



Вестник

Уральского
государственного
университета
путей сообщения

Научный журнал

Herald
of the Ural State University
of Railway Transport

Scientific journal



Научный журнал
Вестник Уральского государственного
университета путей сообщения
(Вестник УрГУПС)
№ 2 (42), 2019 год

Главный редактор
Василий Михайлович Сай
Научный редактор
Василий Федорович Лапшин

Литературный и выпускающий редактор
Людмила Станиславовна Барышникова

Техническое редактирование и верстка
Светлана Николаевна Наймушина

Учредитель и издатель:
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учрежде-
ние высшего образования «Уральский
государственный университет путей
сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя, издателя и редакции:
620034, Екатеринбург,
ул. Колмогорова, 66

Телефон редакции: (343) 221-25-60.
Веб-сайт: www.usurt.ru/vestnik;
e-mail: vestnik@usurt.ru.

Вестник УрГУПС включен ВАКом
в перечень периодических, научных
и научно-технических изданий,
выпускаемых в Российской Федерации,
в которых рекомендуется публикация
основных результатов диссертаций.

DOI:10.20291/2079-0392

Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
Роскомнадзора ПИ № ФС77–38188
от 30 ноября 2009 г.

Подписной индекс журнала
в общероссийском
каталоге «Пресса России» – 70070

Отпечатано в издательстве
Уральского государственного
университета путей сообщения,
620034, Екатеринбург,
ул. Колмогорова, 66.

Подписано в печать 20.06.2019
Дата выхода в свет 01.07.2019.
Цена 319 руб.

Тираж 300 экз. 1-й з-д: 1–80.
Формат 70×100/16.
Заказ 38

Уральский государственный
университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС), 2019 ©

Scientific journal «Herald of the
Ural State University
of Railway Transport»
(Herald of the USURT)
№ 2 (42), 2019

Editor-in-chief,
Vasily M. Say
Science editor
Vasily F. Lapshin

Script and copy editor
Lyudmila S. Baryshnikova

Technical editing and make-up
Svetlana N. Naimushina

Founder and publisher:
Federal state-funded educational
institution of the higher education
«Ural State University of Railway Transport»
(FGBOU VO URGUPS)

Address of the founder, publisher and edition:
66 Kolmogorov Street,
620034, Ekaterinburg

Telephone: +7 (343) 221-25-60.
Web-site: www.usurt.ru/vestnik;
e-mail: vestnik@usurt.ru.

DOI:10.20291/2079-0392

Certificate of registration of mass media
by the Federal Service for Supervision
in the sphere of communications,
information technology and mass communications
(Roskomnadzor) PI № FS77–38188
of November 30, 2009.

Subscription reference number
of the issue in the All Russia Catalogue
«Pressa Rossii» – 70070

Printed in the Publishing house
of the Ural State University of
Railway Transport
66 Kolmogorov Street,
620034, Ekaterinburg.

Passed for printing 20.06.2019
Data of issue 01.07.2019.
The price 319 rub.

Circulation 300. The 1st pr.: 1–80.
Format 70×100/16.
Order 38

The Ural State University
of Railway Transport
(FGBOU VO URGUPS), 2019 ©

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Кейт Бурнхам, профессор, Университет г. Ковентри, факультет машиностроения и вычислительной техники, Великобритания

Петер Копачек, профессор, Венский технологический университет, Венский институт транспорта и робототехники, интеллектуальный транспорт и робототехника, Вена, Австрия

Владимир Цыганов, д-р техн. наук, профессор, Институт проблем управления Российской академии наук, Москва, Россия

Сергей Герман-Галкин, д-р техн. наук, профессор, Морская академия, Институт судовой автоматики и электротехники, Щецин, Польша

Клаус Беккер, профессор, Университет прикладных наук г. Кельна, Институт автомобильной техники, лаборатория NVH, Германия

Василий Сай, д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Аккерман Геннадий Львович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Ашпиз Евгений Самуилович, д-р техн. наук, профессор, РУТ, Москва

Булаев Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Воробьев Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, МГУПС, Москва

Воскресенская Тамара Петровна, д-р техн. наук, профессор, СибГИУ, Новокузнецк

Корнилов Сергей Николаевич, д-р техн. наук, профессор, МГТУ, Магнитогорск

Кузнецов Константин Борисович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Курганов Валерий Максимович, д-р техн. наук, ТГУ, г. Тверь

Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

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

Сизый Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, УрФУ, Екатеринбург

Тимофеева Галина Адольфовна, д-р физ.-мат. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Щурин Константин Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ОГУ, Оренбург

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Keith Burnham, professor, Coventry University, Faculty of Engineering and Computing, Great Britain

Peter Kopachek, professor, Vienna University of Technology, Vienna Institute of Transportation and Robotics, Intelligent Transportation and Robotics, Vienna, Austria

Vladimir Tsyganov, DSc, professor, Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences, Moscow, Russia

Sergey German-Galkin, DSc, professor Maritime Academy, Institute of naval automation and electric engineering, Szczecin, Poland

Klaus Becker, professor, Cologne University of Applied Sciences, Institute of Automotive Engineering, NVH Laboratory, Germany

Vasily Say, DSc, professor, The Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

EDITORIAL BOARD

Akkerman Gennadiy Lvovich, DSc, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

Ashpiz Evgeniy Samuilovich, DSc, Professor, Russian University of Transport, Moscow

Bulaev Vladimir Grigorievich, DSc, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

Vorobjev Alexander Alexeevich, DSc, professor, Moscow State University of Railway Transport, Moscow

Voskresenskaya Tamara Petrovna, DSc, professor, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Kornilov Sergey Nikolaevich, DSc, professor, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Kuznetsov Konstantin Borisovich, DSc, professor, The Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg

Kurganov Valeriy Maximovich, DSc, Professor, Tver State University, Tver city

Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

Sapozhnikov Valery Vladimirovich, DSc, professor, Petersburg State University of Railway Transport, Saint-Petersburg

Sizyi Sergey Viktorovich, D. Sc. in engineering, professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Timofeeva Galina Adolfovna, DSc, professor, The Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg

Shchurin Konstantin Vladimirovich, DSc, professor, Orenburg State University, Orenburg

Содержание

Механика машин и роботов

- 4 Р.В. Гучинский. Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор
- 12 А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Б. Власов, А.Г. Карпенко, В.В. Руднев. Исследование эксплуатационных параметров электрических бензиновых насосов с разной степенью износа

Управление в технических системах

- 26 С.В. Абдулов, В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.Г. Яковлев. Обоснование алгоритма построения маршрута для беспилотного гусеничного транспортного средства
- 34 Н.В. Медведева, С.С. Титов. К разработке абсолютно стойких систем передачи данных
- 44 А.М. Плаксин, А.В. Гриценко, К.В. Глемба, Д.Б. Власов, А.Г. Карпенко, В.В. Руднев. Поэтапное моделирование процесса подачи топлива электрических насосов роликового объемного типа
- 56 А.И. Скутин, М.М. Мыльников. Моделирование вертикальных и поперечных воздействий в балластном слое

Организация и логистика

- 66 К.В. Панов. Исследование вероятностных процессов функционирования локомотиворемонтного предприятия
- 76 В.А. Антропов, М.Ю. Книск. Методологические основы развития человеческого капитала для «зеленой» экономики России

Безопасность деятельности человека

- 87 А.Р. Закирова. Концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц
- 94 К.Б. Кузнецов, А.Р. Закирова, Г.А. Полунин. Развитие теории оценки магнитного поля вблизи контактной сети постоянного тока

Contents

Mechanics of machines and robots

- 4 R.V. Guchinsky. Calculation of electric train wagon body inherent bending vibrations frequency with consideration for support yield
- 12 A.M. Plaksin, A.V. Gritsenko, K.V. Glemba, D.B. Vlasov, A.G. Karpenko, V.V. Rudnev. Investigation of working parameters of electric fuel pumps with different deterioration rate

Control in engineering systems

- 26 S.V. Abdulov, V.B. Derzhansky, I.A. Taratorkin, A.G. Yakovlev. Feasibility of route building algorithm for driverless caterpillar-mounted vehicle
- 34 N.V. Medvedeva, S.S. Titov. In regards to completely failure-free systems of data communication
- 44 A.M. Plaksin, A.V. Gritsenko, K.V. Glemba, D.B. Vlasov, A.G. Karpenko, V.V. Rudnev. Stepwise simulation of fuel flow input of volumetric roller electric pumps
- 56 A.I. Skutin, M.M. Mylnikov. Simulation of vertical and transverse exposures in ballast bed

Organization and logistics

- 66 K.V. Panov. Investigation of probabilistic processes of locomotive repair enterprise functioning
- 76 V.A. Antropov, M. Yu. Kniss. Methodological framework of development of human capital for Russia's «green» economy

Personal and social safety

- 87 A.R. Zakirova. Evaluation concept of additive effect of electric and magnetic fields up to 1 kHz on personnel
- 94 K.B. Kuznecov, A.P. Zakirova, G.A. Polunin. Development of theory of magnetic field assessment nearby a direct current catenary

Механика машин и роботов

УДК 629.423

Р. В. Гучинский

Расчет частоты собственных изгибных колебаний кузова вагона электропоезда с учетом податливости опор

UDC 629.423

R. V. Guchinsky

Calculation of electric train wagon body inherent bending vibrations frequency with consideration for support yield

Аннотация

Предварительный расчет собственной частоты изгибных колебаний позволяет найти оптимальные решения по увеличению жесткости конструкции кузовов вагонов и ускорить процесс их проектирования. В работе рассмотрено влияние жесткости опор на собственную частоту изгибных колебаний кузова. Показано влияние относительной длины базы кузова на увеличение частоты за счет податливости опор с использованием дифференциального уравнения изгибных колебаний балки эквивалентной жесткости. Определены коэффициенты увеличения частоты для ряда конечно-элементных моделей кузовов вагонов электропоездов, отличающихся габаритными размерами и конструкцией боковых стен. Выявлено, что при повышении жесткости опор колебания подпрыгивания кузова переходят в изгибные. Описано влияние параметров кузова на увеличение частоты изгибных колебаний из-за податливости опор. Применение балочной аналогии может привести к недостоверным оценкам частоты и влияния на нее податливости опор в случае вагонов электропоездов в отличие от пассажирских самоходных вагонов. Значение частоты изгибных колебаний не зависит от жесткости опор в пределах используемых в вагоне строении параметров рессорного подвешивания. Конечно-элементная оценка частоты с учетом податливости опор может быть выполнена для безопорного состояния кузова.

Ключевые слова: кузов, электропоезд, метод конечных элементов, податливость опор, частота собственных колебаний, тележка.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-4-11

Annotation

Preliminary calculation of inherent bending vibrations frequency makes it possible to find optimized decisions related to increase of wagon body structure rigidity and accelerate the process of their designing. The article looks upon the influence of rigidity of supports on inherent wagon bending vibrations frequency. It shows the influence of body base relative length upon frequency increase due to support yield through differential equation of bolster bending vibrations of equivalent rigidity. Frequency increase coefficients for a number of electric train body finite element models are determined, which are distinct in dimensional specifications and lateral walls structure. It was found that under increase of support rigidity, body bouncing vibrations turn into bending ones. The influence of body parameters on bending vibrations frequency increase due to support yield is described. Application of bolster analogy may result in invalid evaluations of frequency and support yield influence in case of electric train wagons unlike passenger non-self-propelled carriages. The value of bending vibrations frequency is not dependent on support rigidity within the framework of bogie suspension parameters applied in railway car building. The finite element evaluation of frequency with due consideration for support yield can be done for body unsupported condition.

Key words: body, electric train, finite element method, support yield, inherent vibrations frequency, bogie.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-4-11

Статья рекомендована к публикации В.Ф. Лапшиным, д-ром техн. наук, профессором УрГУПС. E-mail: VLapshin@usurt.ru.

