boost // *International Review of Aerospace Engineering*. 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 27–38.
11. Жилкин Б. П., Шестаков Д. С., Плотников Л. В. Некоторые особенности газодинамики процесса впуска при наддуве поршневых ДВС // *Тяжелое машиностроение*. 2012. № 2. С. 48–51. ISSN 1024–7106.
12. Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами / А. А. Миронов, С. А. Исаев, А. Н. Скрыпник [и др.] // *Тепловые процессы в технике*. 2020. Т. 12. № 9. С. 386–402. ISSN 2074–2649.
13. Энергоэффективные поверхности с многорядными наклонными овально-траншейными лунками для воздушных конденсаторов / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, О. О. Мильман [и др.] // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2020. № 4. С. 3–10. ISSN 1026–3535.
14. Повышение эффективности авиационных теплообменных аппаратов / А. А. Миронов, С. А. Исаев, И. А. Попов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2020. № 1. С. 134–140. ISSN 0579–2975.
15. Плотников Л. В., Жилкин Б. П., Бродов Ю. М. Экспериментальное исследование и совершенствование процессов газообмена поршневых и комбинированных ДВС в условиях газодинамической нестационарности // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 12 (669). С. 35–44. ISSN 0536–1044.
16. Increasing Reliability of GasAir Systems of Piston and Combined Internal Combustion Engines by Improving Thermal and Mechanic Flow Characteristics / Yu. M. Brodov, N. I. Grigoryev, B. P. Zhilkin et al. // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. No. 14. Pp. 1038–1042.
17. Улучшение эксплуатационных показателей автомобильных двигателей внутреннего сгорания путем совершенствования термозазодинамики во впускной системе / Л. В. Плотников, Н. И. Григорьев, Н. С. Кочев, Л. Е. Осипов // *Транспорт Урала*. 2020. № 2 (61). С. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-47-51. ISSN 1815–9400.
7. Hung T.C., Shai M.S., Pei B.S. Cogeneration approach for near shore internal combustion power plants applied to seawater desalination // *Energy Conversion and Management*. 2003. Vol. 44. No. 8. Pp. 1259–1273.
8. Improvement of piston engine operation efficiency by direct conversion of the heat of exhaust gases into electric energy [Povyshenie effektivnosti rabocheho protsessa porshnevoego dvigatelya putem pryamogo preobrazovaniya teploty vypusnykh gazov v elektricheskuyu energiyu] / A.I. Leontiev, R.Z. Kavtaradze, D.O. Onishchenko et al. // *High Temperature*. 2016. Vol. 54. No. 1. Pp. 99–107. ISSN 0040–3644.
9. Turbocharger nonlinear response with engine-induced excitations: predictions and test data / L.S. Andrés, A. Maruyama, K. Gjika, S. Xia // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2010. Vol. 132. No. 3. Article 032502.
10. Kartashev A., Martynov A., Mashkov O. Numerical and experimental studies of a turbocharger centrifugal compressor for combustion engine boost // *International Review of Aerospace Engineering*. 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 27–38.
11. Zhilkin B. P., Shestakov D. S., Plotnikov L. V. Some of characteristics of admission process of inlet process in supercharged internal combustion engines [Nekotorye osobennosti gazodinamiki protsessa vpuska pri nadduve porshnevnykh DVS] // *Heavy machinery*. 2012. No. 2. Pp. 48–51. ISSN 1024–7106.
12. Physical simulation of thermal and hydrodynamic characteristics of channels with oval-trench vortex generators [Fizicheskoe modelirovanie teplogidravlicheskiykh kharakteristik kanalov s oval'no-transheynymi vikhregeneratorami] / A. A. Mironov, S. A. Isaev, A. N. Skrypnik et al. // *Thermal Processes in Engineering*. 2020. Vol. 12. No 9. Pp. 386–402. ISSN 2074–2649.
13. Energy efficient surfaces with multi-row inclined oval-trench dimples for air condensers [Energoeffektivnyye poverkhnosti s mnogoryadnymi naklonnymi oval'no-transheynymi lunkami dlya vozdushnykh kondensatorov] / S.A. Isaev, A.I. Leontiev, O.O. Milman et al. // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2020. No. 4. Pp. 3–10. ISSN 1026–3535.
14. Improving the efficiency of aircraft heat exchangers [Povyshenie effektivnosti aviatsionnykh teploobmennyykh apparatov] / A. A. Mironov, S. A. Isaev, I. A. Popov et al. // *Russian Aeronautics*. 2020. No. 1. Pp. 134–140. ISSN 0579–2975.
15. Plotnikov L. V., Zhilkin B. P., Brodov Yu. M. Experimental study and improvement of gas exchange processes in piston and combined internal combustion engines in unsteady gas-dynamic conditions [Eksperimental'noe issledovanie i sovershenstvovanie protsessov gazoobmena porshnevyykh i kombinirovannykh DVS v usloviyakh gazodinamicheskoy nestatsionarnosti] // *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2015. No. 12 (669). Pp. 35–44. ISSN 0536–1044.
16. Increasing Reliability of GasAir Systems of Piston and Combined Internal Combustion Engines by Improving Thermal and Mechanic Flow Characteristics / Yu. M. Brodov, N. I. Grigoryev, B. P. Zhilkin et al. // *Thermal Engineering*. 2015. Vol. 62. No. 14. Pp. 1038–1042.
17. Improvement of operational indicators of automobile internal combustion engines by development of thermogasdynamics in intake system [Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobil'nykh dvigateley vnutrennego sgoraniya putem sovershenstvovaniya termogazodinamiki vo vpusknoy sisteme] / L. V. Plotnikov, N. I. Grigoryev, N. S. Kochev, L. E. Osipov // *Transport of the Urals*. 2020. No. 2 (61). Pp. 47–51. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-47-51. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,69 авторских листа



УДК 625.7

Антон Олегович Боровлев, соискатель кафедры информационной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Ирина Алевтиновна Высоцкая, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Алексей Васильевич Скрыпников, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, декан факультета управления и информатики в технологических системах Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Вадим Александрович Тимофеев, соискатель кафедры информационной безопасности Воронежского государственного университета инженерных технологий (ВГУИТ), Воронеж, Россия,

Андрей Николаевич Брюховецкий, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей Луганского национального аграрного университета, Луганск

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ ЯСНОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРАССЫ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Anton Olegovich Borovlev, applicant, Information Security Department,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Irina Alevtinovna Vysotskaya, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Information Security Department,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Alexey Vasilyevich Skrypnikov, DSc in Engineering, Professor, Head of Information Security Department,  
Dean of Faculty of Control and Information Technologies in Technological Systems,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Vadim Alexandrovich Timofeev, applicant, Information Security Department,  
Voronezh State University of Engineering Technologies (VSUET), Voronezh, Russia,

Andrey Nikolaevich Bryukhovetskiy, PhD in Engineering, Associate Professor,  
Head of Tractors and Cars Department, Lugansk National Agrarian University (LNAU), Lugansk

## Mathematical substantiation of visual clarity indicators of curved segments of a forest automobile road

### Аннотация

В статье рассматриваются и анализируются параметры проектирования лесовозных автомобильных дорог. Возможность повышения качества проектных решений связана с учетом зрительного восприятия дорог, что обеспечивается правильным сочетанием криволинейных участков плана и продольного профиля трассы. Плавное изменение направления дороги в перспективе (и в плане) обеспечивает постепенность режима движения и, следовательно, повышает эффективность лесовозной автомобильной дороги. Цель работы — рассмотрение сочетания кривых в плане и профиле и анализ их взаимосвязи.

**Ключевые слова:** лесовозные автомобильные дороги, криволинейные участки, проектирование дорог, план трассы, профиль трассы.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-90-92

### Summary

The paper discusses and analyzes the design parameters of timber transport roads. The possibility of improving the quality of design solutions is associated with taking into account the visual perception of roads, which is ensured by the correct combination of curvilinear sections of the plan and the longitudinal profile of the route of logging highways. A smooth change in the direction of the road in perspective (and in plan) ensures a gradual movement mode and, therefore, increases the efficiency of the timber road. The aim of the work is to consider the combination of curves in plan and profile and analyze their relationship.

**Keywords:** timber highways, curved sections of the route plan, road design, route plan, route profile.

## ВВЕДЕНИЕ

Основу формообразования будущей дороги составляет ее трасса, а очертания этой трассы во многом определяют технические качества дороги. Процесс проектирования лесовозных автомобильных дорог включает в себя технологическую последовательность проектных операций, что обуславливает необходимость разработки научно обоснованных методов проектирования. Проверка дорожного полотна при помощи перспективных изображений моделей ставит две основные цели — получить удачное дорожно-ландшафтное решение и обеспечить условия безопасности движения (зрительную ясность и плавность). Основные причины часто получавшихся неудачными сочетаний кривых плана и продольного профиля объясняются недостаточной изученностью зрительной ясности и плавности [1], а также недостаточным опытом практического использования известных принципов пространственного проектирования лесовозных автомобильных дорог. В статье рассматриваются и анализируются сочетания криволинейных участков плана и продольного профиля трасс лесовозных автомобильных дорог.

## СОЧЕТАНИЕ КРИВЫХ В ПЛАНЕ И ПРОФИЛЕ И АНАЛИЗ ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ

На рис. 1 середины кривых плана и профиля обозначены как СК и СЗ, начало кривых плана и профиля — как НК и НЗ, концы кривых плана и профиля — как КК и КЗ. Величина смещения середин обозначена через  $\delta_c$ , а величины смещения начал и концов кривых плана и профиля — соответственно через  $\delta_n$  и  $\delta_k$ . Средний элемент  $e_2$  представляет собой пространственную кривую, элементы  $e_1$  и  $e_3$  — прямые линии.

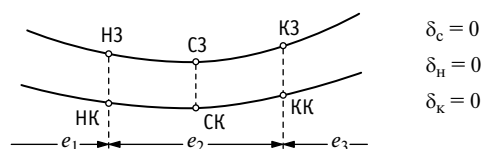


Рис. 1. Сочетание кривых в плане и профиле

Обычно продольный профиль проектируют, используя горизонтальные и наклонные прямые, вогнутые и выпуклые параболы (или круговые линии). Соответственно элементы плана и профиля трассы могут образовывать 28 взаимных комбинаций [2].

В практике проектирования дорог схема совмещения круговых кривых плана и профиля считается идеальной независимо от длины кривой. Поэтому для приближенной оценки зрительной ясности поворотов дороги, как правило, можно использовать систему относительных показателей, принимая за единицу длину кривой в плане  $C_p$ .

Нетрудно убедиться, что степень взаимной увязки кривых плана и продольного профиля полностью определяется следующими показателями:

модулем смещения средних кривых

$$M_a = \frac{\delta_c}{C_p} \quad (1)$$

и модулем длин кривых плана и профиля

$$M_s = \frac{C_v}{C_p}, \quad (2)$$

где  $C_v$  — длина кривой в профиле, м.

Для более полной характеристики зрительной ясности пространственных кривых необходим также показатель соотношения радиусов кривых плана и профиля

$$m = \frac{R_v}{R_p},$$

где  $R_p$  и  $R_v$  — радиусы кривых соответственно в плане и профиле, м.

В проектах лесовозных автомобильных дорог в качестве элементов плана трассы встречаются прямые линии, переходные кривые, описываемые в последние годы чаще всего по клотоиде, и круговые кривые [3–6]. В случаях, когда поворот дороги в плане состоит из клотоидных переходных кривых с круговой вставкой (рис. 2), величина  $C_p$  в формулах (1)–(2) должна быть заменена «эффективной» длиной кривой  $C_{e,p}$ , определяемой следующим образом:

$$C_{e,p} = C_{o,p} - 2\delta_{\text{опт}} \text{ при } \delta_{\text{опт}} < L;$$

$$C_{e,p} = C_{o,p} - 2 \cdot \delta_{\text{опт}} \cdot L \text{ при } \delta_{\text{опт}} \geq L,$$

где  $C_{o,p}$  — общая длина кривой в плане, включая переходные кривые, м;

$\delta_{\text{опт}}$  — оптимальное по условию зрительной ясности смещение начала вертикальной кривой НЗ по отношению к началу клотоиды НР, м;

$L$  — длина переходной кривой, м.

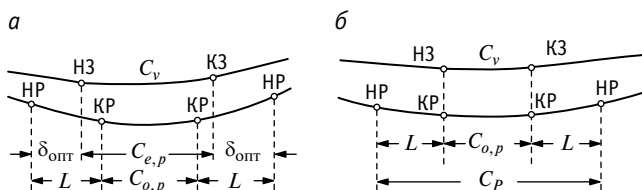


Рис. 2. Схемы рационального совмещения клотоид в плане с круговыми кривыми (или параболами) в продольном профиле:

а — при  $\delta_{\text{опт}} < L$ ; б — при  $\delta_{\text{опт}} \geq L$ ; КР — конец клотоиды

За исходную точку при определении смещения середин кривых нами принималась середина закругления СЗ, поскольку положение вертикальных кривых обусловлено рельефом местности, а возможности их перемещения при соблюдении требований увязки проложения дороги с рельефом, как правило, невелики. Наоборот, размещение кривых в плане сравнительно редко ограничивается ситуацией, и их можно менять, увязывая с рациональным положением вертикальных кривых.

Для приближенных оценок ясности дороги особое значение имеют величины смещений начал и концов криволинейных участков  $\delta_n$  и  $\delta_k$  и общая протяженность криволинейного

участка. Если криволинейный участок в плане перекрывает криволинейный участок в профиле, то смещения начал  $\delta_n$  и концов  $\delta_k$  принимаются положительными.

Нами проанализировано 12 проектов лесовозных автомобильных дорог. Выбранные продольные профили разделены на участки, соответствующие принятым [2, 3] схемам сочетаний элементов трассы. Для анализа проектных решений из проектов выписаны подряд характеристики 10 участков трассы общей протяженностью 26 км.

Анализ показал, что число успешных сочетаний кривых плана и продольного профиля небольшое и составляет 28 %. Малое количество удачных сочетаний в проанализированных проектах объясняется следующими объективными причинами.

1. Недостаточно разработаны или даже просто неверны рекомендации по сочетанию кривых плана и профиля, т.е. неточности получены при совмещении клотоид в плане с круговыми кривыми (или параболами) в продольном профиле без соблюдения надлежащего соотношения их радиусов.

2. Недостаточно разработана методика пространственного проектирования трассы дороги.

3. Из-за трудоемкости построения перспективных изображений вида дороги проверка плавности и ясности поворотов проводилась в недостаточном объеме.

4. Большинство проанализированных проектов относилось к капитальному ремонту или к реконструкции дорог, в заданиях на проектирование которых было записано требование

максимального использования существующей дороги. Это требование часто обязывало проектировщиков мириться с недостатками расположения трассы в пространстве и переносить их в новые проекты.

5. При проектировании не были использованы крупномасштабные топографические карты. Поэтому обеспечить радиальное совмещение элементов плана и профиля оказалось очень затруднительно, а часто и невозможно.

## ВЫВОДЫ

Из приведенного анализа видно, что повышение качества проектных решений остается весьма актуальной задачей. Пути ее решения представляются следующими:

более подробное изучение условий зрительной ясности и плавности и формулирование рекомендаций по проектированию поворотов дороги;

разработка более простых методов контроля плавности и ясности, требующих значительно меньших затрат времени, чем при построении перспективных изображений, что возможно в случае использования методов математического анализа трассы дороги как пространственной кривой.

Для общей оценки зрительной ясности криволинейных участков трассы необходимо создать систему характеризующих ее показателей, которые были бы удобны при анализе и отражали соответствие встречаемых сочетаний условиям зрительной ясности.

## Литература

1. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. Москва : Машиностроение, 1971. 416 с.
2. Вырко Н. П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог : учебник. Минск : БГТУ, 2005. 446 с.
3. Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и ее экономико-математическое развитие / Д. В. Бурмистров, А. В. Скрыпников, В. Г. Козлов [и др.] // Лесной вестник. ForestryBulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 69–76. ISSN 2542–1468.
4. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, A. N. Belyaev, E. V. Chernyshova // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 726. Pp. 654–667.
5. Computation of vehicle motion path upon entering turn / A. N. Belyaev, V. G. Kozlov, I. A. Vysotskaya, T. V. Trishina // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 4527–4531.
6. Экспериментальное исследование методов автоматизированного проектирования трассы лесовозной автомобильной дороги / Е. В. Чирков, А. В. Скрыпников, А. О. Боровлев [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 1. С. 29–33. ISSN 0869–4931.

## References

1. Litvinov A. S. Controllability and stability of the car [Upravlyaemost' i ustoychivost' avtomobilya]. Moscow : Machinery, 1971. 416 p.
2. Vyrko N. P. Construction and operation of timber roads [Stroitel'stvo i ekspluatatsiya lesovoznykh dorog] : textbook. Minsk : Belarusian State Technological University, 2005. 446 p.
3. The working hypothesis of logging roads rhythmic construction and its mathematical development [Rabochaya gipoteza ritmichnogo stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog i ee ekonomiko-matematicheskoe razvitie] / D. V. Burmistrov, A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov et al. // ForestryBulletin. 2018. Vol. 22. No. 5. Pp. 69–76. ISSN 2542–1468.
4. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, A. N. Belyaev, E. V. Chernyshova // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 726. Pp. 654–667.
5. Computation of vehicle motion path upon entering turn / A. N. Belyaev, V. G. Kozlov, I. A. Vysotskaya, T. V. Trishina // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 4527–4531.
6. Experimental study of methods for automated design of the route of a timber-carrying road [Eksperimental'noe issledovanie metodov avtomatizirovannogo proektirovaniya trassy lesovoznoy avtomobil'noy dorogi] / E. V. Chirkov, A. V. Skrypnikov, A. O. Borovlev et al. // Automation. Modern Technologies. 2021. Vol. 75. No. 1. Pp. 29–33. ISSN 0869–4931.

Объем статьи 0,33 авторских листа

УДК 625.1

Алексей Анатольевич Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Денис Вячеславович Глазов, аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Алексей Юрьевич Иванищев, инженер научно-исследовательской лаборатории «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭЛАСТИЧНОСТИ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РАСЧЕТА КОНСОЛЕЙ

Alexey Anatolyevich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Denis Vyacheslavovich Glazov, postgraduate student, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Alexey Yuryevich Ivanishhev, Engineer, Research Laboratory «Systems of Automated Design of Catenary», Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Increase of elasticity of catenary suspension by application of method based on individual calculation of cantilevers

#### Аннотация

В статье исследуются проблемы повышения качества токосъема. Для их решения предлагается использовать метод автоматизации проектирования консолей контактной сети, что позволит повысить эластичность контактной подвески. Проанализированы отказы устройств контактной сети. Рассмотрены способы подбора и проектирования консолей контактной сети, их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** контактная подвеска, проектирование устройств электроснабжения, контактный провод, токосъем.

#### Summary

The paper studies problems of increasing the quality of current collection. To solve problems the authors propose to use a method of automated design of catenary cantilevers, which will increase the elasticity of catenary suspension. The authors have analysed failures of catenary devices and have discussed methods of selection and design of catenary cantilevers, their advantages and disadvantages.

**Keywords:** catenary suspension, designing of power supply devices, contact wire, current collection.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-93-96

Стратегия развития компании ОАО «Российские железные дороги» включает в себя такие направления, как повышение надежности работы устройств электроснабжения, реализация мероприятий по обеспечению тяжеловесного движения поездов, развитие скоростных (с установленной скоростью движения пассажирских поездов от 141 до 200 км/ч включительно) и высокоскоростных (со скоростью движения пассажирских поездов более 200 км/ч) магистралей [1], что дает возможность не только увеличить грузооборот и пассажиропоток, но и получить экономический эффект. Реализация проектов высокоскоростных и скоростных магистралей приводит к необходимости развития методик расчета поддерживающих устройств контактной сети, повышению требований надежности.

В последнее десятилетие наблюдается тенденция к снижению объемов новой электрификации. Объемы реконструкции старых участков, напротив, увеличились в связи с тем, что большая часть существующей теперь контактной сети исчерпала свой ресурс. Причем необходимость в капитальных ремонтах нарастает в квадратичной зависимости от времени. Методики для проектирования капитального ремонта нет, поскольку проблема массовых капитальных ремонтов встала так остро впервые за все существование контактной сети. Методика, известная на данный момент, разработана для ручного проектирования новой электрификации. Нельзя сказать, что она не верна, но многое в ней не формализовано, а при проектировании реконструкции появляются новые осложнения, которые также нужно формализовать [2].

На стадии проектирования консолей необходимо учитывать некоторые факторы, значительно затрудняющие разработку проекта капитального ремонта контактной сети. Поэтому внедрение новых методов автоматизации проектирования консолей контактной сети является актуальной задачей.

Проанализируем отказы, старение и износ основных поддерживающих конструкций контактной сети, эксплуатируемых на участках ОАО «Российские железные дороги».

В период с 2015 по 2020 г. число отказов контактной сети изменялось циклически в течение года. Наибольшее число отказов приходится на июнь, наименьшее — на октябрь, что объясняется влиянием климатических факторов и нагрузок от движения поездов. Интенсивность отказов элементов контактной сети изменяется в течение года в разной степени. Оценивать надежность контактной сети как сложной системы в целом следует с учетом надежности ее отдельных основных элементов.

Анализ эксплуатационной работы хозяйства электроснабжения показывает взаимосвязь динамики изменения размеров движения поездов и удельного электропотребления на тягу поездов с удельной повреждаемостью контактной сети, отнесенной к развернутой длине.

Так, в период с 2015 по 2020 г. удельная повреждаемость контактной сети в среднем (число отказов на 100 км развернутой длины) держалась на одном уровне — 0,74 и 0,28 соответственно. В 2016 г. удалось добиться наименьшей удельной повреждаемости устройств контактной сети на 100 км развернутой длины — 0,65, а также наименьшей удельной повреждаемости контактной сети на 1 млрд ткм брутто — 0,21. В 2018 г. по сравнению с 2015-м показатели удельной повреждаемости контактной сети на 100 км развернутой длины значительно улучшились — 0,71 (в 2015 г. — 0,82), а удельная повреждаемость на 1 млрд ткм брутто осталась примерно на том же уровне — 0,28 (в 2015 г. — 0,29).

Важным фактором, способствующим работоспособности системы электроснабжения железных дорог, является техническое обслуживание устройств контактной сети. В целом нарушения при монтаже, техническом обслуживании и эксплуатации могут привести к тяжелым последствиям: износу и отказу устройств контактной сети, разрегулировке контактной подвески, излому токоприемника, задержке поездов. Также устройства контактной сети подвержены различным внешним воздействиям, таким как метеоусловия, вандализм, действие посторонних предметов. Все это ведет к экономическим потерям [3].

Продление жизненного цикла объектов железнодорожной инфраструктуры должно осуществляться с учетом требований надежности. Достичь такого результата возможно за счет внесения корректировок при проектировании устройств; контроля проектных решений на стадии производства и монтажа; точной регулировки на этапе эксплуатации. Применительно к контактной подвеске необходимо соблюдать и контролировать ее геометрические размеры, а также положение ее поддерживающих конструкций.

К таким конструкциям в большей степени относятся консоли, положение которых влияет на износ контактных проводов и качество токосъема. Конструкция контактной подвески на горизонтальных консолях позволяет поддерживать

в процессе эксплуатации постоянную конструктивную высоту на прямых и кривых участках пути, применять струны расчетной длины и сохранять показатели эластичности контактной подвески на весь период эксплуатации. Использование алюминиевых сплавов (материал AlMgSiF31) при изготовлении консолей (труб и деталей крепления) дает возможность обеспечить [4]:

высокую антикоррозионную стойкость без дополнительно защитного покрытия в течение всего срока службы;

хорошие прочностные свойства, особенно при низких температурах;

небольшой вес и легкий монтаж (вес алюминиевой консоли колеблется в пределах от 25 до 50 кг в зависимости от ее типа).

Технические и экономические преимущества алюминиевых консолей заключаются в более высокой доступности контактной сети из-за низкой потребности в обслуживании, в относительно высокой коррозионной устойчивости без обработки и покраски, облегченном весе и легкости при монтаже, механической и электрической прочности, более низкой цене на зажимы, узлы и крепления по сравнению с нержавеющей сталью или медными сплавами.

Привычные элементы из стали или ковкого чугуна должны обрабатываться горячей оцинковкой и защитной краской. Защитный слой должен постоянно обновляться. На покрытых элементах неизбежны электрические разности потенциалов, которые могут приводить к небольшим электрическим дугам и, как следствие, к радиопомехам и электроэрозийной коррозии. Всех этих недостатков позволяет избежать использование алюминиевых элементов.