Руслан Валерьевич Гучинский, канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор бюро кузовов ООО «ТМХ Инжиниринг», Санкт-Петербург; с.н.с. лаборатории численных моделей механики материалов и конструкций ИПмаш РАН; Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ruslan239@mail.ru.

The article is recommended for publishing by V.F. Lapshin, Doctor of technical science, professor, USURT. E-mail: VLapshin@usurt.ru.

Ruslan Valerievich Guchinsky, Candidate of technical science, Leading Development Engineer, Bogie Bureau, JSC «TMX Engineering», Saint-Petersburg; Senior Researcher of Laboratory for Numerical models of Mechanics of materials and structures, IPmach RAS; Saint-Petersburg, Russia. E-mail: ruslan239@mail.ru.

Эксплуатация подвижного состава неизбежно связана с его вибрацией, вызванной главным образом нерегулярностью профиля рельса. Через тележки вибрация передается на кузов, снижая уровень комфорта пассажиров. Один из способов уменьшения вибрации – установка различных систем демпфирования колебаний в тележках [1, 2]. Внутреннее оборудование и теплоизоляция вагона дополнительно уменьшают вибрацию местных элементов кузова и его конструкции в целом. Наличие пассажиров тоже оказывает демпфирующее влияние и ограничивает вибрацию кузова [3].

На уровень комфорта влияет частота изгибных колебаний кузова в диапазоне 6–12 Гц. Для организма человека колебания с частотой 4–8 Гц признаны нежелательными [4]; по отечественным нормативным документам частота колебаний полностью оборудованного кузова не должна быть менее 8 Гц [5, 6]. Значение частоты зависит от многих факторов, например, длины кузова, жесткости его поперечного сечения, массы и характера ее распределения по кузову. Сдвиговая податливость боковых стен, зависящая от размещения и размеров оконных и дверных проемов, тоже влияет на общую жесткость кузова и собственную частоту [7]. Жесткость внутреннего и наружного оборудования вносит вклад в общую жесткость кузова и приводит к некоторому увеличению частоты [8, 9].

Значение частоты изгибных колебаний необходимо определять не только расчетом, но и экспериментально. При ходовых испытаниях основным источником колебаний служат неровности пути. Испытания по определению собственной частоты проводятся и в статическом положении кузова, тогда используются гидравлические или электродинамические вибромашины, ударные грузы, также может выполняться сброс с клиньев или возбуждение колебаний с помощью специальных крюков [10]. Испытания можно

проводить и на домкратах в статическом положении, если нельзя установить кузов на тележки. В этом случае необходимо оценить влияние податливости тележек на частоту колебаний кузова.

Для расчета свободных изгибных колебаний кузов пассажирского вагона может быть представлен балкой постоянного сечения, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой [11]. Также в работе [11] получены экспериментальные результаты по влиянию податливости опор на собственную частоту изгибных колебаний: 35 % для стального кузова длиной 23,6 м и 68 % для сталеалюминиевого кузова длиной 26 м. Отличие в степени влияния В. М. Мейстер аргументирует различающейся в 3,5 раза жесткостью поперечных сечений кузовов.

Теоретическая оценка влияния податливости опор

В первом приближении кузов на упругих опорах может рассматриваться как безопорная балка под действием равномерно распределенной нагрузки. На этом предположении основана формула для предварительного расчета частоты собственных изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов [12, 13]:

$$\vartheta = k \frac{\alpha_0^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{3,027}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (1)$$

где L – длина кузова, м; m – масса единицы длины кузова брутто, кг/м; I – момент инерции среднего сечения кузова, м⁴; E – модуль Юнга, Па; $k = 0,85$ – опытный поправочный коэффициент, $\alpha_0 = 4,73$ – корень частотного уравнения $\cos(\alpha) \cdot \operatorname{ch}(\alpha) = 1$.

В общем случае дифференциальное уравнение изгибных колебаний балки представляется в форме [14]:

$$\frac{d^4 v}{dx^4} - \beta^4 v = 0, \quad (2)$$

где v – функция амплитуды прогиба; β – постоянная.

Общее решение уравнения (2):

$$v(x) = A \cdot S(\beta x) + B \cdot T(\beta x) + C \cdot U(\beta x) + D \cdot V(\beta x), \quad (3)$$

где A, B, C, D – постоянные, определяемые граничными условиями, а S, T, U и V – комбинации круговых и гиперболических функций:

$$\begin{cases} S(\beta x) = 0,5(\operatorname{ch}(\beta x) + \cos(\beta x)) \\ T(\beta x) = 0,5(\operatorname{sh}(\beta x) + \sin(\beta x)) \\ U(\beta x) = 0,5(\operatorname{ch}(\beta x) - \cos(\beta x)) \\ V(\beta x) = 0,5(\operatorname{sh}(\beta x) - \sin(\beta x)) \end{cases} \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует:

$$v'(0) = \beta B, \quad v'''(0) = \beta^3 D.$$

Для упрощения расчетов из-за симметрии балки может быть рассмотрена ее половина. Граничные условия в начале координат, предполагающие отсутствие поперечной силы и угла поворота в сечении плоскости симметрии: $v'(0) = v'''(0) = 0$ (рис. 1).

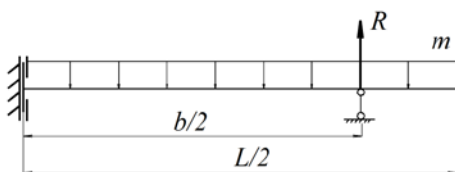


Рис. 1. Эквивалентная балка для половины кузова

Уравнение прогибов для балки, состоящее из двух компонентов на первом участке и из трех – на втором, для удовлетворения условий неразрывности на границе участков:

$$v(x) = A \cdot S(\beta x) + C \cdot U(\beta x) \Big|_{\text{II}} + H \cdot V \left(\beta \left(x - \frac{b}{2} \right) \right) \Big|_{\text{II}},$$

$$\text{где } H = \frac{R}{\beta^3 EI}.$$

Подставляя остальные граничные условия для балки $v(b/2) = v'''(L/2) = v''(L/2)$, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot S\left(\beta \frac{b}{2}\right) + C \cdot U\left(\beta \frac{b}{2}\right) = 0 \\ A \cdot U\left(\beta \frac{L}{2}\right) + C \cdot S\left(\beta \frac{L}{2}\right) + H \cdot T\left(\beta \frac{L-b}{2}\right) = 0 \\ A \cdot T\left(\beta \frac{L}{2}\right) + C \cdot V\left(\beta \frac{L}{2}\right) + H \cdot S\left(\beta \frac{L-b}{2}\right) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Вводя обозначения } z = \frac{\beta L}{2}, \quad q = \frac{b}{L}$$

(относительная длина базы) и приравняв нулю определитель системы (5), получим уравнение частот:

$$\det(z, q) = \begin{vmatrix} S(zq) & U(zq) & 0 \\ U(z) & S(z) & T(z(1-q)) \\ T(z) & V(z) & S(z(1-q)) \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Последовательно задавая значениями q , в программе MathCAD определяются корни уравнения (6). Проверено условие, соответствующее однопролетной балке без консолей: $\lim_{q \rightarrow 1} 2z = \pi$.

Для упрощения расчетов была подобрана линейная аппроксимация:

$$\alpha = \beta L = 7,424 - 4,4b/L. \quad (7)$$

Зависимость (7) позволяет получить корни частотного уравнения с точностью до 0,15 % при наиболее распространенных относительных базах кузовов пассажирских вагонов и вагонов моторвагонного подвижного состава (0,68–0,77).

Коэффициент увеличения частоты изгибных колебаний кузова на податливых опорах, равный отношению частоты колебаний безопорной балки и балки на жестких опорах:

$$\chi = (\alpha_0/\alpha)^2 = (1,57 - 0,93b/L)^{-2}, \quad (8)$$

где $b/L = 0,68\text{--}0,77$.

Как видно из рис. 2, влияние податливости опор балки постоянного сечения составляет от 13 до 37 % в зависимости

от относительной длины пролета балки (базы вагона).

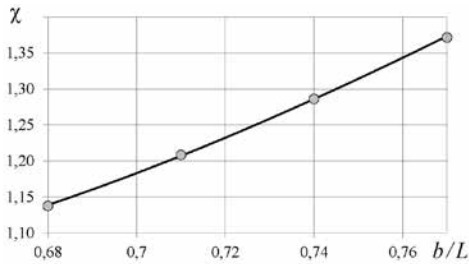


Рис. 2. Зависимость коэффициента увеличения частоты χ от относительной длины базы маркера – точные значения из решения (6), сплошная линия – аппроксимация (8)

Конечно-элементный расчет коэффициента увеличения частоты кузовов вагонов электропоездов

Кузов вагона электропоезда обычно представляет собой полумонокк – замкнутую оболочку с вырезами, усиленную продольными стрингерами и поперечными шпангоутами. Деформирование конструкции кузова и балки постоянного сечения с эквивалентной жесткостью поперечного сечения кузова различно. Отличия определяются в первую очередь расположением оконных и дверных проемов, влияющих на совместность деформаций рамы и крыши, а также искажением контуров поперечных сечений кузова и неравномерностью жесткостных характеристик по длине [15]. Преобладание нагрузки на раму также приводит к неоднородности деформации кузова.

Для оценки влияния податливости опор на собственную частоту изгибных колебаний кузовов вагонов электропоездов используются их конечно-элементные модели, содержащие четырехузловые элементы тонкой оболочки и массовые элементы. Средний размер конечных элементов – 50 мм, так как при его увеличении значения собственных частот изменяются более чем на 1 %. Свариваемые элементы несущей конструкции кузова модели-

руются жестко соединенными между собой.

Деформирование всех конструкций предполагалось линейно-упругим с постоянными упругими константами материала – модулем Юнга, равным $2,1 \cdot 10^5$ МПа, и коэффициентом Пуассона, равным 0,3.

Расчет значений собственных частот изгибных колебаний кузова в вертикальной продольной плоскости выполняется с помощью модального анализа. Для нахождения собственных частот в заданном диапазоне используется блочный метод Ланцоша.

Влияние податливости опор оценивалось на примере кузовов моторных (МВ) и немоторных (НВ) вагонов электропоезда ЭТ4А и трех вариантов кузовов моторных и немоторных вагонов проектируемого электропоезда (ПЭ) (рис. 3). В рассматриваемых кузовах используется классическая конструктивная схема рамы с обвязкой замкнутого профиля, связанной поперечными швеллерами. Консоли рамы содержат массивные шкворневые балки, соединенные с обвязкой раскосами, и укороченные хребтовые балки.

Нагрузки от собственного веса кузова, пассажиров, внутренних и внешних конструкций прикладываются с помощью изменения плотности элементов кузова согласно конструкторской документации. Расчет выполняется в состоянии брутто – при максимальной нагрузке от пассажиров (с учетом веса сидящих пассажиров и стоящих исходя из нормативной плотности 7 человек на 1 м^2 площади пола, свободной от ног сидящих пассажиров [6]).

На примере кузова МВ1 массой брутто 62 700 кг исследовалось влияние жесткости опор кузова на собственные частоты изгибных колебаний и подпрыгивания кузова. Для этого кузов устанавливался на четыре пружины одинаковой вертикальной жесткости (остальные жесткости не рассматривались). Зависимости значений частот подпрыгивания и частот изгибных колебаний от жесткости опор приведены на рис. 4.

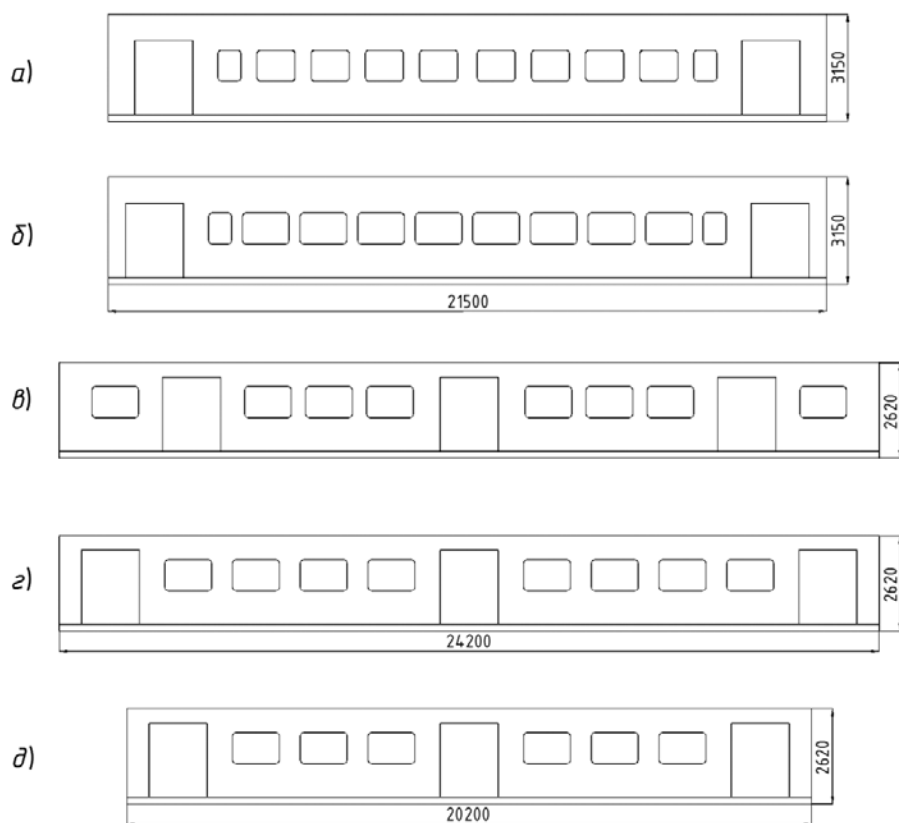


Рис. 3. Расчетные варианты кузовов (вид сбоку)
 а – МВ и НВ (ЭТ4А); б – МВ1 и НВ1 (ПЭ); в – МВ2 и НВ2 (ПЭ); г – МВ3 и НВ3 (ПЭ);
 д – МВ4 и НВ4 (ПЭ)

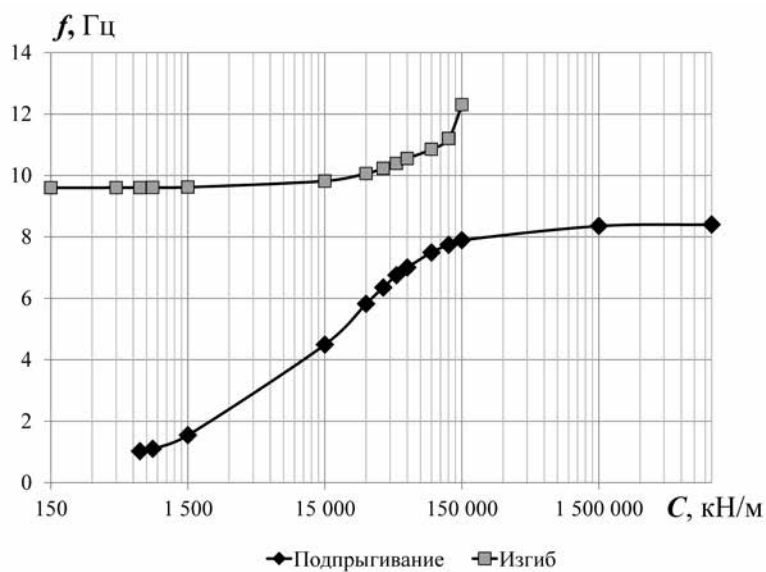


Рис. 4. Зависимость значений собственных частот от жесткости опор

Наибольшее значение для динамических качеств кузова имеет первая частота изгибных колебаний. Изгиб кузова может происходить как в случае изгибных колебаний, так и при колебаниях подпрыгивания. Однако при малой жесткости опор (до 1500 кН/м) амплитуды изгибных колебаний при подпрыгивании гораздо меньше амплитуд колебаний кузова как жесткого тела и амплитуд изгибных колебаний на более высокой первой собственной частоте. С ростом жесткости опор амплитуды колебаний кузова при подпрыгивании увеличиваются, форма колебаний подпрыгивания постепенно переходит в изгибную форму и при жесткостях опор свыше 1500 МН/м эквивалентна форме колебаний кузова на абсолютно жестких опорах.

Значение частоты собственных изгибных колебаний не меняется в диапазоне жесткости опор до 1500 кН/м, что соответствует суммарному прогибу рессорного подвешивания более 50 мм. Поэтому при любых действительных значениях жесткости опор кузова на тележки и различных комбинациях жесткостей двух ступеней рессорного подвешивания изгибные колебания кузова с высокой степенью точности можно рассматривать в безопорном состоянии [11].

Коэффициент увеличения частоты рассчитан для кузовов различной длины и базы (таблица; в скобках указаны

результаты натурного эксперимента для кузовов ЭТ4А).

Расхождение опытных и расчетных значений частоты не превышает 3 %, что свидетельствует об адекватности моделей. В случае жестких опор задавались ограничения вертикальных перемещений в четырех точках опирания кузова на тележки.

Увеличение частоты собственных изгибных колебаний из-за податливости опор составляет от 9 до 30 % для рассматриваемых кузовов и зависит от конструкции кузова, его размеров, массы брутто и характера ее распределения по кузову.

С увеличением массы брутто кузова на 25 % при сохранении его конструктивной схемы влияние податливости опор на частоту уменьшается на 15–20 %. Увеличение длины базы на 31 % при одинаковой погонной массе брутто приводит к большему повышению частоты (примерно на 60 %) из-за податливости опор.

Варианты исполнения кузовов МВ2 и НВ2 отличаются большей сдвиговой податливостью боковых стен и большим (на 17–26 %) влиянием податливости опор в сравнении с исполнениями МВ3 и НВ3.

Увеличение частоты, полученное для балки постоянного сечения, может примерно в два раза отличаться от действительного влияния податливости опор кузова.

Оценка влияния податливости опор

Электропоезд	Вагон	Масса брутто кузова, кг	База/длина кузова	Частота, Гц		χ	χ для балки
				без опор	жесткие опоры		
ЭТ4А	МВ	58780	15/21,5 = 0,7	8,86 (8,6)	8,01	1,11	1,18
	НВ	54580		9,1 (8,8)	8,38	1,09	
ПЭ	МВ1	62700	15/21,5 = 0,7	9,6	8,4	1,14	
	НВ1	53000		9,2	8,05	1,14	
	МВ2	67000		5,94	4,79	1,24	
	НВ2	53000		6,58	5,14	1,28	
	МВ3	67000	17/24,2 = 0,7	6,15	5,15	1,19	
	НВ3	53000		6,77	5,47	1,24	
	МВ4	56300	13/20,2 = 0,64	7,13	6,36	1,12	1,07
	НВ4	44100		7,75	6,66	1,16	

Колебания подпрыгивания кузова на податливых опорах переходят в изгибные колебания при постепенном увеличении жесткости опор.

Для расчета частот собственных изгибных колебаний кузовов пассажирских вагонов электропоездов на любых упругих опорах достаточно рассматривать безопорное состояние кузова.

Влияние податливости опор на первую собственную частоту для вагонов электропоездов классической

конструкции составляет от 9 до 30 %. Большее влияние характерно для вагонов меньшей массы, с большей относительной длиной базы, с большей сдвиговой податливостью боковых стен.

По результатам расчетов определение влияния податливости опор следует выполнять на основании конечно-элементного моделирования, так как балочная аналогия позволяет только качественно оценить влияние относительной длины базы. ■

Литература

1. Sugahara Y., Takigami T., Sampei M. Suppressing vertical vibration in railway vehicles through primary suspension damping force control // *Journal of System Design and Dynamics*. 2007. V. 1. № 2. Pp. 224–235. ISSN 1881-3046.
2. Vibration reduction analysis of the dynamic vibration absorber on the flexible carbody of railway vehicles / J.S. Zhou [et al.] // *J China Railw Sci*. 2009. V. 30. № 3. Pp. 86–90. ISSN 1001-4632.
3. Tomioka T., Takigami T. Experimental and numerical study on the effect due to passengers on flexural vibrations in railway vehicle carbodies // *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2017. V. 55. № 7. Pp. 995–1011. ISSN 1450-5304.
4. EN 12299:2009. CEN. Railway applications. Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation. European Committee for Standardization. Brussels, 2009. P. 66.
5. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. М., 1997. 143 с.
6. ГОСТ 33796–2016. Моторвагонный подвижной состав. Требования к прочности и динамическим качествам. М., 2016. 35 с.
7. Effect of train carbody's parameters on vertical bending stiffness performance / Y. Guangwu [et al.] // *Chin. J. Mech. Eng*. 2016. V. 29. № 6. Pp. 1120–1127. ISSN 1000-9345.
8. Luo G., Zeng J., Wang Q. Identifying the relationship between suspension parameters of underframe equipment and carbody modal frequency // *J. Mod. Transport*. 2014. V. 22. № 4. Pp. 206–213. ISSN 2095-087X.
9. Гучинский Р.В. Влияние жесткости оборудования на собственную частоту изгибных колебаний кузова вагона электропоезда // *Вестник ВНИИЖТ*. 2018. Т. 77. № 4. С. 251–255. ISSN 2223-9731.
10. Kim J.-S., Jeong J.-C. Natural frequency evaluation of a composite train carbody with length of 23 m // *Composites Science and Technology*. 2006. V. 66. Pp. 2272–2283. ISSN 0266-3538.
11. Мейстер В.М. Исследование вибрации пассажирских вагонов : автореф. дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Л. : ЛИИЖТ, 1967. 17 с.
12. ГОСТ 34093–2017. Вагоны пассажирские локомотивной тяги. М., 2017. 41 с.
13. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М., 1983. 260 с.
14. Расчеты на прочность в машиностроении / Пономарев С.Д. [и др.]. – М. : Машгиз, 1959. Т. 3. 1119 с.
15. Гучинский Р.В., Петин С.В. Предварительный расчет частоты собственных изгибных колебаний кузовов вагонов электропоездов // *Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог*. 2019. № 2 (46). С. 50–57. ISSN 1998-9318.

Literature

1. Sugahara Y., Takigami T., Sampei M. Suppressing vertical vibration in railway vehicles through primary suspension damping force control // *Journal of System Design and Dynamics*. 2007. V. 1. № 2. Pp. 224–235. ISSN 1881-3046.