Алюминиевые элементы образуют на поверхности тончайший защитный слой толщиной в десятую часть миллиметра, который при повреждении поверхности имеет эффект самозаживления под воздействием атмосферы. Защитный слой не оказывает негативного воздействия на прочность элементов, так как толщина стенок > 4 мм.

Следует также особо обратить внимание на коррозионную прочность этих элементов под влиянием загрязненного, пыльного и солевого влажного воздуха. Это подтверждено лабораторными и полевыми испытаниями, а также опытом использования, насчитывающим десятилетия. В частности, уже около 35 лет все важнейшие элементы контактной сети, например фиксаторы, изготавливаются из алюминия, а конструкция, выполненная из алюминиевых трубчатых консолей, зажимов и крепежных деталей, хорошо зарекомендовала себя за 25 лет эксплуатации в различных климатических зонах с разным уровнем загрязненности воздуха.

Алюминиевые консоли подходят для контактной подвески постоянного тока с большими поперечными сечениями и двойным контактным проводом и без ограничений работают в следующих климатических условиях:

при минимальной температуре воздуха (–47 °C);

максимальной температуре воздуха (+37 °C);

температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (–35 °C);

максимальной скорости ветра 40 м/с;

толщине стенки гололеда 15 мм.

К общим преимуществам алюминиевых трубчатых изолированных горизонтальных консолей относятся:

точная постановка несущего троса и контактных проводов в проектное положение;

возможность при изменении положения головки рельса по вертикали в процессе эксплуатации сохранить конструктивную высоту контактной подвески за счет поднятия на опоре всей консоли (как правило, из-за того что консоль изолирована, на опоре есть запас подъема консоли по высоте);

возможность использовать струны мерной длины (расчетной длины);

обеспечение проектных характеристик эластичности контактной подвески за счет соблюдения геометрических проектных параметров;

отсутствие дополнительного смещения несущего троса (ввиду того что нет подвесной гирлянды);

возможность монтировать контактную подвеску для более высоких скоростей движения (свыше 160 км/ч);

отсутствие определенных типоразмеров.

В настоящее время при проектировании консолей контактной сети используются главным образом такие методы [2]:

подбор консолей по типоразмерам;

индивидуальный расчет геометрических параметров консоли.

Основной способ подбора консолей — типовые проекты по проектированию контактной сети. Его суть заключается в подборе консоли типовых размеров по габариту, роду тока, типу опоры и участку пути. В этом случае консоль и фиксатор подбираются отдельно. Преимущества данной методики — универсальность, простота изготовления и дешевизна. Недостатки — снижение качества токосъема из-за неточной установки контактного провода в пространстве (что приводит к быстрому износу контактного провода и полоза токоприемника), высокая трудоемкость при монтаже, невозможность отрегулировать контактную сеть за счет отсутствия «окон», большой расход материалов при изготовлении.

Методика индивидуального расчета геометрии консолей позволяет точно установить их в проектное положение на опоре контактной сети. Это дает возможность обеспечить необходимые геометрические параметры контактной подвески и приблизить коэффициент равномерности эластичности по длине пролета к единице. Так, при использовании методики для проектирования участков контактной сети в Латвии («Дзинтари», «Булдури», «Майори») коэффициент эластичности составил 1,04. В то же время на участках, спроектированных без учета этой методики, коэффициент был равен 1,5 и 2,1 [5].

Основной недостаток данной методики — сложности при создании программного обеспечения для проведения расчетов: необходимо учитывать множество факторов, которые влияют на поведение виртуальной модели, с точностью до миллиметра; при расчете задается порядка 30 деталей, находящихся на консоли одновременно.

При расчетах геометрических параметров консоли очень важным показателем служит угол наклона дополнительного

фиксатора. В случае проектирования по типоразмерам он задается нормативным расстоянием от пяты консоли. В программном комплексе угол дополнительного фиксатора устанавливается индивидуально для каждого конкретного участка [6]. Идеальное положение дополнительного фиксатора определяется направлением горизонтальных и вертикальных сил, действующих на него (рис. 1). Таким образом, дополнительный фиксатор не является точкой, нагружающей контактную подвеску, отсутствует подбор токоприемника в месте монтажа, улучшаются характеристики эластичности контактной подвески, что имеет особое значение при высокоскоростном движении.

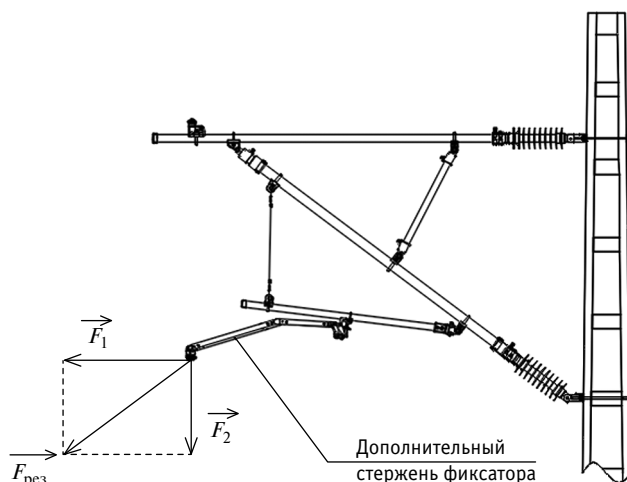


Рис. 1. Опорный узел контактной сети

К числу важных показателей качества токосъема относится эластичность контактной подвески, зависящая от ее регулировки. Трубчатые алюминиевые консоли с их индивидуальным подбором геометрических характеристик по месту установки позволяют точно указать положение контактного провода и несущего троса в пространстве в плане пути. Это вместе с жестким креплением несущего троса позволяет предположить, что эластичность контактной подвески будет выше, чем в случае, когда на участках электрифицированных железных дорог устанавливаются швеллерные консоли по типовым размерам.

Предлагаемая авторами методика индивидуального расчета геометрии консолей применена проектным институтом «Фортэкэнерготранс» при разработке проектной документации по участкам контактной сети в России: на Свердловской (Зюкай — Менделеево), Южно-Уральской (Щучье — Шумиха) и Куйбышевской (Раевка — Аксенова) железных дорогах, а также за рубежом — на Латвийской железной дороге.

В рамках НИОКР, выполняемой научно-исследовательской лабораторией «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» УрГУПС, планируется апробация представленной методики при расчете эластичности контактной подвески для скоростных и высокоскоростных участков железных дорог.

## Литература

1. Микава А. В., Ковалев А. А. Разработка математической модели положения консоли по высоте опоры // Инновационный транспорт. 2016. № 2 (20). С. 42–49. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-42-49. ISSN 2311-164X.
2. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Влияние угла наклона опоры на высоту подвеса контактного провода относительно уровня головки для скоростных и высокоскоростных контактных подвесок // Известия Транссиба. 2018. № 4 (36). С. 69–75. ISSN 2220–4245.
3. Ковалев А. А., Микава А. В. Определение максимальной продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети // Транспорт Урала. 2019. № 4 (63). С. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815–9400.
4. Ковалев А. А., Окунев А. В. Оценка состояния опор контактной сети на протяжении жизненного цикла // Инновационный транспорт. 2015. № 3 (17). С. 23–29. ISSN 2311-164X.
5. Ковалев А. А., Лобанова Г. С., Несмелов Ф. С. Разработка метода расчета наклона опоры контактной сети на основе учета деформационных характеристик грунта // Транспорт Урала. 2010. № 1 (24). С. 69–71. ISSN 1815–9400.
6. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Микава А. В. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема // Транспорт Урала. 2012. № 3 (34). С. 85–89. ISSN 1815-9400.

## References

1. Mikava A. V., Kovalev A. A. Development of mathematical model for bracket position by height of support [Razrabotka matematicheskoy modeli polozheniya konsoli po vysote opory] // Innotrans. 2016. No. 2 (20). Pp. 42–49. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-42-49. ISSN 2311-164X.
2. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. The effect of pole's angle inclination on contact wire position relative to the level of the rail head for speeds and highspeeds catenaries [Vliyanie ugla naklona opory na vysotu podvesa kontaktnogo provoda otnositel'no urovnya golovki dlya skorstnykh i vysokoskorostnykh kontaknykh podvesok] // Journal of Transsib Railway Studies. 2018. No. 4 (36). Pp. 69–75. ISSN 2220–4245.
3. Kovalev A. A., Mikava A. V. Determination of maximum life cycle of catenary cantilevers [Opredelenie maksimal'noy prodolzhitel'nosti zhiznennogo tsikla konsoley kontaktnoy seti] // Transport of the Urals. 2019. No. 4 (63). Pp. 86–90. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-4-86-90. ISSN 1815-9400.
4. Kovalev A. A., Okunev A. V. Assessment of serviceability of catenary supports throughout the life cycle [Otsenka sostoyaniya opor kontaktnoy seti na protyazhenii zhiznennogo tsikla] // Innotrans. 2015. No. 3 (17). Pp. 23–29. ISSN 2311-164X.
5. Kovalev A. A., Lobanova G. S., Nesmelov F. S. Development of method for calculation of catenary pole inclination on the basis of consideration for soil deformation characteristics [Razrabotka metoda rascheta naklona opory kontaktnoy seti na osnove ucheta deformatsionnykh kharakteristik grunta] // Transport of the Urals. 2010. No. 1 (24). Pp. 69–71. ISSN 1815-9400.
6. Galkin A. G., Kovalev A. A., Mikava A. V. Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system [Primenenie kontrakta zhiznennogo tsikla dlya infrastruktornogo kompleksa sistemy tokos'ema] // Transport of the Urals. 2012. No. 3 (34). Pp. 85–90. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,45 авторских листа



УДК 621.311

Евгений Сергеевич Мушков, аспирант кафедры «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,  
Александр Николаевич Марикин, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Михаил Александрович Иванов, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия,

Александр Викторович Агунов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Санкт-Петербург, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 3 И 24 КВ НА СМЕЖНЫЕ КОММУНИКАЦИИ СВЯЗИ

Evgeniy Sergeevich Mushkov, postgraduate student, Railway Power Supply Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Alexander Nikolaevich Marikin, DSc in Engineering, Professor, Railway Power Supply Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Mikhail Alexandrovich Ivanov, Senior Lecturer, Railway Power Supply Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), St. Petersburg, Russia,

Alexander Viktorovich Agunov, DSc in Engineering, Professor, Head of Railway Power Supply Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State University (PSTU), St. Petersburg, Russia

## Mathematical modeling of magnetic influence of direct current catenary with voltages of 3 and 24 kV on adjacent communication facilities

### Аннотация

Проанализировано магнитное влияние контактной сети постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи. Сделано сравнение полученных значений с нормами магнитных помех. В среде динамического моделирования Matlab Simulink разработана модель электротяговой сети с напряжением в контактной сети 3 и 24 кВ. При помощи модели определены параметры всех ключевых звеньев, которые необходимо учитывать при анализе магнитной совместимости тяговой сети постоянного тока со смежными коммуникациями связи.

**Ключевые слова:** электроснабжение железных дорог, электромагнитная совместимость, контактная сеть, система тягового электроснабжения, магнитное влияние контактной сети.

### Summary

The paper analyses a magnetic influence of a direct current catenary with voltages of 3 and 24 kV on adjacent communication facilities. The authors have compared the gained results with standards of magnetic interference. They have developed a model of catenary with voltages of 3 and 24 kV in the Matlab Simulink dynamic modeling environment. With the use of the model the authors have determined parameters of all key components that it is necessary to consider at analysis of magnetic compatibility of the direct current catenary with adjacent communication facilities.