2. Vibration reduction analysis of the dynamic vibration absorber on the flexible carbody of railway vehicles / J.S. Zhou [et al.] // J China Railw Sci. 2009. V. 30. № 3. Pp. 86–90. ISSN 1001-4632.
3. Tomioka T., Takigami T. Experimental and numerical study on the effect due to passengers on flexural vibrations in railway vehicle carbodies // International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 2017. V. 55. № 7. Pp. 995–1011. ISSN 1450-5304.
4. EN 12299:2009. CEN. Railway applications. Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation. European Committee for Standardization. Brussels, 2009. P. 66.
5. Norms for calculations and evaluation of bearing elements strength and dynamic properties of 1520 mm gauge RF Ministry of Railway Transport rolling stock motor-wagon locomotive underframe. [Normy dlya rascheta i ochenki prochnosti nesushhih elementov i dinamicheskikh kachestv ekipazhnoj chasti motor-vagonnogo podvizhnogo sostava zhe-leznyh dorog MPS RF kolei 1520 mm] M., 1997. 143 p.
6. GOST 33796–2016. Motor-wagon rolling stock. Requirements to strength and dynamic properties. [GOST 33796–2016. Motor-vagonnyj podvizhnoj sostav. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam.] M., 2016. 35 p.
7. Effect of train carbody's parameters on vertical bending stiffness performance / Y. Guangwu [et al.] // Chin. J. Mech. Eng. 2016. V. 29. № 6. Pp. 1120–1127. ISSN 1000-9345.
8. Luo G., Zeng J., Wang Q. Identifying the relationship between suspension parameters of underframe equipment and carbody modal frequency // J. Mod. Transport. 2014. V. 22. № 4. Pp. 206–213. ISSN 2095-087X.
9. Guchinsky. Influence of equipment rigidity on inherent frequency of electric train wagon body bending vibrations // Herald of VNIIZhT. [Vliyanie zhestkosti oborudovaniya na sobstvennyuyu chastotu izgibnyh kolebanij kuzova vagona elektropoezda // Vestnik VNIIZhT] 2018. V. 77. № 4. P. 251–255. ISSN 2223-9731.
10. Kim J.-S., Jeong J.-C. Natural frequency evaluation of a composite train carbody with length of 23 m // Composites Science and Technology. 2006. V. 66. Pp. 2272–2283. ISSN 0266-3538.
11. Meister V.M. Investigation of passenger carriage vibration [Issledovanie vibracii passazhirskih vagonov]: extended abstract of dissertation... Cand. of tech. science. – L. : LIRTE, 1967. 17 p.
12. GOST 34093-2017. Locomotive traction passenger carriages. [Vagony passazhirskie lokomotivnoj tyagi] M., 2017. 41 p.
13. Norms for calculation and designing of MRT (Ministry of Railway Transport) 1520 mm gauge (non-self-propelled) railway wagons. [Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznyh dorog MPS ko-lei 1520 mm (nesamohodnyh).] M., 1983. 260 p.
14. Strength calculations in mechanical engineering [Raschety na prochnost' v mashinostroenii] / Ponomaryov S.D. [et al.]. – M. : Mashgiz, 1959. V.3. 1119 p.
15. Guchinsky R.V., S.V. Preliminary calculation of frequency of electric train wagon body inherent bending vibrations // Herald of Institute for problems of natural monopolies: railway machinery. [Predvaritel'nyj raschet chastoty sobstvennyh izgibnyh kolebanij kuzovov vagonov elektropoezdov // Vestnik instituta problem estestvennyh monopolij: tekhnika zheleznyh dorog] 2019. № 2 (46). Pp. 50–57. ISSN 1998-9318.

Статья сдана в редакцию 28 марта 2019 года
0,54 а. л.

УДК 621.43.001.53

*А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, Д. Б. Власов,
А. Г. Карпенко, В. В. Руднев*

Исследование эксплуатационных параметров электрических бензиновых насосов с разной степенью износа

UDC 621.43.001.53

*A. M. Plaksin, A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, D. B. Vlasov,
A. G. Karpenko, V. V. Rudnev*

Investigation of working parameters of electric fuel pumps with different deterioration rate

Аннотация

Представлены экспериментальные исследования влияния степени загрязнения элементов системы топливоподачи на величину

перепада давления топлива на них ΔP , кПа, износа рабочих элементов электрического бензинового насоса i , усл. ед. и на его параметры работы (потребляемая мощность

N , Вт, обороты ротора $n_{р.н}$, мин⁻¹, подача Q , л/ч, сила тока потребления I , А, рабочая температура T , °С и т.д.). Поскольку топливо движется по топливопроводу и прохо-

Статья рекомендована к публикации Машрабовым Нематуллой, д-ром техн. наук, доцентом Южно-Уральского государственного аграрного университета. E-mail: nmashrabov@eandex.ru.

Алексей Михайлович Плаксин, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ»; Россия, Челябинск. E-mail: plaksin-am@mail.ru.

Александр Владимирович Гриценко, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Автомобильный транспорт» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Россия, Челябинск. E-mail: alexgrits13@mail.ru.

Константин Вячеславович Глемба, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автомобильный транспорт» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Россия, Челябинск. E-mail: glemba77@mail.ru.

Дмитрий Борисович Власов, ассистент; кафедра «Технология и организация технического сервиса» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Россия, Челябинск. E-mail: dimon.vlasoff2012@yandex.ru.

Валерий Валентинович Руднев, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автомобильный транспорт, информационные технологии и методика обучения техническим дисциплинам», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет (ЧГПУ)»; Россия, Челябинск. E-mail: rudnev@mail.ru.

The article is recommended for publishing by Mashrabov Nematulla, Doctor of tech.science, Associate Professor, Southern Ural state agrarian university. E-mail: nmashrabov@eandex.ru.

Alexey Mikhailovich Plaksin, Doctor of tech.science, Professor, Operation of Machine and Tractor Fleet Department, Southern Ural SAU; Russia, Chelyabinsk. E-mail: plaksin-am@mail.ru.

Alexander Vladimirovich Gritsenko, Doctor of tech.science, Professor, Automobile Transport Department, Southern Ural state university; Professor of Operation of Machine and Tractor Fleet Department, Southern Ural state agrarian university; Russia, Chelyabinsk. E-mail: alexgrits13@mail.ru.

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, Cand.of tech.science, Associate Professor of Automobile Transport Department, Southern Ural state university; Associate Professor of Operation of Machine and Tractor Fleet, Southern Ural state agrarian university; Russia, Chelyabinsk. E-mail: glemba77@mail.ru.

Dmitry Borisovich Vlasov, Assistant of the Technology and Organization of Technical Service, Southern Ural state agrarian university; Russia, Chelyabinsk. E-mail: dimon.vlasoff2012@yandex.ru.

Anatoly Grigorievich Karpenko, Cand.of tech. science, Associate Professor of Automobile Transport, Information Technology and Methods of Teaching Technical Disciplines, Southern Ural state humanitarian and pedagogical university; Russia, Chelyabinsk. E-mail: angr123@list.ru

Valery Valentinovich Rudnev, Cand.of tech.science, Associate Professor of Automobile Transport, Information Technology and Methods of Teaching Technical Disciplines, Southern Ural state humanitarian and pedagogical university; Russia, Chelyabinsk. E-mail: rudnev@mail.ru.

дит через ряд элементов в топливной системе – фильтр грубой очистки (ФГО), электрический бензиновый насос (ЭБН), фильтр тонкой очистки (ФТО), топливную рампу с форсунками и регулятором давления, то для дифференцированного исследования каждого участка решено процесс топливоподачи упростить и разбить на три участка: 1) участок всасывания топлива из бака через фильтр грубой очистки и его движение до полости всасывания ЭБН; 2) участок движения топлива от нагнетающей полости ЭБН до фильтра тонкой очистки; 3) завершающий участок нагнетания топлива от фильтра тонкой очистки до топливной рампы с форсунками и регулятором давления. В результате исследования первого участка представлены зависимости перепада давления ΔP , кПа, подачи топлива Q , л/ч, от степени загрязнения фильтра грубой очистки, %, а также влияние этого загрязнения на частоту вращения ротора электрического бензинового насоса $n_{p,н}$, мин⁻¹. В ходе исследования второго участка представлены зависимости влияния степени износа нагнетающих роликов в бензиновом насосе i , усл. ед., на величину утечек в корпусе насоса Q_y , л/ч, подачу Q_n , л/ч, КПД η , мощность N , Вт, развиваемое давление P , кПа, и т.д. В ходе исследования третьего участка – зависимость подачи топлива форсунками $Q_{ф}$, л/ч, а также содержание токсических веществ CO, %, CH, млн частиц, при сгора-

нии топлива с работой двигателя на неисправном бензиновом насосе и т.д. В завершающей части работы проведены исследования влияния уменьшения площади проходного сечения топливопровода S_p , мм², увеличения площади зазоров S_z , мм², на мощность гидравлических потерь электрического бензинового насоса $N_{гид}$, Вт.

Ключевые слова: топливная система, засоренность, гидравлическое сопротивление, электрический бензиновый насос, износ, утечки, топливоподача, перепад давления.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-12-25

Annotation

The article shows experimental studies of fuel-handling system contamination impact extent on the fuel pressure overfall value ΔP , кПа, electric fuel pump working elements deterioration i , and on its working parameters (input power N , Вт, rotor speed $n_{p,н}$, min⁻¹, displacement Q , l/h, input current intensity I , А, working temperature T , °C etc.). In light of the fact that the fuel flows along the tube and goes through a number of elements in the fuel system – a coarse-mesh filter (CMF), electric fuel pump (EFP), a fine mesh filter (FMF), a fuel rail with nozzles and a pressure regulator, in order to investigate each section differentially, we decided to simplify the fuel input process and to split it into three sections: 1) fuel induction from the tank via the coarse-mesh filter and its

flow towards EFP induction enclosure; 2) a section of fuel flow from EFP pressurizing enclosure towards the fine mesh filter; 3) a terminational section of fuel pressurizing from a fine mesh filter towards a fuel rail with nozzles and a pressure regulator. The results of the investigation of the first section demonstrate dependences of pressure overfall ΔP , кПа, fuel induction Q , l/h, on the coarse-mesh filter contamination rate, %, as well as the impact of this contamination on the electric fuel pump rotor speed rate $n_{p,н}$, min⁻¹. After investigation of the second section dependences of the electric fuel pump pressurizing rollers deterioration extent i , on the pump body leaks value Q_y , l/h, performance coefficient η , input power N , Вт, a developed pressure P , кПа, etc., are demonstrated. As a part of the study of the third section – dependence of fuel flow input by nozzles $Q_{ф}$, l/h, as well as the content of toxic agents CO, %, CH, mln particles, in fuel combustion if the fuel pump is out of order etc. In the finalizing part of work we conducted the studies of influence of the fuel tube throat area decrease S_p , мм², increase of clearance area S_z , мм², on electric fuel pump hydraulic losses $N_{гид}$, Вт.

Key words: fuel system, impurity, hydraulic resistance, electric fuel pump, deterioration, leaks, fuel induction, pressure overfall.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-12-25

В топливной системе двигателя из-за загрязнения топливопроводов или образования воды в топливном баке возникают две основные неис-

правности: засоренность, при которой затруднено движение топлива в рампу к форсункам, и износ насосной части (роликов и корпуса насоса), из-за чего

увеличиваются утечки топлива в корпусе насоса. По конструкции очень часто встречаются электрические бензиновые насосы (ЭБН) роликового объемного типа (до 80 %). Как показали исследования, с увеличением засоренности элементов топливной системы мощность, затрачиваемая на гидравлические потери, возрастает, т.е. ротор ЭБН вращается под большей нагрузкой, преодолевая сопротивление. С увеличением износа насоса повышаются утечки топлива, а мощность гидравлических потерь снижается, т.е. ротор вращается с меньшей нагрузкой, топливо перепускается обратно во впускную полость насоса через зазоры неплотностей. Для бензиновых двигателей необходимы более эффективные методы диагностирования ЭБН системы топливоподачи.

Необходимо повысить работоспособность и безотказность функционирования ЭБН двигателей внутреннего сгорания за счет выявления скрытых отказов, тестовым диагностированием выявить причины ухудшения состояния элементов системы топливоподачи (СТ), которые приводят к выходу из строя ЭБН, определить взаимосвязи и закономерности изменения параметров работы ЭБН.

В ходе исследования первого участка (всасывание топлива из бака через

фильтр грубой очистки и движению его к полости всасывания электрического бензинового насоса) исследована зависимость (рис. 1) изменения расхода топлива Q (л/ч) от коэффициента засорения сетки топливного фильтра грубой очистки (%), где наблюдается снижение показателя Q при его прохождении через фильтр грубой очистки при существенной засоренности топливной сетки. В практике безаварийной работы ДВС [1] необходимо, чтобы расход топлива всегда находился на участке (L) выше точки N (расход топлива более $Q = 95$ л/ч). Снижение расхода топлива в области участков (S) и (M) недопустимо, т.к. это приведет к аварийному износу насосной части ЭБН.

В ходе дальнейшего исследования первого участка было рассмотрено (рис. 2) влияние увеличения степени засорения сетки топливного фильтра (%) на частоту вращения ротора бензинового насоса $n_{р.н}$ (мин⁻¹), где можно выделить три характерных участка: A , B и C . На участке A частота вращения ротора насоса (2750–3750 мин⁻¹) характеризуется хорошей подачей топлива насосом. Участок B характеризуется снижением частоты вращения ротора насоса с 2700 до 500 мин⁻¹ при степени засорения сетки фильтра грубой очистки

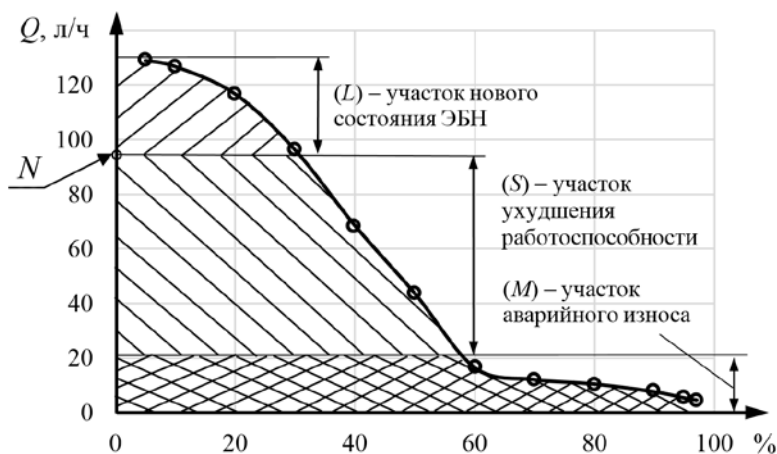


Рис. 1. Зависимость изменения расхода топлива Q , л/ч, через фильтр грубой очистки электрическим топливным насосом от степени засоренности сетки, %

(ФГО) от 30 до 62 %. Участок *C* характеризуется очень низким значением частоты вращения ротора ЭБН (от 0 до 500 мин⁻¹), что говорит о критических условиях работы СТ уже при запуске двигателя. На этом участке формируются неблагоприятные условия для работы ЭБН и всей СТ, при которых двигатель постоянно работает в предаварийном режиме: неустойчивая работа двигателя [2–4], перебои, тяжелый разгон, слабая реакция на педаль акселератора, провалы при движении [5, 6].

Загрязнение сетки ФГО на первом участке ведет к перепаду давления

ΔP . Рассмотрим (рис. 3), как изменяется давление P (кПа) в системе топливоподдачи от частоты вращения ротора насоса $n_{p.n}$ (мин⁻¹) при различной степени засоренности сетки топливного фильтра (%). Выделяются две области: участок работоспособности ЭБН с давлением от 300 кПа и выше; участок невыполнения ЭБН своих функциональных свойств – давление ниже 300 кПа [7–9]. Снижение частоты вращения ротора насоса обусловлено степенью засорения сетки топливного фильтра [10, 11]; чем большая степень засорения, тем меньше обороты ротора [12, 13].

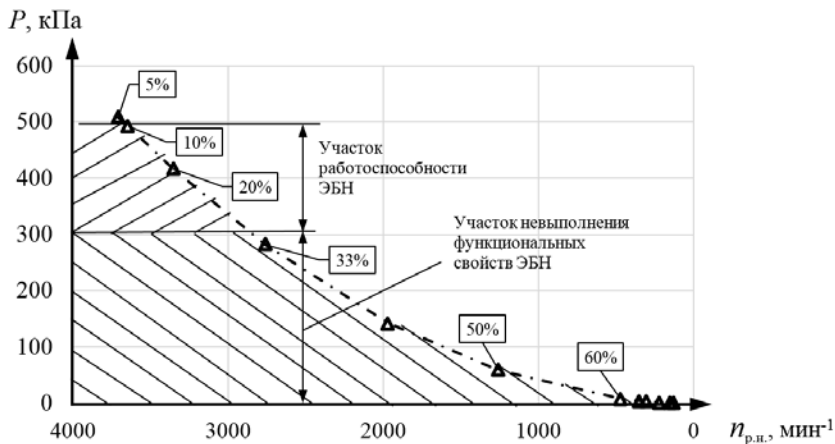


Рис. 3. Зависимость изменения величины давления P (кПа) от частоты вращения ротора топливного насоса $n_{p.n}$ (мин⁻¹) для различных значений степени засоренности сетки ФГО: 5, 10...60 %

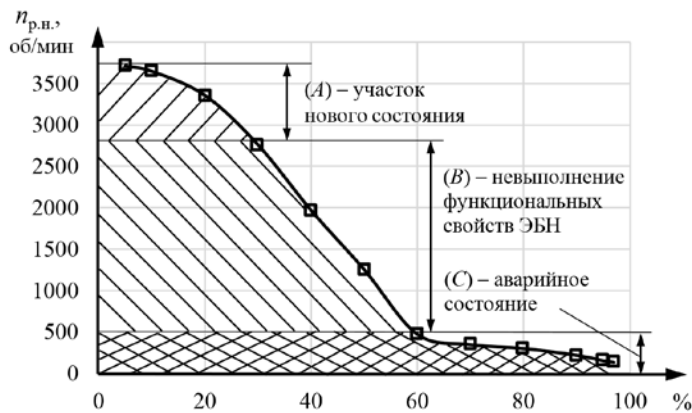


Рис. 2. Зависимость частоты вращения ротора $n_{p.n}$ (мин⁻¹) при различной степени засоренности сетки ФГО, %

При рассмотрении второго участка – движение топлива от нагнетающей полости ЭБН до фильтра тонкой очистки – представлены зависимости (рис. 4) реальной подачи Q_n и утечек Q_y от степени износа насосной части ЭБН i (усл. ед.). Видно, что по мере увеличения степени износа у ЭБН реальная подача снижается, а утечки топлива между его рабочими элементами – корпусом и роликами – увеличиваются.

Исследование второго участка показывает, что из-за ухудшения прохождения топлива через ФТО возрастает сила тока потребления насосом I (А) (рис. 5), что связано с нарастанием сопротивления R (Ом) на обмотке ротора насоса, а, например, при ухудшении прохождения

топлива через ФТО возрастает рабочая температура насоса T (°С), что увеличивает интенсивность износа роликов ЭБН и объем утечек топлива Q_y .

Результаты исследования второго участка показывают (рис. 6), что по мере увеличения наработки двигателя L (тыс. км) изнашивается насосная часть ЭБН, из-за чего падает давление P (кПа) в СТ и снижается показатель КПД η , т.к. увеличиваются утечки Q_y (л/ч) в топливном насосе. Полезная мощность $N_{\text{пол}}$ (Вт) при этом снижается и увеличивается мощность гидравлических и электрических потерь $N_{\text{пот}}$ (Вт).

Также во время фильтрации через ФТО увеличивается гидравлическое

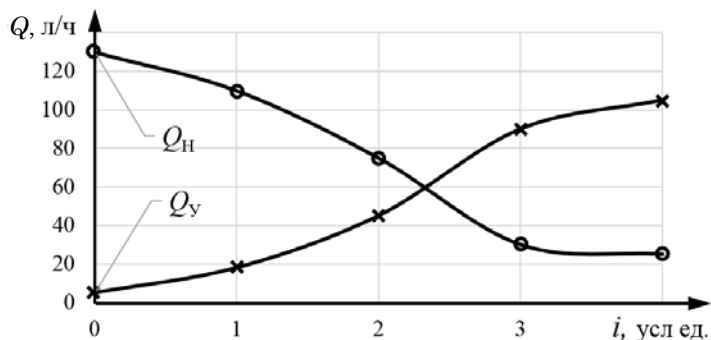


Рис. 4. Зависимость изменения реальной подачи топлива Q_p (л/ч) и объема его утечек Q_y (л/ч) от степени износа i (усл. ед.) насосной части ЭБН

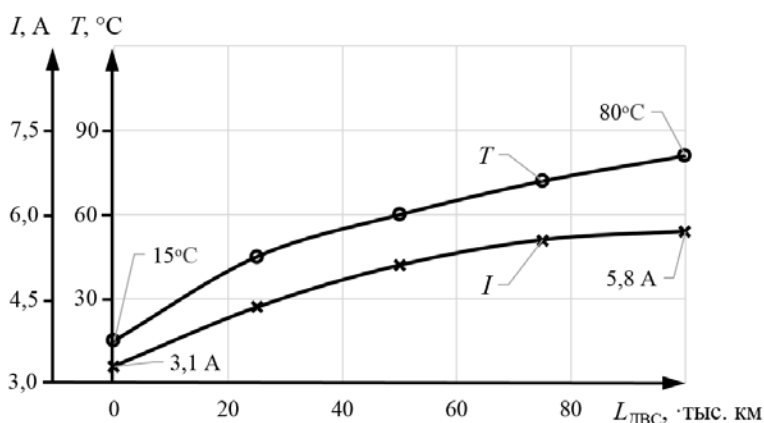


Рис. 5. Зависимость изменения силы тока I (А), температуры T (°С) ЭБН от наработки двигателя L (тыс. км)

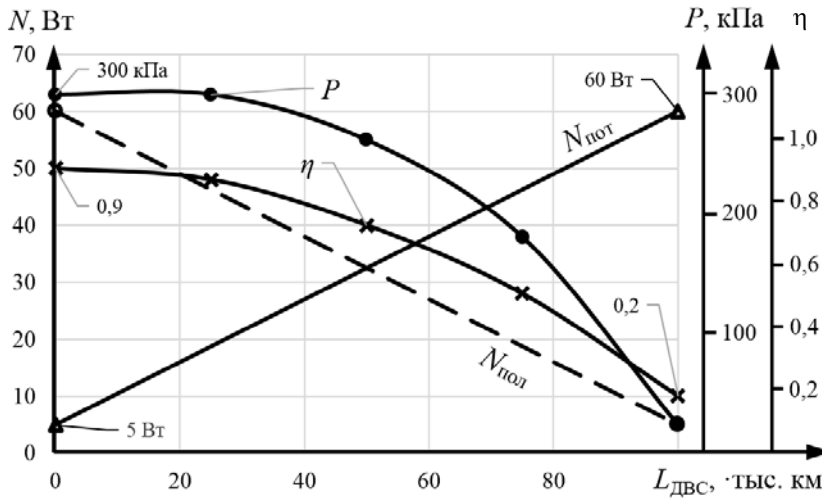


Рис. 6. Зависимости изменения давления P (кПа), показателя КПД η , полезной мощности $N_{\text{пол}}$ (Вт) и мощности потерь $N_{\text{пот}}$ (Вт) по мере увеличения наработки двигателя L (тыс. км)

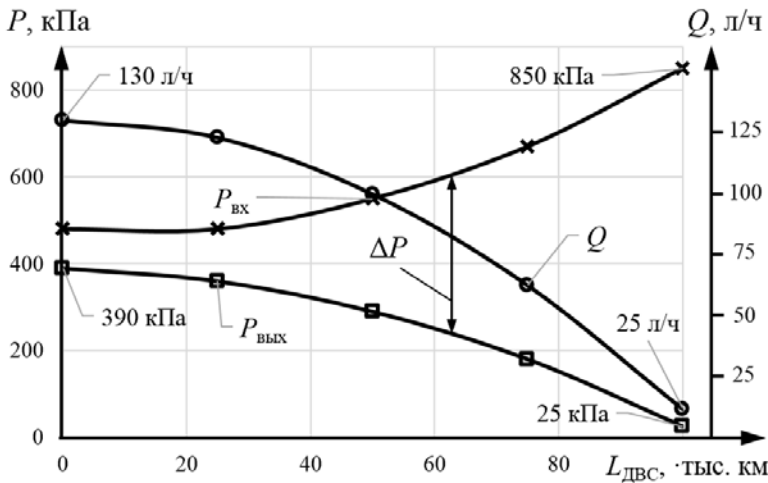


Рис. 7. Зависимость перепада давления ΔP (кПа) на ФТО и изменения объема подачи топлива Q (л/ч) по мере увеличения наработки двигателя L (тыс. км)

сопротивление. Это связано с засорением поровых каналов фильтра, при этом увеличивается сопротивление на входе в фильтр и возрастает давление $P_{\text{вх}}$ (кПа) (рис. 7), а давление $P_{\text{вых}}$ (кПа) на выходе из фильтра снижается. Как следствие, возникает перепад давления ΔP (кПа) и снижается объем подачи топлива Q (л/ч).