**Keywords:** power supply of railways, electromagnetic compatibility, catenary, traction power supply system, magnetic influence of catenary.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-97-100

## ВВЕДЕНИЕ

**О**беспечение магнитной совместимости электрифицированных железных дорог со смежными слаботочными системами (проводными линиями связи, волноводами), сетями 0,4 кВ, цепями ТУ-ДУ, а также системами сигнализации и блокировки — достаточно важная задача, что подтверждается не только теоретическим анализом и обобщением научной литературы в области электромагнитной совместимости электрифицированных железных дорог со смежными слаботочными системами (линиями связи), но и многочисленными данными об отказе работы систем управления транспортом [1, 2]. Например, в работе [3] представлена методика расчета электромагнитных процессов в многопроводных линиях тягового электроснабжения. В [4] проведено исследование влияния системы тягового электроснабжения двухпутного участка на работу рельсовых цепей. В [5] рассмотрены аспекты построения математической модели для изучения электромагнитных процессов в тяговой сети постоянного тока напряжением 3 кВ. Вместе с тем, как показывает анализ научной литературы, математическим моделям, позволяющим оценить электромагнитную совместимость тяговой сети постоянного тока повышенного напряжения со смежными линиями, уделено недостаточно внимания. В данной статье представлена модель тягового электроснабжения с напряжением в контактной сети 3 и 24 кВ, разработанная в среде динамического моделирования Matlab Simulink.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НАПРЯЖЕНИЕМ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ 3 И 24 КВ

Модель, реализованная в среде динамического моделирования Matlab Simulink, содержит следующие основные блоки, параметры которых необходимо учитывать (рис. 1):

1. Блок — источник трехфазного симметричного напряжения (имитирует системы внешнего электроснабжения).

- Блок — трехфазный трехобмоточный трансформатор.
- Блок — трехфазный мостовой выпрямитель (блоки 2 и 3 моделируют работу преобразовательного агрегата).
- Блок — взаимная индуктивность (имитирует контактную сеть и смежные коммуникации связи).
- Блок, имитирующий работу электроподвижного состава.
- Блок, позволяющий измерять мгновенное значение наводимого напряжения на смежную линию.

Разработанная имитационная модель позволяет: рассчитывать взаимные сопротивления контактной сети и смежной линии с учетом геометрического расположения проводов в пространстве, удельного электрического сопротивления и относительной проводимости проводов;

при расчете токов и напряжений рассматривать контактную сеть и смежные линии как линии с распределенными параметрами [6, 7];

с высокой степенью точности выполнять расчет электромагнитной совместимости тяговой сети со смежными линиями.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ SIMULINK-МОДЕЛИ

В настоящее время для электроснабжения железных дорог в качестве преобразовательных трансформаторов применяются трансформаторы типа ТРДНП-40000. Мощность трансформатора обусловлена тем, что межподстанционная зона при напряжении в контактной сети 24 кВ будет более протяженной, чем при напряжении в контактной сети 3 кВ, следовательно, мощность преобразователя должна быть выше. В среде динамического моделирования Matlab Simulink принято задание параметров в относительных единицах, поэтому в [8, 9] при определении электрических и магнитных сопротивлений обмоток, а также параметров ветви намагничивания трансформатора произведен пересчет в эти единицы. Были получены следующие результаты:

$$R_{T*} = 0,0018;$$

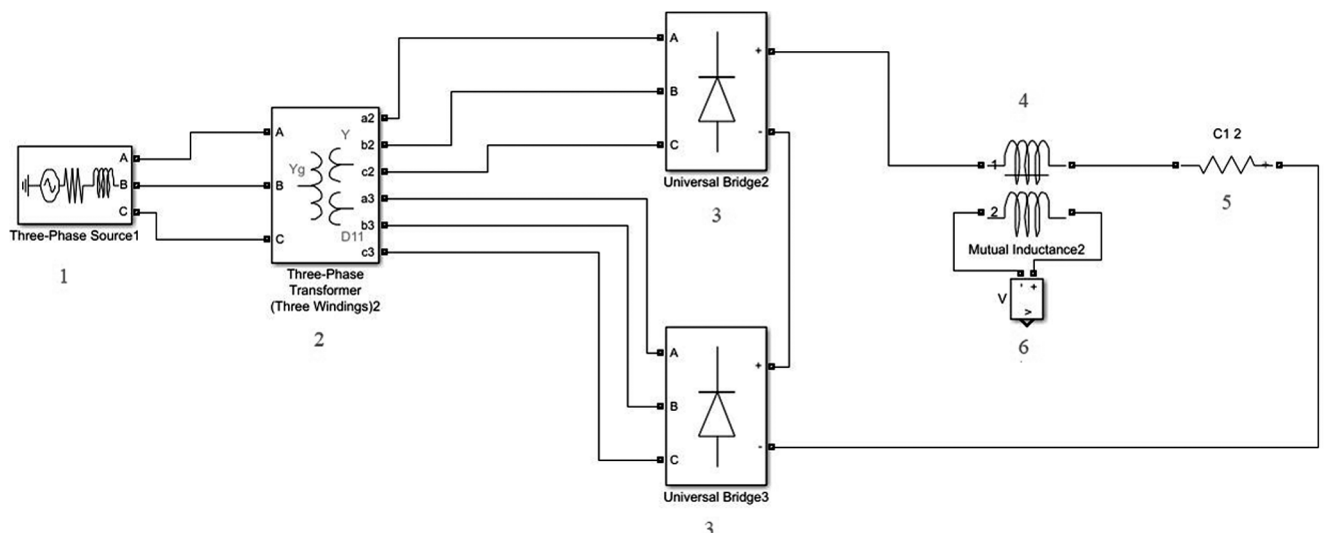


Рис. 1. Simulink-модель системы электроснабжения постоянного тока с напряжением в контактной сети 3 и 24 кВ:

1–6 — блоки модели

$$X_{1T*} = 0,0612;$$

$$X_{2T*} = 0,0227;$$

$$Z_{T*μ} = 100;$$

$$R_{T*μ} = 555;$$

$$X_{T*μ} = 100,$$

где  $R_{T*}$  — активное сопротивление трансформатора;

$X_{1T*}$  и  $X_{2T*}$  — индуктивное сопротивление первичной и вторичной обмотки трансформатора соответственно;

$Z_{T*μ}$  — импеданс ветви намагничивания;

$R_{T*μ}$  и  $X_{T*μ}$  — активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания соответственно.

В контактной подвеске используются марки проводов М120, 2МФ-100, А185, 2Р-65. Линия связи представлена однопроводным волноводным проводом марки БСМ-4А. Собственная и взаимная индуктивность проводов контактной сети определена с учетом того, что ток при коротком замыкании изменяется по экспоненциальному закону.

Собственная индуктивность провода в контуре «провод — земля» рассчитывается по уравнению, Гн/км:

$$L_{п-3} = \left( 2 \cdot \ln \left( 0,448 \frac{10^4 \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{10 \cdot \gamma_3 \cdot r_3}} \right) + 0,5 \right) \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — постоянная времени цепи короткого замыкания, 1/с;

$\gamma_3$  — удельная проводимость земли, См/м;

$r_3$  — эквивалентный радиус провода, м.

Взаимная индуктивность двух контуров «провод — земля», Гн/км:

$$M_{п-3} = 2 \cdot \ln \left( 0,448 \frac{10^4 \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{10 \cdot \gamma_3 \cdot a}} \right) \cdot 10^{-4}. \quad (2)$$

Собственная индуктивность контура «рельс — земля», Гн/км:

$$L_{р-3} = 2 \cdot \ln \left( 0,448 \frac{10^4 \cdot \sqrt{\tau}}{\sqrt{10 \cdot \gamma_3 \cdot r_3}} \right) \cdot 10^{-4} + \frac{0,084}{P} \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot \tau}, \quad (3)$$

где  $P$  — периметр рельса, см;

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость рельса (может быть принята равной 250–450);

$\rho$  — удельное сопротивление рельсовой стали, Ом·м<sup>2</sup>/м.

На основе использования уравнений (1)–(3) для рассматриваемой контактной подвески М-120, 2МФ-100, 2А-185, 2Р-65 при  $\tau = 0,015$  с и с учетом 15 %-го износа контактных проводов получены следующие значения активных сопротивлений и индуктивностей:

$$R_{п1} = R_{п2} = 0,035 \text{ Ом/км};$$

$$L_{п1} = L_{п2} = 1,715 \text{ мГн/км};$$

$$R_p = 6,43 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/км};$$

$$L_p = 1,434 \text{ мГн/км};$$

$$M_{п12} = 1,127 \text{ мГн/км};$$

$$M_{рп1} = M_{рп2} = 1,063 \text{ мГн/км},$$

где  $R_{п1}$ ,  $L_{п1}$  — активное сопротивление и индуктивность контактной подвески первого пути;

$R_{п2}$ ,  $L_{п2}$  — активное сопротивление и индуктивность контактной подвески второго пути;

$R_p$ ,  $L_p$  — активное сопротивление и индуктивность рельсовой сети;

$M_{п12}$  — взаимная индуктивность подвесок первого и второго пути;

$M_{рп1}$  — взаимная индуктивность подвески первого пути — рельсовая сеть;

$M_{рп2}$  — взаимная индуктивность подвески второго пути — рельсовая сеть.

Переходное сопротивление «рельсы — земля»  $R_{пр}$  принято равным 3 Ом·км.

### ОЦЕНКА МАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НАПРЯЖЕНИЕМ 3 И 24 КВ НА СМЕЖНЫЕ КОММУНИКАЦИИ СВЯЗИ

Магнитное влияние контактной подвески на смежные коммуникации связи оценивалось через значение психофизического напряжения (напряжение шума  $U_{ш}$ ). Сведения и формулы, необходимые для его определения, приведены в [9], результаты расчетов представлены ниже.

Для контактной сети постоянного тока напряжением 3 кВ

$$U_{ш} = 13,5 \text{ В};$$

для контактной сети постоянного тока напряжением 24 кВ

$$U_{ш} = 210,2 \text{ В}.$$

Допустимое значение напряжения шума для смежных коммуникаций связи составляет  $U_{ш} = 1,0$  мВ [10–12]. Полученные значения значительно превышают допустимое, следовательно, при использовании системы тягового электроснабжения постоянного тока требуется установка сглаживающих устройств, причем для системы напряжением 24 кВ более мощных и дорогостоящих.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В среде динамического моделирования Matlab Simulink реализована имитационная модель, позволяющая оценить магнитное влияние контактной подвески постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи.

Определены параметры ключевых звеньев тяговой сети, которые необходимо учитывать при оценке магнитной совместимости контактной сети постоянного тока со смежными коммуникациями связи.

Проведен сравнительный анализ магнитного влияния контактной подвески постоянного тока напряжением 3 и 24 кВ на смежные коммуникации связи.

Установлено, что в контактной сети постоянного тока напряжением 3 кВ значение психофизического напряжения составляет 13,5 В, а в контактной сети постоянного тока напряжением 24 кВ — 210,2 В.

Большее значение психофизического напряжения, возникающего от влияния контактной сети постоянного тока напряжением 24 кВ на смежные слаботочные системы (коммуникации связи), обусловлено большим среднеквадратичным значением переменной составляющей выпрямленного тока: для

контактной сети напряжением 3 кВ — 0,22 А, а для контактной сети напряжением 24 кВ — 2,9 А.

Развитием представленного исследования будет оценка влияния на смежные линии момента нарастания аварийного тока в тяговой сети.

## Литература

1. Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитная совместимость в сетях электроснабжения // Мир транспорта. 2012. № 4. С. 46–49. ISSN 1992–3252.
2. Мушков Е. С., Марикин А. Н. Структура математической модели тягового электроснабжения постоянного тока с повышенным напряжением с учетом возможности оценки влияния на смежные линии // Бюллетень результатов научных исследований. 2018. № 3. С. 62–70. ISSN 2223–9987.
3. Бадер М. П. Анализ и синтез электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением // Электрификация транспорта. 2014. № 7. С. 78–83. ISSN 2307–4221.
4. Завгородний А. В., Гаврилюк В. И. Моделирование электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения // Вестник Днепропетровского национального института железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. 2005. № 6. С. 11–14. ISSN 1993–9175.
5. Сиченко В. Г. Моделирование электромагнитных процессов в тяговой сети постоянного тока // Вестник Днепропетровского национального института железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. 2011. № 31. С. 110–113. ISSN 1993–9175.
6. Dommel H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiple networks // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1969. Vol. PAS-88. No. 4. Pp. 388–399.
7. Carson J. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal. 1926. Vol. 5. No. 4. Pp. 539–554.
8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Москва : ДМК Пресс; Санкт-Петербург : Питер, 2008. 290 с.
9. Марикин А. Н., Мушков Е. С., Иванов М. А. Математическое моделирование электрического влияния тяговой сети постоянного тока напряжением 24 кВ на смежные линии // Электротехника. 2019. № 10. С. 23–26. ISSN 0013–5860.
10. Ковалева Т. В., Пашкова Н. В. Исследование волновых процессов в контактной сети и линиях электропередачи // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 71–79. ISSN 2220–4245.
11. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. Москва : Связь, 1969. 60 с.
12. Давыдов Г. Б., Рогинский В. Н. Сети электросвязи. Москва : Связь, 1977. 120 с.

## References

1. Kosarev B. I., Serbinenko D. V. Electromagnetic compatibility in power networks [Elektromagnitnaya sovместimost' v setyakh elektrosnabzheniya] // World of Transport and Transportation. 2012. No. 4. Pp. 46–49. ISSN 1992–3252.
2. Mushkov E. S., Marikin A. N. Mathematical model structure of high-voltage direct-current traction energy taking into account the ability to assess the impact on adjacent lines [Struktura matematicheskoy modeli tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka s povyshennym napryazheniem s uchetom vozmozhnosti otsenki vliyaniya na smezhnyye linii] // Bulletin of scientific research results. 2018. No. 3. Pp. 62–70. ISSN 2223–9987.
3. Bader M. P. The analysis and the synthesis of the electromagnetic compatibility of the traction power supply system and infrastructure in the districts with the high-speed traffic [Analiz i sintez elektromagnitnoy sovместimosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i infrastruktury na uchastkakh s vysokoskorostnym dvizheniem] // Electrification of Transport 2014. No. 7. Pp. 78–83. ISSN 2307–4221.
4. Zavgorodniy A. V., Gavriluk V. I. Modeling of electromagnetic processes in traction energy system [Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya] // Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. 2005. No. 6. Pp. 11–14. ISSN 1993–9175.
5. Sichenko V. G. Modeling of electromagnetic processes in electric-traction network [Modelirovaniye elektromagnitnykh protsessov tyagovoy sety postoyannogo toka] // Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. 2011. No. 31. Pp. 110–113. ISSN 1993–9175.
6. Dommel H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiple networks // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 1969. Vol. PAS-88. No. 4. Pp. 388–399.
7. Carson J. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Technical Journal. 1926. Vol. 5. No. 4. Pp. 539–554.
8. Chernykh I. V. Modeling of electrical engineering devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink [Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink]. Moscow : DMC Press; St. Petersburg : Piter, 2008. 290 p.
9. Marikin A. N., Mushkov E. S., Ivanov M. A. mathematical modeling of electric influence of direct current catenary with voltage of 24 kV on adjacent lines [Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskogo vliyaniya tyagovoy seti postoyannogo toka napryazheniem 24 kV na smezhnyye linii] // Russian Electrical Engineering. 2019. No. 10. Pp. 23–26. ISSN 0013–5860.
10. Kovaleva T. V., Pashkova N. V. The wave processes study in the overhead system and power lines [Issledovanie volnovykh protsessov v kontaktnoy seti i liniyakh elektropredachi] // Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 2 (22). Pp. 71–79. ISSN 2220–4245.
11. Klovskiy D. D. Transmission of discrete messages by radio channels [Pereдача diskretnykh soobshheniy po radiokanalam]. Moscow : Communication, 1969. 60 p.
12. Davydov G. B., Roginskiy V. N. Telecommunication networks [Seti elektrosvyazi]. Moscow : Communication, 1977. 120 p.

Объем статьи 0,45 авторских листа

УДК 629.4.066

Ришат Зинфирович Галинуров, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА СИГНАЛ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Rishat Zinfirovich Galinurov, postgraduate student, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

### Study of influence of rolling stock vibration on signal of distributed optical sensor by means of numerical modeling

#### Аннотация

Статья посвящена возможности применения распределенного оптического датчика на железнодорожном транспорте в качестве средства контроля местоположения подвижного состава.

Предложено численное моделирование сигнала фазочувствительного рефлектометра для оценки влияния вибрационного возмущения от движущегося подвижного состава. В теоретическом описании предполагается, что внешнее вибрационное воздействие образует область упругой деформации световода и вызывает изменение фазовых соотношений рассеянного излучения. Показано, что на сигнал распределенного датчика в большей степени влияют частота и амплитуда приложенного вибрационного колебания.

**Ключевые слова:** контроль местоположения подвижного состава, распределенный оптический датчик, фазочувствительный рефлектометр, обратно рассеянное излучение.

#### Summary

The paper is devoted to possibilities of application of a distributed optical sensor on the railway transport as a mean of rolling stock position control.

The paper proposes numerical modeling of a signal of a phase-sensitive reflectometer for assessing influence of moving rolling stock vibration. A theoretical description supposes that the external vibrational influence creates an area of elastic deformation of a light wave guide cable and causes changes of phase relations of scattered radiation. As a result, the author presents that the frequency and the amplitude of the applied vibration affect to a greater extent on the signal of the distributed optical sensor.

**Keywords:** rolling stock position control, distributed optical sensor, phase-sensitive reflectometer, back scattered radiation.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-101-105

#### ВВЕДЕНИЕ

На железнодорожном транспорте при движении подвижного состава образуются вибрационные воздействия. Помимо негативного влияния, вибрация может использоваться в качестве информационного признака, например, в системах определения местоположения подвижного состава с использованием волоконно-оптических сенсоров.

Благодаря совершенствованию конструкций оптических устройств и развитию методов обработки оптического сигнала область применения распределенных волоконно-оптических датчиков расширяется.

Термин «распределенный волоконно-оптический датчик» подразумевает использование всей длины оптического волокна в качестве датчика, и при этом не требуется применять какие-либо специальные точечные сенсоры, что, конечно же, является преимуществом по сравнению с традиционными датчиками местоположения подвижного состава, такими как рельсовая цепь и датчики осей [1].

В работах [2–4] предлагается применение фазочувствительной оптической рефлектометрии (ф-OTDR) на железнодорожном транспорте в качестве средства контроля местоположения подвижного состава.

Указанный метод рефлектометрии обладает рядом особенностей:

механические воздействия на оптическое волокно влияют на изменение фазовых соотношений обратно рассеянных волн;

обратно рассеянные волны складываются когерентно с учетом фазовых соотношений, что обеспечивает стационарную картину интерференции;

сигнал рассеяния в волокне является уникальной и неизменяемой характеристикой оптического волокна.

#### АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Основная причина вибраций железнодорожного пути при движении подвижного состава — наличие стыков и неровностей на рельсах и колесах. Под воздействием поездной нагрузки на основной площадке земляного полотна возникает сложный

вибрационный процесс, в котором можно выделить вертикальную и горизонтальную составляющие. Экспериментально установлено, что при повышении скоростей движения в прямых участках пути до 140 км/ч горизонтальная составляющая колебаний начинает превышать вертикальную.

Известно, что повышение скорости движения подвижного состава приводит к увеличению амплитуд колебаний грунта земляного полотна. Однако прямолинейная зависимость амплитуды колебания от скорости движения поезда наблюдается только при скоростях движения до 100–110 км/ч [5, 6].

С точки зрения анализа частотных характеристик колебаний подтверждено, что вертикальная составляющая виброскоростей грунта основной площадки в сечении под рельсами находится в пределах частот до 120 Гц (рис. 1) и наиболее интенсивна при частотах 40–60 Гц.

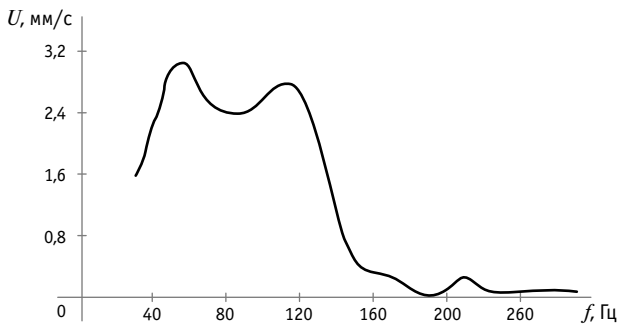


Рис. 1. Амплитудно-частотный спектр вертикальной составляющей виброскорости грунта основной площадки [6]

Таким образом, исходя из приведенного выше анализа вибрационных колебаний основной площадки под рельсом можно выделить следующие признаки для идентификации вибрационного воздействия подвижного состава:

величина амплитуды вертикальных перемещений грунта; частотные составляющие спектра колебаний грунта.

Оценить влияние указанных признаков на сигнал ф-OTDR можно с помощью построения численной модели обратного рассеянного излучения.

### ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

В силу принципа статистического характера взаимодействия света и вещества параметры и свойства излучения оптических источников носят принципиально статистический характер, поэтому при моделировании оптических систем используют методы математической статистики [7]. Известно следующее математическое описание процесса обратного рассеяния (рассеяние Рэлея), при котором волокно разбивается на условные независимые рассеивающие участки  $k$ . При этом сегменты  $k$  малы по сравнению с длиной оптической волны, а в пределах каждого сегмента отраженные волны будут когерентно складываться и давать результирующий вектор амплитуды обратного рассеяния для  $k$ -го сегмента  $p_k a_k e^{j\varphi_k}$ , где  $p_k$  характеризует состояние поляризации,  $\varphi_k$  — фазы,  $a_k$  — амплитуды света, рассеянного назад от сегмента  $k$  [8].

Стохастическая модель отклика на единичный импульс обратного рассеяния во временной области имеет вид

$$h(t) = U(t)p(t)a(t)e^{-2\alpha vt}, \quad (1)$$

где  $U(t)$  — прямоугольная функция единичной амплитуды, учитывающая конечную длину волокна;

$p(t)$  характеризует состояние поляризации обратно рассеянного света от расположения;

$a(t)$  — функция, характеризующая величину рассеяния;  $\alpha$  — коэффициент затухания.

Изменение фазы излучения, распространяющегося по световоду, происходит за счет изменения [9]:

длины световода  $\Delta l$ ;

диаметра световода  $\Delta d$ ;

показателя преломления (фотоупругого эффекта).

Величина фазового сдвига излучения, распространяющегося в однородно-деформированном световоде длиной  $L$ , определяется фотоупругостью материала световода:

$$\Delta\varphi \sim P_{\text{эф}} \sqrt{\frac{\varepsilon_s L}{d^2}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{эф}}$  — эффективный фотоупругий коэффициент;

$\varepsilon_s$  — параметр, характеризующий энергию упругой деформации;

$d$  — диаметр световода, м.

Выражение (2) показывает, что линейное изменение фазы излучения зависит от уровня деформации и геометрических размеров участка волокна, а нелинейные изменения возникают из-за нелинейных эффектов в волокне, которые, в свою очередь, приводят к изменению постоянной распространения. Исходя из вышесказанного изменение фазы под действием приложенных к световоду деформаций описывается в виде

$$\Delta\varphi = \beta \Delta l + L \frac{d\beta}{dn} \Delta n + L \frac{d\beta}{dd} \Delta d, \quad (3)$$

где  $\beta$  — постоянная распространения моды;

$\Delta l$  — удлинение световода под действием приложенных сил, м;

$\Delta n$  — изменение показателя преломления световода под действием приложенных сил;

$\Delta d$  — изменение диаметра световода под действием приложенных сил, м.

Ввиду преобладания поперечных составляющих колебания грунта при движении подвижного состава рассмотрим распространение вибрационной волны в упругой среде ортогонально оси оптического волокна. Для простоты предположим, что связь между средой, в которой распространяется волна, и оптическим волокном жесткая, так что движение частиц среды и движение соответствующих точек волокна подчиняются одному и тому же закону с одинаковой амплитудой.

На основании экспериментальных исследований, выполненных в [10], можно считать, что колебания грунта происхо-

дят во времени по гармоническому закону и задачу анализа вибрационных воздействий можно рассматривать в линейной постановке. Поэтому деформацию волокна, вызванную смещением среды, можно записать во временной области следующим образом:

$$A(x, t) = A \cos \left[ 2\pi f \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] = A \cos[k(x - vt)], \quad (4)$$

где  $A(x, t)$  — величина возмущения в точке  $x$  в момент времени  $t$ , м;

$A$  — величина, характеризующая смещение среды при колебании, м;

$f$  — величина, характеризующая частоту колебания, Гц;

$k$  — волновое число;

$v$  — фазовая скорость распространения волны, м/с.