Таким образом, определенлся характер реальной подачи топлива изношенным насосом $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ (л/ч) – значительно меньше значений подачи $Q_{\text{н}}^{\text{и}}$ (л/ч) исправным насосом (рис. 8). Можно заметить также ограничение реальной подачи топлива форсунками $Q_{\text{ф}}^{\text{р}}$ (л/ч) из-за неисправности насоса, в связи с чем снижается подача ими топлива $\Delta Q_{\text{ф}}$ (л/ч)

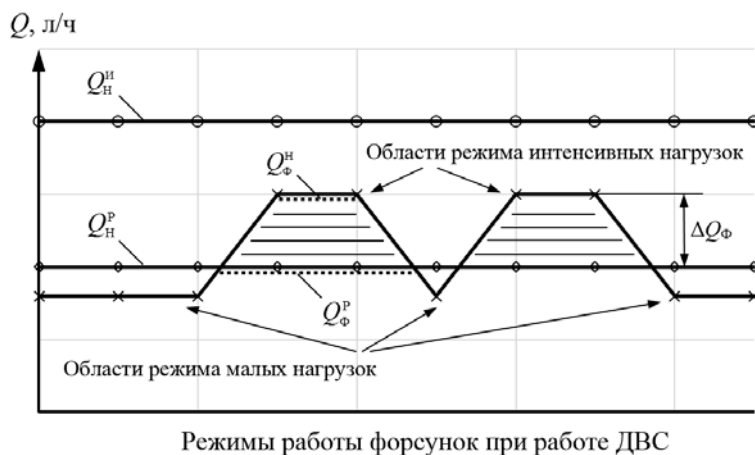


Рис. 8. Характер подачи топлива форсунками во время работы ДВС при исправном и неисправном ЭБН

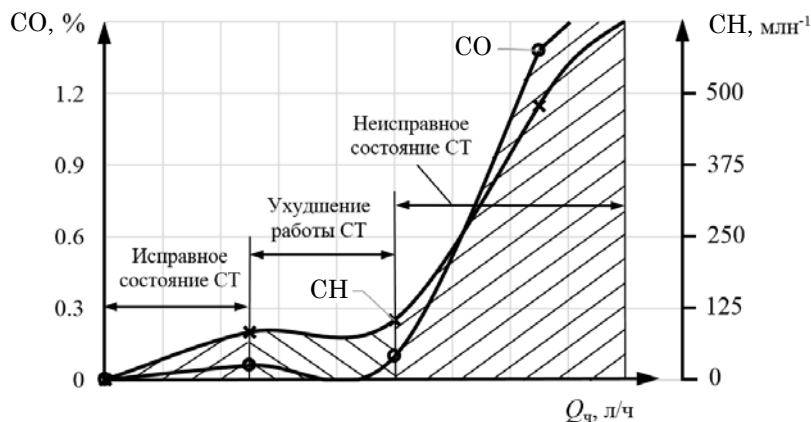


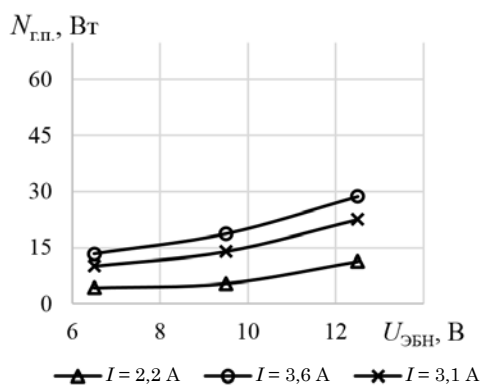
Рис. 9. Зависимость содержания токсичных компонентов в отработавших газах и изменение часового расхода топлива $Q_{\text{ч}}$, л/ч при разном состоянии системы топливоподачи

по сравнению с нормативным значением $Q_{\text{Ф}}^{\text{H}}$ [17–19].

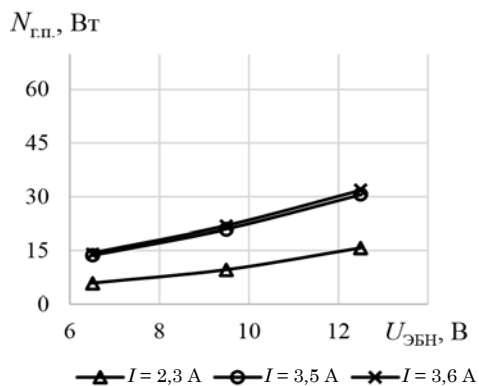
При исследовании завершающего участка движения топлива (рис. 9) видно, что исправное состояние ЭБН со временем переходит в работоспособное, которое характеризуется ухудшением первоначальных показателей токсичности [20–23] и экономичности ДВС [24, 25]. Ухудшение работоспособности заканчивается переходом ДВС в неисправное состояние [26], которому сопутствует резкое повышение параметров

токсичности CO и CH соответственно со значений 0,1 до 1,5 % и со 100 до 600 млн частиц [27–29].

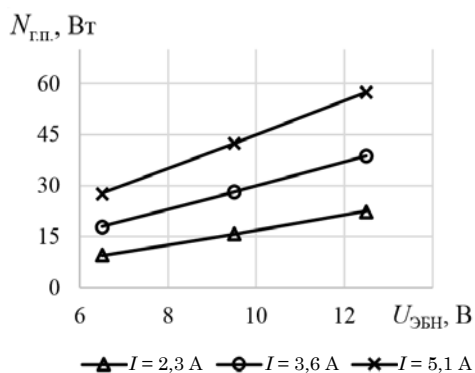
Исследование затрат мощности ЭБН, которая расходуется на преодоление сопротивления в системе топливоподачи (рис. 10), показало, что при уменьшении площади сечения топливопровода $S_{\text{т}}$ (с 38,47 по 0,01539 мм²) мощность $N_{\text{г.п.}}$, затрачиваемая на гидравлические потери, возросла в 2–2,5 раза ($N_{\text{гид}}^3$ варьируется от 11,3–28,8 до 28,71–64,96 Вт) [30, 31].



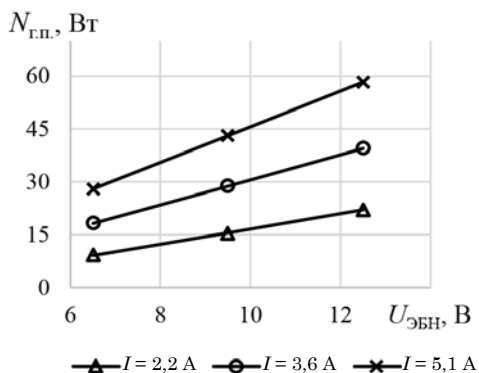
а)



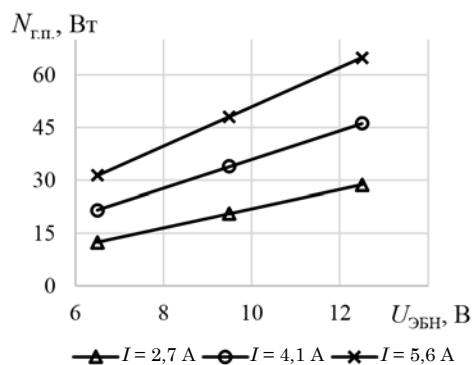
б)



в)



г)



д)

Рис. 10. Зависимость изменения затрат мощности на гидравлические потери $N_{г.п.}$ (Вт) от напряжения питания ЭБН $U_{ЭБН}$ (В) при площади проходного сечения топливопровода S_r (мм^2) и силе тока питания $I_{ЭБН}$ (А)
 а - $S_r = 38.47 \text{ мм}^2$; б - $S_r = 1.13 \text{ мм}^2$; в - $S_r = 0.1963 \text{ мм}^2$; г - $S_r = 0.07065 \text{ мм}^2$;
 д - $S_r = 0.01539 \text{ мм}^2$

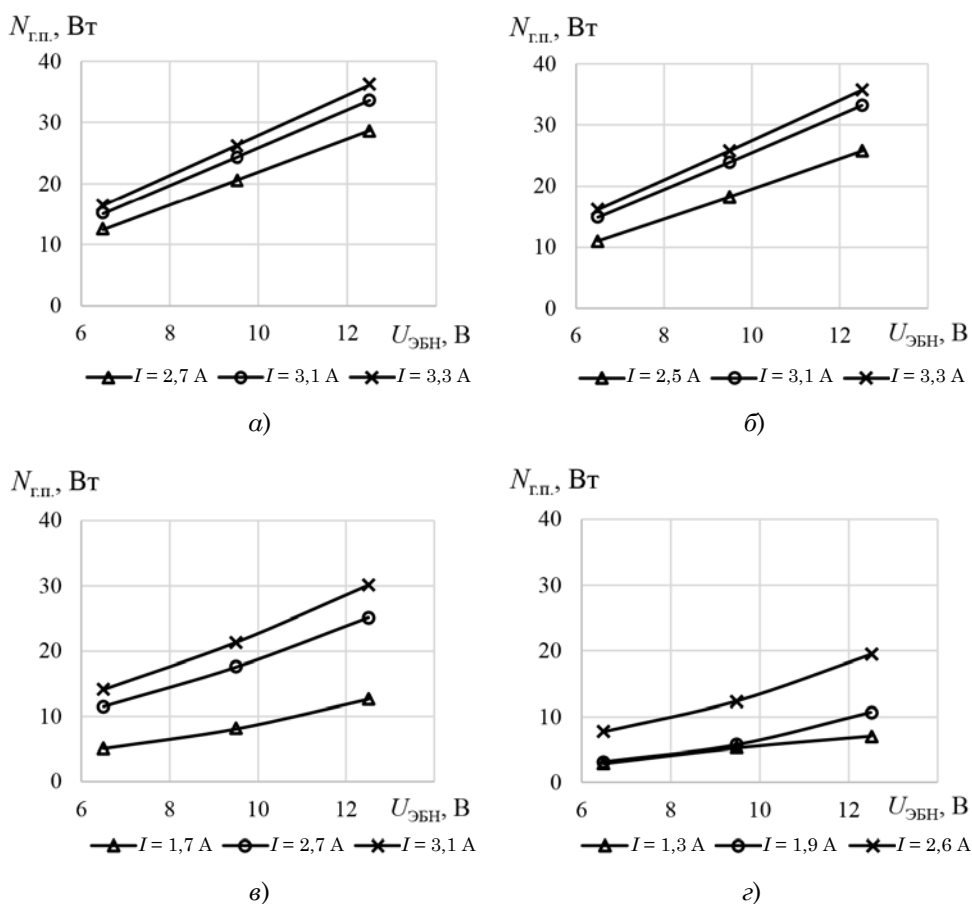


Рис. 11. Зависимость изменения затрат мощности на гидравлические потери $N_{г.п.}$ (Вт) от напряжения питания ЭБН $U_{ЭБН}$ (В) при величине зазоров S_3 (мм²) в ЭБН между корпусом и роликами и силе тока питания $I_{ЭБН}$ (А)

а – $S_3 = 0,01539 \text{ мм}^2$; б – $S_3 = 0,07065 \text{ мм}^2$; в – $S_3 = 0,5024 \text{ мм}^2$; г – $S_3 = 1,13 \text{ мм}^2$

Исследование затрат мощности, которая расходуется на утечки топлива между роликами и корпусом в ЭБН (рис. 11), показало, что при увеличении площади зазоров S_3 (мм²) между корпусом и роликами в ЭБН от 0,01539 до 1,13 мм², мощность $N_{г.п.}$ (Вт), затрачиваемая на гидротопотери, снизилась в два-четыре раза ($N_{г.п.}^y$ варьируется от 28,64–36,14 до 7,07–19,44 Вт) [30, 31].