При воздействии на участок  $dx$  световода поперечных деформаций  $A(x, t)$  (перпендикулярно оси световода) в нем возникает модулируемое двулучепреломление вследствие преобладания величин фотоупругого эффекта. Поэтому изменение фазы можно представить как  $\Delta\varphi = KA(x, t)dx$ , где  $K$  — константа, учитывающая совокупный вклад механического удлинения волокна и фотоупругого эффекта. Для случая стандартного одномодового волокна  $K = 4,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$  [11]. Тогда максимальное значение отклика на фазовое изменение, вызванное гармоническим поперечным воздействием на участок оптического волокна, имеет вид

$$\varphi = K \int_0^L A(x, 0) dx = KA \frac{1}{k} \sin(kL). \quad (5)$$

Стоит отметить, что увеличение частоты колебания возмущений слабо влияет на значение изменения фазы излучения, распространяющегося в световоде (рис. 2), в большей степени изменение фазы зависит от величины амплитуды вертикальных виброперемещений среды.

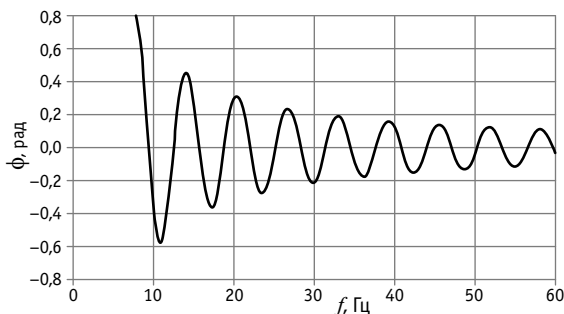


Рис. 2. Зависимость фазового изменения излучения, распространяющегося в световоде, от частоты колебания возмущения

Откликом фазочувствительного рефлектометра на внешнее воздействие является соответствующее измеренное изменение фазы излучения, рассеянного в обратном направлении участком оптического волокна. Для любого бесконечно малого от-

резка волокна  $dn$ , подвергнутого деформации, дополнительное изменение фазы излучения примем в качестве величины приращения  $\Phi(n, t) = \varphi_0 + \Delta\varphi$ . Тогда, согласно уравнению (1), обратно рассеянное излучение может быть представлено выражением  $E(n, t) = A(n, t) \exp[j\Phi(n, t)]$ .

При этом распределение амплитуд результирующего сигнала от центров рассеяния  $A(n, t)$  задается плотностью распределения в соответствии с формулой (6), а величина фазы  $\varphi_0$  некоторого малого отрезка волокна  $dn$  (здесь  $n$  — показатель преломления волокна) задается равномерным распределением на отрезке  $(-\pi; \pi)$  по всей длине волокна.

$$P_A(a) = \begin{cases} \frac{a}{\sigma^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} & \text{при } a > 0, \\ 0 & \text{при } a < 0 \end{cases} \quad (6)$$

где  $a$  — параметр, характеризующий затухание в волокне.

В ф-OTDR обратно рассеянное излучение регистрируется фотоприемником. В каждый момент времени на фотоприемник приходит волна, представляющая собой сумму волн, рассеянных от отдельных центров рассеяния в волокне. Поэтому интенсивность на фотоприемнике может быть рассчитана по принципу суперпозиции — электрическое поле в любой момент времени равно сумме всех индивидуальных полей центра рассеяния [12]:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T E(n, t)^2 dt. \quad (7)$$

Таким образом, интенсивность может быть описана выражением

$$I = \sum_i \frac{A(i)^2}{2} + \sum_i A(i) \frac{\sin(\Delta\omega + \Phi(i)) - \sin(\Phi(i))}{\Delta\omega}. \quad (8)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сигнал интенсивности обратного рассеяния, полученный по результатам численного моделирования, представлен на рис. 3а. График функции, характеризующий распределение интенсивности для смоделированного сигнала (рис. 3б), близок к экспоненциальному виду, что соответствует распределению интенсивности обратно рассеянного излучения полупроводникового лазера в одномодовом оптическом волокне [13].

Воздействие, характеризующее колебания грунта от движущегося подвижного состава (рис. 4), задавалось согласно формуле (4). На рис. 4 красная линия описывает интенсивность сигнала обратного рассеяния без внешнего воздействия, синяя линия — интенсивность сигнала при задании воздействия на некотором участке распределенного датчика.

С помощью построенной модели представляется возможным оценить реакцию системы на различные уровни амплитуд и частот колебаний (рис. 5).

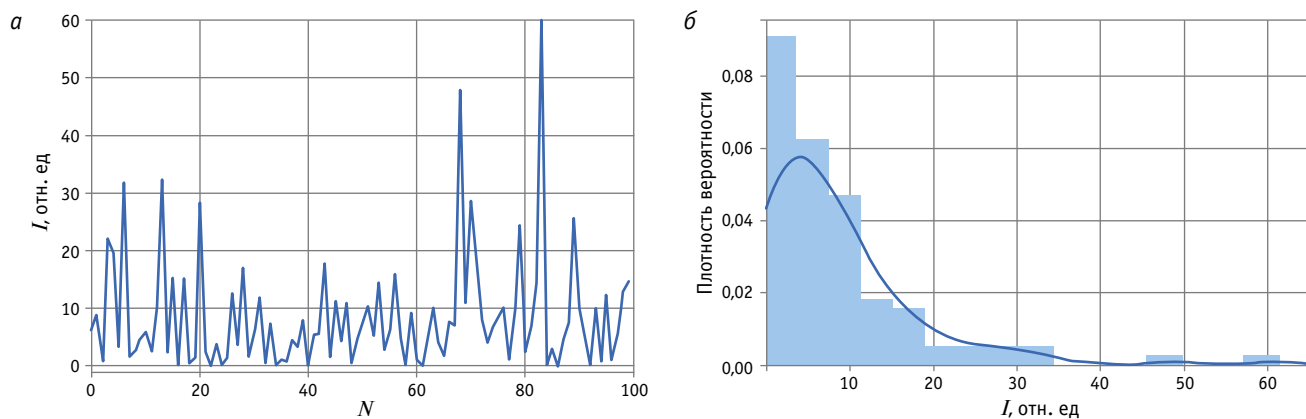


Рис. 3. Результат моделирования процесса рассеяния (а) и кривая плотности вероятности распределения интенсивности рассеянного излучения (б)

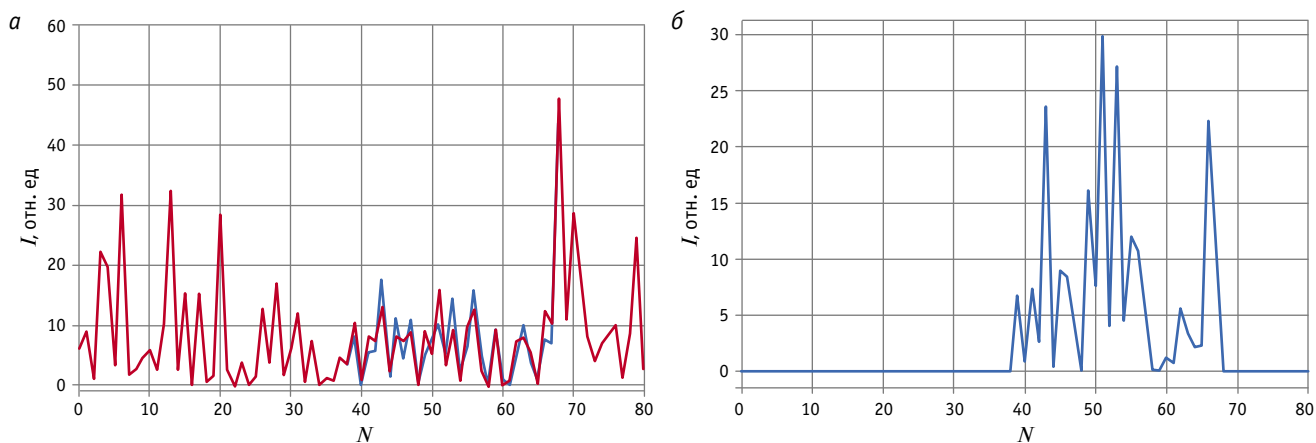


Рис. 4. Результат моделирования влияния воздействия на сигнал обратного рассеяния распределенного датчика (а) и график, характеризующий отклонение величины интенсивности сигнала при возмущении (б)

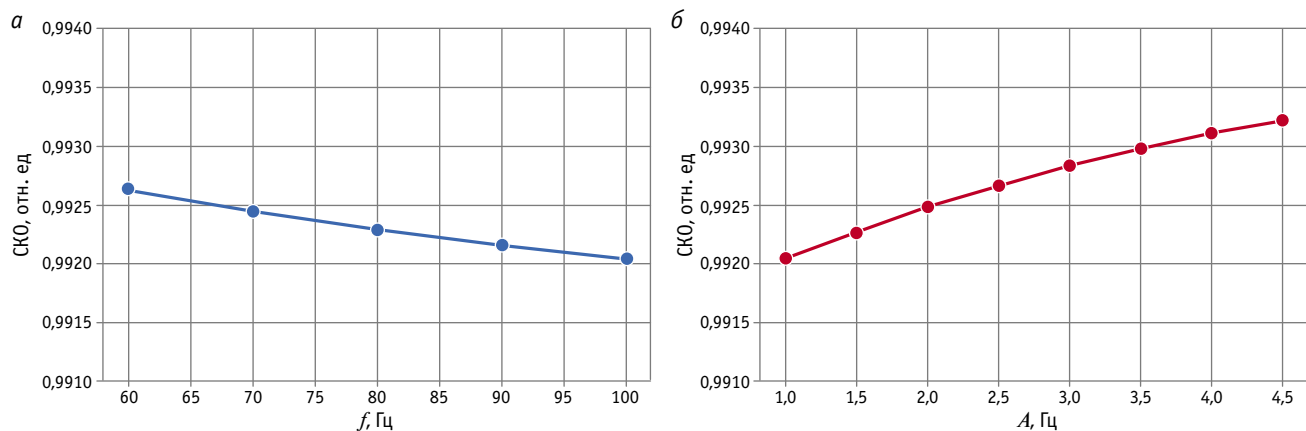


Рис. 5. Поведение численной модели при различных параметрах колебания:  
а — изменение стандартного отклонения данных в зависимости от частоты колебания;  
б — изменение стандартного отклонения данных в зависимости от амплитуды колебания



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что в большей степени изменение фазы излучения, распространяющегося по световоду, зависит от величины приложенной деформации (см. рис. 5б). Таким образом, увеличение скорости движения подвижного состава и амплитуды вертикальных перемещений грунта земляного полотна приводит к большему отклонению интенсивности сиг-

нала, регистрируемого фотоприемником фазочувствительного рефлектометра.

Предложенное численное моделирование сигнала фазочувствительного рефлектометра позволяет получить теоретический набор данных для разработки алгоритмов определения динамических параметров движения поезда, например скорости или ускорения.

## Литература

1. Галинуров Р. З., Попов А. Н. Измерение скорости подвижного состава с помощью распределенного волоконно-оптического датчика // Наука и образование транспорта : материалы XII Международной научно-практической конференции. Самара, 2019. С. 314–318.
2. Попов А. Н., Галинуров Р. З. Волоконно-оптические технологии в системах управления движением поездов и контроля состояния объектов инфраструктуры // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815–9400.
3. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR / Fei Peng, Ning Duan, Yun-Jiang Rao, Jin Li // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. Vol. 26. No. 20. Pp. 2055–2057.
4. Талалаев Д. В., Ермаков Е. В. Системы интервального регулирования на базе оптоакустических датчиков // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 9. С. 2–4. ISSN 0005–2329.
5. Ашпиз Е. С., Гасанов А. И., Глюзберг Б. Э. Железнодорожный путь : учебник. Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. 544 с.
6. Коншин Г. Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна : учебное пособие. Москва : МИИТ, 2010. 180 с.
7. Гудмен Дж. Статистическая оптика / Пер. с англ. Москва : Мир, 1988. 528 с.
8. Healey P. Statistics of Rayleigh Backscatter From a Single-Mode Fiber // IEEE Trans. Commun. 1987. Vol. 35. No. 2. Pp. 210–214.
9. Гуляев Ю. В., Меш М. Я., Проклов В. В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. Москва : Радио и связь, 1991. 152 с.
10. Юлдашев Ш. С., Саидов С. М., Набиев М. Я. Распространение вибраций в грунтах, возникающих при движении железнодорожных поездов // Молодой ученый. 2015. № 11 (91). С. 481–483. ISSN 2072–0297.
11. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance / A. E. Alekseev, B. G. Gorshkov, V. T. Potapov et al. // Laser Physics. 2020. No. 30. Pp. 1–10.
12. Masoudi A., Newson T. P. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling // Optics express. 2017. No. 25. Pp. 32021–32040.
13. Алексеев А. Е., Тезадов Я. А., Потапов В. Т. Статистика интенсивности обратно-рассеянного излучения полупроводникового лазера в одномодовом оптическом волокне // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 2. С. 74–81. ISSN 0320–0116.

## References

1. Galinurov R. Z., Popov A. N. Measurement of rolling stock speed by means of distributed fiber-optic sensor [Izmerenie skorosti podvizhnogo sostava s pomoshch'yu raspredelennogo volokonno-opticheskogo datchika] // Science and Education for Transport. 2019. No. 1. Pp. 314–318.
2. Popov A. N., Galinurov R. Z. Fiber optic technologies in the automatic train control systems and monitoring of railway infrastructure [Volonkonno-opticheskie tekhnologii v sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov i kontrolya sostoyaniya ob'ektov infrastruktury] // Transport of the Urals. 2018. No. 3 (58). Pp. 48–54. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-48-54. ISSN 1815–9400.
3. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR / Fei Peng, Ning Duan, Yun-Jiang Rao, Jin Li // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. Vol. 26. No. 20. Pp. 2055–2057.
4. Talalaev D. V., Ermakov E. V. Systems of train separation based on acousto-optic sensors [Sistemy interval'nogo regulirovaniya na baze optoakusticheskikh datchikov] // Automation, communication and informatics. 2019. No. 9. Pp. 2–4. ISSN 0005–2329.
5. Ashpiz E. S., Gasanov A. I., Glyuzberg B. E. Railway track [Zheleznodorozhnyy put'] : textbook. Moscow : UMTs ZhDT, 2013. 544 p.
6. Konshin G. G. Elastic deformations and vibrations of railway formation [Uprugie deformatsii i vibratsii zemlyanogo polotna] : textbook. Moscow : MIIT, 2010. 180 p.
7. Goodman J. Statistical Optics [Statisticheskaya optika] / Translated from English. Moscow : World, 1988. 528 p.
8. Healey P. Statistics of Rayleigh Backscatter From a Single-Mode Fiber // IEEE Trans. Commun. 1987. Vol. 35. No. 2. Pp. 210–214.
9. Gulyaev Yu. V., Mesh M. Ya., Proklov V. V. Modular effects in fiber light wave guide cables and their application [Modulyatsionnye efekty v volokonnykh svetovodakh i ikh primeneniye]. Moscow : Radio and communication, 1991. 152 p.
10. Yuldashev Sh. S., Saidov S. M., Nabiev M. Ya. Distribution of vibrations in soils arising at movement of trains [Rasprostraneniye vibratsiy v gruntakh, voznikayushchikh pri dvizhenii zheleznodorozhnykh poezdov] // Young Scientist. 2015. No. 11 (91). Pp. 481–483. ISSN 2072–0297.
11. Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance / A. E. Alekseev, B. G. Gorshkov, V. T. Potapov et al. // Laser Physics. 2020. No. 30. Pp. 1–10.
12. Masoudi A., Newson T. P. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling // Optics express. 2017. No. 25. Pp. 32021–32040.
13. Alekseev A. E., Tezadov Ya. A., Potapov V. T. Statistics of intensity of backscattered semiconductor laser radiation in single-mode optic fiber [Statistika intensivnosti obratno-rasseyannogo izlucheniya poluprovodnikovogo lazera v odnomodovom opticheskom volokne] // Technical Physics Letters. 2012. Vol. 38. No. 2. Pp. 74–81. ISSN 0320–0116.

Объем статьи 0,56 авторских листа



УДК 621.331:621.332

Сергей Андреевич Фроленков, аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОТЧЕТНЫМ ФОРМАМ КОМПЛЕКСА БЕСКОНТАКТНОЙ ДИАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Sergey Andreevich Frolenkov, postgraduate student, Railway Transport Power Supply Department, Samara State Transport University (SSTU), Samara, Russia

### Determination of main requirements for reporting forms of complex for contactless catenary diagnostics

#### Аннотация

Контактная сеть электрифицированных железных дорог — нерезервируемый и, как следствие, уязвимый элемент системы тягового электроснабжения. В Самарском государственном университете путей сообщения разработан комплекс бесконтактной диагностики контактной сети, который может быть установлен на специальных диагностических, а также на обычных единицах тягового и нетягового подвижного состава. В статье приведена схема работы комплекса, определены основные требования к его отчетным формам, представлены результаты измерений, полученных в ходе реальных поездок.

**Ключевые слова:** содержание инфраструктуры, организация движения, планирование «окон», график движения, задержки поездов.

#### Summary

Catenary of the electrified railways is unprotected and therefore defenseless element of a traction power supply system. Samara State Transport University has developed a complex for contactless catenary diagnostics. The complex can be installed on special diagnostic rolling stock units and on regular units of tractive and non-tractive rolling stock. The paper determines main requirements to reporting forms of the complex for contactless catenary diagnostics, provides scheme of operation, presents the results of measurements gained during real trips and shows their assessment.

**Keywords:** maintenance of infrastructure, operation of trains, planning of «breaks», train schedule, train delays.

DOI: 10.20291/1815-9400-2021-2-106-109

#### ВВЕДЕНИЕ

Главная задача системы электроснабжения железных дорог заключается в гарантированном энергообеспечении перевозочного процесса. Контактная сеть, сложный и нерезервируемый элемент системы тягового электроснабжения, находится во взаимодействии с токоприемными устройствами и испытывает механическое воздействие от ветра, гололедных образований, перемещений, связанных с температурными изменениями. Влияние указанных факторов приводит к тому, что подавляющее число повреждений в системе тягового электроснабжения приходится именно на контактную сеть. Этим обусловлена актуальность своевременной и качественной диагностики контактной сети. Главные требования, которые предъявляются к такой диагностике, — периодичность, точность контроля геометрических параметров, необслуживаемая (безлюдная) технология, надежность контроля диагностируемых параметров, т.е. надежность работы самой диагностической системы.

«Генеалогическое древо» систем диагностики контактной сети в своем основании представляло собой ручные средства диагностики, когда электромонтер вручную измерял контролируемые параметры. Вместе с этим выполнялся и визуальный осмотр контактной сети. Затем появились диагностические комплексы — измерительные вагоны-лаборатории, основу которых составлял измерительный токоприемник, оснащенный системой датчиков. Датчики определяли положение контактного провода в пространстве, измеряя его отклонения относительно оси пути и силу его нажатия на токоприемник. В то же время развивалась и система измерения износа контактного провода как контактным, так и оптическим способом. На более позднем этапе появились системы видеоаналитики, позволяющие записывать и обрабатывать видеоизображения. После создания надежных систем дистанционного контроля температуры стало возможным использовать термографию и обрабатывать полученные на ее основе данные непосредственно на диагностическом комплексе. Однако уже на этом этапе возникли трудности с одновременным использованием систем контроля геометрических параметров и локальных мест нагрева проводов контактной сети. Причина заключается в различных условиях

контроля: во втором случае обязательна привязка к тяжеловесному подвижному составу, вызывающему повышенные токовые нагрузки и, как следствие, повышенный нагрев проводов и элементов контактной сети.

Следует отметить, что уже на самом раннем этапе развития систем диагностики произошло их разделение на мобильные (ручные, переносные, компактные, мобильные на базе тележки) и размещаемые на подвижном составе. Первое направление, имея такое преимущество, как невысокая стоимость, приобрело популярность во второй половине XX в. Однако в настоящее время из-за низкого уровня производительности труда и в связи с общим вектором развития систем диагностики, направленным на безлюдные, автоматизированные и необслуживаемые технологии, оно не получает поддержки.

Рассматривая историю развития систем диагностики контактной сети, можно с уверенностью выделить ключевое направление. Его основные критерии: полная автоматизация, размещение систем диагностики на подвижном составе (специализированном и неспециализированном в качестве компактного крышевого оборудования), высокая периодичность (до нескольких раз в сутки), накопление огромного массива данных и его обработка на основе технологий искусственного интеллекта и использования технологии работы с «большими данными», высокая точность измерения.

В Самарском государственном университете путей сообщения (СамГУПС) разработан комплекс бесконтактной диагностики контактной сети, предусматривающий использование оптоэлектронных сканеров, измеряющих геометрию контактного провода (рис. 1). Использование комплекса позволит обеспечить высокую эффективность выявления элементов (узлов), имеющих пониженную надежность; повысить энергообеспечение перевозочного процесса за счет своевременной диагностики; снизить затраты труда и стоимость эксплуатации контактной сети; сократить время восстановления при повреждениях; усовершенствовать систему оперативного управления (внедрение автоматизации и телеуправления); создать наиболее надежную структурную схему обслуживания устройств.

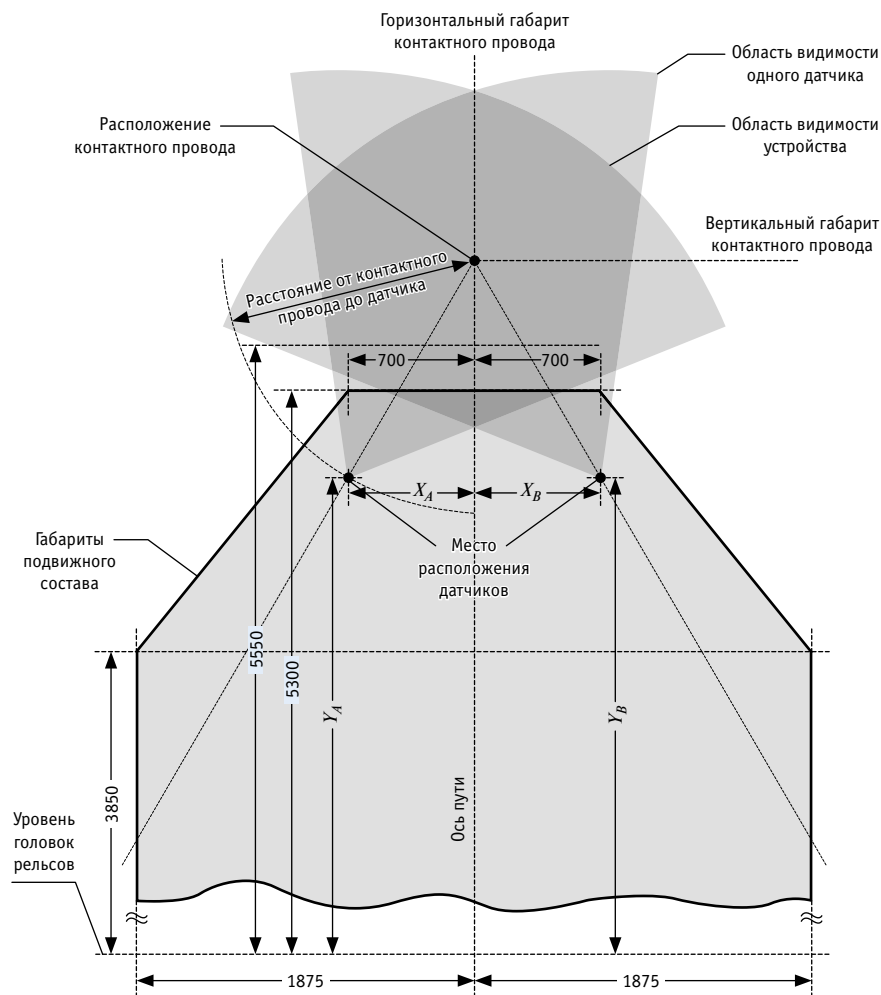


Рис. 1. Схема работы комплекса диагностики контактной сети

Диагностика предусматривает внедрение предлагаемых устройств на всех ключевых узлах контактной подвески: при двух контактных проводах датчик устанавливают в зону общих струновых зажимов; при использовании на ромбовидных подвесках датчики размещают на каждый контактный провод; в зоне воздушной стрелки — за пределами ограничительной накладки на обеих ветвях; на сопряжении анкерных участков — в местах переходных пролетов (в точках перехода токоприемника на новый анкерный участок).