В результате поэтапного исследования движения жидкости в топливной системе выявлены причины и закономерности снижения параметров давления P (кПа) и подачи топлива Q (л/ч) в СТ, которые зависят от засоренности

топливных фильтров грубой и тонкой очистки, степени износа насосной части ЭБН. Для первого участка всасывания топлива из бака через ФГО до полости всасывания ЭБН представлены результаты исследования, которые показали, что с увеличением степени засорения сетки фильтра от 30 % и выше работа ЭБН ухудшается и может привести к его аварийному состоянию, вплоть до заклинивания насосной части, поскольку увеличивается рабочая температура (до 80 °С и выше), снижаются давление, подача топлива, которая является охлаждающей жидкостью крыльчатки ЭБН. С увеличением

засоренности элементов СТ мощность, затрачиваемая на гидравлические потери, возросла почти в 2,5 раза, что связано с повышением гидравлического сопротивления в СТ, из-за чего ротор ЭБН вращается под нагрузкой, потребляя больше энергии.

Для второго участка исследований – движение топлива от полости нагнетания до ФТО – результаты показали, что с увеличением зазоров между корпусом и насосной частью ЭБН снижается реальная подача насосом, увеличиваются утечки, снижается КПД насоса,

мощность гидравлических потерь снизилась почти в четыре раза, т.к. топливо недостаточно эффективно подхватывается роликами и остается во впускной полости насоса.

Для завершающего участка – движение топлива к рампе с форсунками – исследования показали, что неисправный насос не обеспечивает необходимую подачу топлива в топливную рампу при работе форсунок, приводя к неустойчивой работе двигателя, из-за чего увеличиваются показатели токсичности CO, CH. ■

Литература

1. Плаксин А. М., Гриценко А. В., Запевалов М. В., Костюченков Н. В. Производственный потенциал сельского хозяйства: этапы развития, состояние, проблемы модернизации : учебное пособие. – Челябинск, 2018. 291 с. ISBN 978-5-88156-798-9.
2. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Диагностирование системы топливоподачи ДВС на тестовых режимах / М-лы Междун. науч.-технич. конф. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. С. 9-13. ISBN 978-5-88156-739-2.
3. Гриценко А. В., Глемба К. В. Разработка мероприятий по обеспечению нагрузочных режимов в процессе диагностирования двигателей / М-лы междун. научн.-практич. конф. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. С. 108–114. ISBN 978-5-9961-1339-2.
4. Бакайкин Д. Д. Разработка тестовых приемов диагностирования автомобилей / М-лы Международн. научн.-практич. конф. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2017. С. 19–23. ISBN 978-5-88156-769-9.
5. Плаксин А. М., Гриценко А. В., Глемба К. В., Лукомский К. И., Шепелёв В. Д. Тестовые методы диагностирования систем двигателей внутреннего сгорания автомобилей : монография. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. 210 с. ISBN 978-5-88156-729-3.
6. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // Tribology in Industry, 2018. Т. 40. № 2. Рр. 300–310. ISSN 0354-8996.
7. Гриценко А. В., Власов Д. Б. Определение технического состояния электрических бензонасосов на тестовых режимах его диагностирования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 6 (32). С. 190–196. ISSN 2308-8877.
8. Способ диагностирования электробензонасосов системы топливоподачи автомобиля : пат. на изобретение 2477384 Рос. Федерация. № 2012109956 ; заявл. 14.03.12 ; опубл. 10.03.13, Бюл. № 7.
9. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Исследование режимов работы электрических бензиновых насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления // Вестник УрГУПС. 2016. № 2 (30). С. 47–55. ISSN 2079-0392.
10. Гриценко А. В., Глемба К. В., Власов Д. Б. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 11. С. 50–57. ISSN 2074-9635.
11. Гриценко А. В., Власов Д. Б., Глемба К. В. Исследование изменения параметров работы объемного электрического бензонасоса в режимах имитации сопротивления топливоподачи / М-лы Международн. научн.-технич. конф. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. С. 94–98. ISBN 978-5-9961-1661-8.
12. Гриценко А. В., Лукомский К. И., Власов Д. Б., Глемба К. В. Тестовое диагностирование электрических топливных насосов. АПК России, 2017. Т. 24. № 5. С. 1161–1167. ISSN 2587-8824.

13. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Методика и результаты диагностирования электрических насосов автомобилей / Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. Воронеж : ВГЛУ, 2015. Т. 2. № 2. С. 419–424. ISSN 2409-7829.
14. Гриценко А. В., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Результаты экспериментальных исследований пропускной способности электромагнитных форсунок / Сборник научных трудов под. ред. В.В. Ерофеева: Инжиниринг, инновации, инвестиции. – Челябинск, 2013. С. 59–64. ISBN 978-5-904593-41-4.
15. Гриценко А. В., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Теоретическое исследование процесса топливоподачи электромагнитной форсунки / Сб. научн. тр. / под. ред. В.В. Ерофеева: Инжиниринг, инновации, инвестиции. – Челябинск, 2013. С. 53–58. ISBN 978-5-904593-41-4.
16. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Диагностирование электромагнитных форсунок легковых автомобилей // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2015. Т. 3. № 4-1 (15-1). С. 164–168. ISSN 2308-8877.
17. Бакайкин Д. Д., Куков С. С., Гриценко А. В. Техническое обслуживание элементов системы топливоподачи бензинового двигателя с электронной системой управления // Вестник ЧГАУ, 2006. Т. 47. С. 10–13. ISSN 5-88156-373-5.
18. Гриценко А. В., Куков С. С., Глемба К. В., Бакайкин Д. Д. Диагностирование пропускной способности электромагнитных форсунок / Международн. научн.-практ. конф. «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». – Новокузнецк : КузГТУ, 2013. С. 91–96.
19. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Абросимов Д. А. Диагностирование электромагнитных форсунок ДВС на тестовых режимах // АПК России, 2015. Т. 72. № 1. С. 16–18. ISSN 2587-8824.
20. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Шефер Л. А., Салимоненко Г. Н., Карпенко А. Г., Руднев В. В., Назаров М. В. Контроль экологических параметров автомобиля при имитации различных режимов нагружения ДВС методом создания сопротивления на выпуске // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2018. № 8. С. 85–95. ISSN 2077-7175.
21. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Шефер Л. А., Салимоненко Г. Н., Карпенко А. Г., Руднев В. В. Исследование экологических параметров бензинового ДВС при имитации различных режимов нагружения // Транспорт Урала, 2018. № 3 (58). С. 58–63. ISSN 1815-9400.
22. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Исследование способа повышения экологичности и экономичности автотранспорта на тестовых режимах холостого хода работы двигателя внутреннего сгорания // Транспорт Урала, 2016. № 1 (48). С. 97–102. ISSN 1815-9400.
23. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Экологические аспекты и вопросы диагностирования систем ДВС автотранспорта в рабочем и тестовом режимах / Международн. научн.-практ. конф. «Инновации и исследования в транспортном комплексе». – Курган ; УрО РАТ : Принтэкспресс (Барнаул), 2014. С. 225–231. ISBN 978-5-904064-10-5.
24. Кожанов В. Н., Петелин А. А., Гриценко А. В., Шепелёв В. Д. Снижение токсичности отработавших газов дизельного двигателя путем отключения части его цилиндров // Вестник ЮУрГУ, 2018. – Сер. : Машиностроение. Т. 18. № 2. С. 34–44. ISSN 1990-8504.
25. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vozmilov A. G. Improving the car environmental qualities by studying the engine load characteristics in the modes of injection rate off // Transportation Research Procedia, Vol. 36. 2018. – Pp. 237–244.
26. Глемба К. В., Аверьянов Ю. И., Гриценко А. В. К вопросу повышения надежности элементов системы безопасности дорожного движения / Международн. научн.-практ. конф. «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем» / Уфа, Стерлитамак : ООО «Агентство международных исследований», 2017. С. 19–23. ISBN 978-5-906996-40-4.
27. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment / Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2018. Pp. 2163–2174.
28. Башта Т. М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. М. : Государственное научно-техническое издательство «Оборонгиз», 1961. 475 с.

29. Ерохов В. И. Системы впрыска бензиновых двигателей (конструкция, расчет, диагностика) : учебник для вузов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2011. 552 с. ISBN 978-5-9912-0130-8.
30. Plaksin A., Gritsenko A., Glemba K. Experimental studies of cylinder group state during motoring / *Procedia Engineering* «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016». – 2016. – Vol. 150. Pp. 1188–1191.
31. Gritsenko A., Kukov S., Glemba K. Theoretical Underpinning of Diagnosing the Cylinder Group During Motoring / *Procedia Engineering* «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – Vol. 150. Pp. 1182–1187.

Literature

1. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Zapevalov M., Kostyuchenk N. V. Production possibilities of agriculture: development stages, condition, problems of modernization [Proizvodstvennyy potencial sel'skogo hozyajstva: etapy razvitiya, sostoyanie, problemy modernizacii]: teaching aid. – Chelyabinsk, 2018. 291 p. ISBN 978-5-88156-798-9.
2. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V. Diagnostics of fuel input in testing modes / *Mat-s of Internat. scient. and technical conf.* – Chelyabinsk : SUSAU, [Diagnostirovanie sistemy toplivopodachi DVS na testovyh rezhimakh / M-ly Mezhdun. nauch.-tekhnich. konf., Chelyabinsk, YuUrGAU] 2016. C. 9–13. ISBN 978-5-88156-739-2.
3. Gritsenko A. V., Glemba K. V. Elaboration of measures to provide load modes during diagnostics of engines / *Mat-s Internat. scient. and technical conf.*, [Razrabotka meropriyatij po obespecheniyu nagruzochnyh rezhimov v processe diagnostirovaniya dvigatelej / M-ly mezhdun. nauchn.-praktich. Konf] Chelyabinsk, SUSAU, 2017. P. 108–114. ISBN 978-5-9961-1339-2.
4. Bakaikin D. D. Elaboration of testing techniques of diagnostics of automobiles / *Mat-s Internat. scient. and technical conf.*, [Razrabotka testovyh priemov diagnostirovaniya avtomobilej / M-ly Mezhdunarodn. nauchn.-praktich. konf.] Chelyabinsk, SUSAU, 2017. P. 19–23. ISBN 978-5-88156-769-9.
5. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Lukomsky K. I., Shepelev V. D. Testing methods of automobile internal combustion engine systems diagnostics [Testovye metody diagnostirovaniya sistem dvigatelej vnutrennego sgoraniya avtomobilej] : monograph. – Chelyabinsk : SUSAU, 2016. 210 p. ISBN 978-5-88156-729-3.
6. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // *Tribology in Industry*, 2018. T. 40. № 2. Pp. 300–310. ISSN 0354-8996.
7. Gritsenko A. V., Vlasov D. B. Determination of technical condition of electric fuel pumps in testing modes of its diagnostics // *Up-to-date trends of 21st century scientific investigations: theory and practice.* [Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskikh benzonasosov na testovyh rezhimakh ego diagnostirovaniya // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika.] 2017. V. 5. № 6 (32). P. 190–196. ISSN 2308-8877.
8. A technique for diagnosis of electric fuel pumps of automobile fuel input system: [Sposob diagnostirovaniya elektrobenzonasosov sistemy toplivopodachi avtomobilya] patent 2477384 Rus. Federation. № 2012109956 ; decl. 14.03.12; pub. 10.03.13, Bul. № 7.
9. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Studies of operational modes of automobile electric fuel pumps in artificial formation of hydraulic resistance // *Herald of USURT.* [Issledovanie rezhimov raboty elektricheskikh benzinovyh nasosov avtomobilej pri iskusstvennom formirovanii gidravlicheskogo soprotivleniya] // *Vestnik UrGUPS.* 2016. № 2 (30). P. 47–55. ISSN 2079-0392.
10. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vlasov D. B. Detection of hidden faults of electric fuel pumps of mobile power devices in agriculture by testing diagnostics // *Electrical equipment: operation and repairs.* [Vyyavlenie skrytyh otkazov elektricheskikh toplivnyh nasosov mobil'nyh energeticheskikh sredstv v sel'skom hozyajstve metodom testovogo diagnostirovaniya // Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont.] 2018. № 11. P. 50–57. ISSN 2074-9635.
11. Gritsenko A. V., Vlasov D. B., Glemba K. V. Studies of operational parameters change of the volumetric electric fuel pump in emulation modes of fuel input resistance / *Mat-s of Internat. scient.&tech.conf.* Tyumen [Issledovanie izmeneniya parametrov raboty ob"emnogo