Целью исследования, представленного в статье, было определение основных требований к отчетным формам разработанного комплекса. В своей работе автор опирался на труды научной школы СамГУПС, посвященные диагностике контактной сети на основе оптоэлектронных устройств [1–7].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ОТЧЕТНЫМ ФОРМАМ КОМПЛЕКСА

В рамках исследования были проанализированы принципы работы вагонлаборатории для испытания контактной сети ВИКС нового поколения [8] как устройства, решающего наиболее близкие к комплексу задачи по контролируемым объектам и их параметрам. Кроме того, проанализированы принципы работы путеизмерительной тележки ПТ-7МК [9] как устройства, имеющего сходные с комплексом эксплуатационные характеристики и размеры, а также принципы работы оператора [10].

Для формирования отчетных форм по результатам контроля участка контактной сети были определены требования, обусловленные целями и задачами мобильного комплекса.

Наклон	Опоры		Контактный провод	
	Габарит	Отметки	Зигзаг	Высота
0	● 380	656 ----	-253	640
0	● 350	658 ----	322	645
1	● 390	664 ----	-234	635
1	● 360	666 ----	327	643
2	● 390	668 ----	-248	662
0	● 360	672 ----	339	648
0	● 390	674 ----	-287	635
1	● 380	676 ----	217	653

**Рис. 2. Параметры элементов контактной сети по результатам обследования мобильным контрольно-вычислительным комплексом для диагностики контактной сети**

*Таблица 1*

Нарушения, выявленные по результатам обследования мобильным контрольно-вычислительным комплексом для диагностики контактной сети

№ п/п	ЭЧК, ЭЧ, перегон, станция	Отклонение от норматива		
		Номера опор	Вид отклонения	Значение отклонения
1	2	3	4	5
<b>Безымянка</b>				
1	ст. Безымянка			
	Безымянка – Смышляевка	166–168	Уклон КП	60 мм
		168–170	Уклон КП	70 мм
		92–94	Уклон КП	65 мм
		158–160	Уклон КП	65 мм
		192–194	Высота КП	5710 мм
	ст. Смышляевка			
	Смышляевка – Алексеевская	81	Зигзаг	510 мм
	ст. Алексеевская	120–122	Стрела провеса	170 мм
		130–132	Стрела провеса	190 мм

1. В отчете должно быть указание на несоответствие участка состоянию, определяемому заданной нормативной инструкцией. Должны быть отмечены отступления от нормативов: вид отступления, значение нарушения, координата отступления (номер опоры).

2. Отчет должен содержать как можно более полную информацию о параметрах элементов контактной сети на участке: контактного провода, опор, элементов продольного электроснабжения.

3. Содержащаяся в отчете информация об отступлениях от нормативов и о параметрах элементов контактной сети должна быть составлена с использованием средств визуализации (графиков, схем). Для удобства пользования мобильным комплексом службами электроснабжения представление графиков должно быть схожим с аналогичным представлением уже применяемых средств диагностики (ВИКС).

### ОТЧЕТНЫЕ ФОРМЫ КОМПЛЕКСА

Исходя из приведенных требований и анализа работы существующих диагностических средств разработаны и согласованы выходные формы мобильного контрольно-вычислительного комплекса.

Форма № 1. Параметры элементов контактной сети по результатам обследования мобильным контрольно-вычислительным комплексом для диагностики контактной сети (рис. 2). Эта форма содержит максимально полную информацию о текущем состоянии участка контактной сети по параметрам ее элементов. Она разбивается на секции по элементам. Первая секция — «Опоры», далее каждая секция соответствует каждому распознанному проводу контактной сети. Секция «Контактный провод» должна присутствовать обязательно. При распознавании других проводов (несущего троса, усиливающего провода, проводов продольного электроснабжения) добавляется соответствующая секция с графиками, аналогичными секции «Контактный провод». Для отчета необходимо отметить идентификационный номер мобильного комплекса, дату обследования, оператора.

Форма № 2. Нарушения, выявленные по результатам обследования мобильным контрольно-вычислительным комплексом для диагностики контактной сети. Эта форма должна содержать информацию об отклонениях состояния контактной сети от нормативного в соответствии с инструкцией оценки ПУТЭК. Таблица (пример приведен в табл. 1) сходна с заполняемой на вагоне-лаборатории ВИКС. При помощи этой таблицы можно оценить состояние участка по балльной системе. Для отчета необходимо отметить идентификационный номер мобильного комплекса, дату обследования, оператора.

В рамках выполненного исследования были уточнены требования к набору получаемой в результате обработки измерений информации: утверждены диагностируемый набор элементов контактной сети, состав параметров каждого элемента, нормативная инструкция оценки состояния параметров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гарантированное энергообеспечение перевозочного процесса — главная задача хозяйства электроснабжения электрифицированных железных дорог. Предлагаемый комплекс

представляет собой аналог существующих технических устройств диагностики контактной сети, но имеет ряд преимуществ. Основная технологическая новация, отличающая комплекс от известных средств измерения геометрических параметров элементов контактной сети, состоит в применении лазерных оптоэлектронных устройств и средств вычислительной техники, что позволяет отказаться от использования контактного токоприемника с матричным преобразователем и телевизионных камер, производить диагностику не только контактного провода, но также несущего троса, экранирующих и усиливающих проводов, проводов продольного электроснабжения.

Представленные в статье отчетные формы позволяют перейти к разработке программного обеспечения для комплекса бесконтактной диагностики контактной сети и разработке модуля взаимодействия с пользователем — оператором комплекса.

Направлениями дальнейших исследований будут анализ и выбор оптимальных мест установки оптических устройств. Основные задачи данного этапа — рассмотрение существующих вариантов конструктивного исполнения технических средств диагностики; выявление недостатков и трудностей, возникающих при их эксплуатации; разработка предложений по устранению этих недостатков с позиции наилучшего технического решения.

## Литература

1. Бахрах А. Г., Гаранин М. А., Митрофанов С. А. Мобильный контрольно-вычислительный комплекс для диагностики контактной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2010. № 4 (24). С. 49–52. ISSN 1997–0722.
2. Бахрах А. Г., Гаранин М. А., Фомочкина Д. А. Разработка мобильного контрольно-вычислительного комплекса для диагностики контактной сети рельсовых видов транспорта // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2012. № 8. С. 76–80.
3. Гаранин М. А., Фроленков С. А. Совершенствование диагностики контактной сети // Наука и образование транспорту. 2016. № 1. С. 243–245.
4. Фроленков С. А. Устройства современной диагностики контактной сети // Наука и образование транспорту. 2017. № 1. С. 259–261.
5. Фроленков С. А., Гаранин М. А. Применение фотоэлементов для бесконтактной диагностики контактной сети // Наука и образование транспорту. 2018. № 1. С. 281–283.
6. Фроленков С. А. Использование бесконтактных датчиков для диагностики контактной сети // Вестник современных исследований. 2019. № 2.18 (29). С. 76–80. ISSN 2541–8300.
7. Гаранин М. А., Митрофанов А. Н., Митрофанов С. А. Устройство для контроля геометрии контактной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 1 (55). С. 24–29. ISSN 1997–0722.
8. Вагон-лаборатория нового поколения для испытаний контактной сети. URL: <http://www.css-rzd.ru/zdm/12-1998/8368.htm> (дата обращения: 15.10.2020).
9. Тележки путеизмерительные. URL: <http://www.td-avtomatika.ru/catalog/detail.php?ID=34070> (дата обращения: 15.10.2020).
10. Положение об организации промеров пути стрелочных переводов на станциях и подъездных путях путеизмерительными тележками : приложение № 40 к приказу начальника Куйбышевской дороги от 16.02.2011 г. № Н/93. 15 с.

## References

1. Bakhrah A. G., Garanin M. A., Mitrofanov S. A. A mobile control computational system for catenary diagnostics [Mobil'nyy kontrol'no-vychislitel'nyy kompleks dlya diagnostiki kontaktnoy seti] // Bulletin of transport of the Volga region. 2010. No. 4 (24). Pp. 49–52. ISSN 1997–0722.
2. Bakhrah A. G., Garanin M. A., Fomochkina D. A. Development of mobile checking and calculating complex for diagnostics of catenary for rail means of transport [Razrabotka mobil'nogo kontrol'no-vychislitel'nogo kompleksa dlya diagnostiki kontaktnoy seti rel'sovykh vidov transporta] // Herald of Institute of Traction and Rolling Stock. 2012. No. 8. Pp. 76–80.
3. Garanin M. A., Frolenkov S. A. Improvement of catenary diagnostics [Sovershenstvovanie diagnostiki kontaktnoy seti] // Science and Education for Transport. 2016. No. 1. Pp. 243–245.
4. Frolenkov S. A. Devices of modern catenary diagnostics [Ustroystva sovremennoy diagnostiki kontaktnoy seti] // Science and Education for Transport. 2017. No. 1. Pp. 259–261.
5. Frolenkov S. A., Garanin M. A. Application of photo-elements for contactless catenary diagnostics [Primenenie fotoelementov dlya beskontaktnoy diagnostiki kontaktnoy seti] // Science and Education for Transport. 2018. No. 1. Pp. 281–283.
6. Frolenkov S. A. Application of contactless sensors for catenary diagnostics [Ispol'zovanie beskontaktnykh datchikov dlya diagnostiki kontaktnoy seti] // Herald of Modern Studies. 2019. No. 2.18 (29). Pp. 76–80. ISSN 2541–8300.
7. Garanin M. A., Mitrofanov A. N., Mitrofanov S. A. Device for controlling catenary geometry [Ustroystvo dlya kontrolya geometrii kontaktnoy seti] // Bulletin of transport of the Volga region. 2016. No. 1 (55). Pp. 24–29. ISSN 1997–0722.
8. New generation research car for testing catenary [Vagon-laboratoriya novogo pokoleniya dlya ispytaniy kontaktnoy seti]. URL: <http://www.css-rzd.ru/zdm/12-1998/8368.htm> (access date: 15.10.2020).
9. Track measuring trucks [Telezhki puteizmeritel'nye]. URL: <http://www.td-avtomatika.ru/catalog/detail.php?ID=34070> (access date: 15.10.2020).
10. Statute on organization of switch tracks measurements at stations and spur tracks by track measuring trucks [Polozhenie ob organizatsii promerov puti strelochnykh perevodov na stantsiyakh i pod'ezdnykh putyakh puteizmeritel'nymi telezhkami] : Application No. 40 to the Order of the Head of the Kuybyshev Railway dated 16.02.2011 No. N/93. 15 p.

Объем статьи 0,47 авторских листа

### Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

**Назначение платежа:** «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

### Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

<b>Извещение</b>	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2021 г.</p>
<b>Квитанция</b>	<p>Получатель: <u>Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС</u> КПП: <u>667001001</u> ИНН: <u>6670317893</u> ОКТМО: <u>65701000</u> Р/сч.: <u>40703810863010000192</u> в: <u>ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ</u> БИК: <u>046577795</u> К/сч.: <u>30101810900000000795</u> Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: <u>Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС</u> Платательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп.  Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2021 г.</p>

Подписка на 2021 год.

Периодичность — 4 номера в год.

ф. СП-1

**АБОНЕМЕНТ**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Количество  
комплектов:

на 2021 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на ~~газету~~  
журнал

**46463**

(индекс издания)

**Транспорт Урала**

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	руб. ____ коп.	

на 2021 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Куда**

(почтовый индекс)

(адрес)

**Кому**

(фамилия, инициалы)

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (69), 2021 год

Издаётся с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Почта России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 30.06.2021      Выход в свет 07.07.2021

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–50). Формат 60×90/8

Цена 434,41 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Заказ № 24

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2021



28-30 СЕНТЯБРЯ

УФА 2021

📍 ВДНХ ЭКСПО



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
РЕСПУБЛИКИ  
БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА  
И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ТРАНСПОРТНАЯ ДИРЕКЦИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БВК БАШКИРСКАЯ  
ВЫСТАВОЧНАЯ  
КОМПАНИЯ

# ТРАНСПОРТ

## TRANSPORT OF THE URALS

VI specialized Forum and Exhibition



VI специализированный  
форум и выставка

# УРАЛА



[www.uraltransexpo.ru](http://www.uraltransexpo.ru)



(347) 246-42-00, 246-42-29



[avto@bvkexpo.ru](mailto:avto@bvkexpo.ru)



[@transforumufa](https://www.instagram.com/transforumufa)



Транспортный форум

[www.uraltransexpo.ru](http://www.uraltransexpo.ru)

#транспортныйфорум #транспурала