- elektricheskogo benzonasosa v rezhimakh imitacii soprotivleniya toplivopodachi / M-ly Mezhdunarodn. nauchn.-tekhnich. konf. Tyumen'] : Tyumen industrial university, 2018. P. 94–98. ISBN 978-5-9961-1661-8.
12. Gritsenko A. V., Lukomski K. I., Vlasov D. B., Glemba K. V. Testing diagnostics of electric fuel pumps. [Testovoe diagnostirovanie elektricheskikh toplivnykh nasosov] Russia' AIC, 2017. V. 24. № 5. P. 1161–1167. ISSN 2587-8824.
13. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Methods and results of automobile electric pump diagnostics / Alternative power sources in transport and technological complex: problems and prospects of rational usage. [Metodika i rezul'taty diagnostirovaniya elektricheskikh nasosov avtomobilej / Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovaniya] Voronezh : VGLU, 2015. V. 2. № 2. P. 419-424. ISSN 2409-7829.
14. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Results of experimental studies of electromagnetic nozzle flow capacity [Rezul'taty eksperimental'nyh issledovanij propusknnoj sposobnosti elektromagnitnykh forsunok] / Collection of scientific papers edited by V. V. Yerofeyeva: Engineering, innovations, investments. Chelyabinsk, 2013. P. 59–64. ISBN 978-5-904593-41-4.
15. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Theoretical studies of electromagnetic nozzle fuel input process [Rezul'taty eksperimental'nyh issledovanij propusknnoj sposobnosti elektromagnitnykh forsunok] / Col. of scient. papers. / edited by V. V. Yerofeyeva: Engineering, innovations, investments. – Chelyabinsk, 2013. P. 53–58. ISBN 978-5-904593-41-4.
16. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V. Diagnostics of automobile electromagnetic nozzles // Up-to-date trends of 21st century scientific investigations : theory and practice, [Diagnostirovanie elektromagnitnykh forsunok legkovykh avtomobilej // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika] 2015. V. 3. № 4-1 (15-1). P. 164–168. ISSN 2308-8877.
17. Bakaikin D. D., Kukov S. S., Gritsenko A. V. Technical maintenance of fuel input system elements of fuel engines with electronic control system [Tekhnicheskoe obsluzhivanie elementov sistemy toplivopodachi benzinovogo dvigatelya s elektronnoj sistemoy upravleni] // Herald of ChSAU, 2006. V. 47. P. 10–13. ISSN 5-88156-373-5.
18. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Glemba K. V., Bakaikin D. D. Diagnostics of flow capacity of electromagnetic nozzles / Internat. scient.& practical conf. «Challenges of development and safety of automobile transport complex». [Diagnostirovanie propusknnoj sposobnosti elektromagnitnykh forsunok / Mezhdunarodn. nauchn.-prakt. konf. «Perspektivy razvitiya i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa»] Novokuznetsk : KuzSTU, 2013. P. 91–96.
19. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V., Abrosimov D. A. Diagnostics of electromagnetic nozzles in testing modes [Diagnostirovanie elektromagnitnykh forsunok DVS na testovykh rezhimakh] // Russia's AIC, 2015. V. 72. № 1. P. 16–18.
20. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Shefer L. A., Salimonenko G. N., Karpenko A. G., Rudnev V. V., Nazarov M. V. Control over automobile environmental parameters in emulation of different modes of loading by the method of output resistance // Intellect. Innovations. Investments, 2018. [Kontrol' ekologicheskikh parametrov avtomobilya pri imitacii razlichnykh rezhimov nagruzheniya DVS metodom sozdaniya soprotivleniya na vypuske // Intellect. Innovacii. Investicii, 2018] № 8. P. 85–95. ISSN 2077-7175.
21. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Shefer L. A., Salimonenko G. N., Karpenko A. G., Rudnev V. V. Investigation of fuel ICE environmental parameters in emulation of loading different modes // Transport of the Urals, 2018. [Issledovanie ekologicheskikh parametrov benzinovogo DVS pri imitacii razlichnykh rezhimov nagruzheniya // Transport Urala, 2018] № 3 (58). P. 58–63. ISSN 1815-9400.
22. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Studies of ways to increase automobile transport environmental friendliness and efficiency in testing modes of internal combustion engine idling cycle // Transport of the Urals, 2016. [Issledovanie sposoba povysheniya ekologichnosti i ekonomichnosti avtotransporta na testovykh rezhimakh holostogo hoda raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya // Transport Urala, 2016.] № 1 (48). P. 97–102. ISSN 1815-9400.
23. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Ecological aspects and issues of automobile transport ICE systems diagnostics in operational and testing modes / International

- scient.& pract. conf. «Innovations and investigations in transport complex». [Ekologicheskie aspekty i voprosy diagnostirovaniya sistem DVS avtotransporta v rabochem i testovom rezhimakh / Mezhdunarodn. nauchn.-prakt. konf. «Innovacii i issledovaniya v transportnom komplekse»]. – Kurgan ; RAT UrB : Printexpress (Barnaul), 2014. P. 225–231. ISBN 978-5-904064-10-5.
24. Kozhanov V. N., Petelin A. A., Grutsenko A. V., Shepelev V. D. Reduction of diesel engine exhaust gases toxicity by switching some of its cylinders off // Herald of SUSU, 2018. [Snizhenie toksichnosti otrabotavshih gazov dizel'nogo dvigatelya putem otklyucheniya chasti ego cilindrov // Vestnik YuUrGU, 2018] – Ser. : Mechanical Engineering. V. 18. № 2. P. 34–44. ISSN 1990-8504.
 25. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vozmilov A. G. Improving the car environmental qualities by studying the engine load characteristics in the modes of injection rate off // Transportation Research Procedia, Vol. 36. 2018. – Pp. 237–244.
 26. Glemba K. V., Averianov Yu. I., Gritsenko A. V. On issue of reliability increase of road traffic safety system elements / Internat. scient.& pract. conf. «Problems of efficiency and safety of advanced technical and informational systems functioning» / Ufa, Sterlitamak : LLP «Agency for international studies», 2017. [K voprosu povysheniya nadezhnosti elementov sistemy bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya / Mezhdunarodn. nauchn.-prak'. konf. «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funkcionirovaniya slozhnyh tekhnicheskikh i informacionnyh sistem» / Ufa, Sterlitamak : OOO «Agentstvo mezhdunarodnyh issledovaniy», 2017.] P. 19–23. ISBN 978-5-906996-40-4.
 27. Gritsenko A. V., Shepelev V. D., Shepeleva E. V. Optimizing Consumption of Gas Fuel Using Static Method of Tuning Automobile Gas-Cylinder Equipment / Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2018. Pp. 2163–2174.
 28. Bashta T. M. Calculations and constructions of aircraft hydraulic units. M. : State scientific and technical publisher Oborongiz, 1961. [Raschety i konstrukcii samoletnyh gidravlicheskih ustroystv. M. : Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo Oborongiz, 1961] 475 p.
 29. Yerokhov V. I. Injecting systems of fuel engines (construction, calculation, diagnostics) [Sistemy vpryska benzinovyh dvigatelej (konstrukciya, raschet, diagnostika)]: textbook for higher schools. – M. : Hot line – Telecom, 2011. 552 p. ISBN 978-5-9912-0130-8.
 30. Plaksin A., Gritsenko A., Glemba K. Experimental studies of cylinder group state during motoring / Procedia Engineering «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016». – 2016. – Vol. 150. Pp. 1188–1191.
 31. Gritsenko A., Kukov S., Glemba K. Theoretical Underpinning of Diagnosing the Cylinder Group During Motoring / Procedia Engineering «2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016», 2016. – Vol. 150. Pp. 1182 –1187.

Статья сдана в редакцию 9 апреля 2019 года

1,26 а. л.

Управление в технических системах

УДК 62-529

И. А. Тараторкин, В. Б. Держанский, С. В. Абдулов, А. Г. Яковлев

Обоснование алгоритма построения маршрута для беспилотного гусеничного транспортного средства

UDC 62-529

I. A. Taratorkin, V. B. Derzhansky, S. V. Abdulov, A. G. Yakovlev

Feasibility of route building alorgythm for driverless caterpillar-mounted vehicle

Аннотация

В статье предлагается метод планирования маршрута движения гусеничного транспортного средства. Ключевая особенность данного метода заключается в учете неголономности связи гусеничного движителя с опорным основанием.

В рамках решения поставленной задачи выделяются три направления работы: а) уточнение ма-

тематической модели гусеничной машины (кинематические параметры и параметры взаимодействия движителя с опорным основанием определяются в реальном времени с использованием современных информационных технологий); б) разработка алгоритма планирования маршрута движения (построенный маршрут максимально удален от препятствий; алгоритм пла-

нирования движения должен иметь возможность эффективно работать в рамках неголономной модели взаимодействия гусеницы с опорным основанием; в) применение метода определения параметров взаимодействия с внешней средой в реальном времени (зависимости коэффициента сопротивления боковому уводу позволяют синтезировать корректирующую матрицу, обеспечи-

Статья рекомендована к публикации В.И. Васильевым, д-ром техн. наук, профессором Курганского государственного университета. E-mail: vviprof@rtural.ru.

Игорь Александрович Тараторкин, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом механики транспортных машин Института машиноведения (УрО РАН). Екатеринбург, Россия. E-mail: ig_tar@mail.ru.

Виктор Борисович Держанский, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения (УрО РАН), Екатеринбург; заведующий кафедрой «Гусеничные машины и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»; Курган, Россия. E-mail: dvb_47@mail.ru.

Сергей Владимирович Абдулов, канд. техн. наук, главный конструктор АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения», (Курган), доцент каф. гусеничных машин Курганского государственного университета; Курган, Россия. E-mail: skbm@skbm.ru.

Антон Геннадьевич Яковлев, инженер; АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения» (Курган), инженер Института машиноведения (УрО РАН); Екатеринбург, Россия. E-mail: tofik91@yandex.ru.

The article is recommended for publishing by V.I. Vasiliev, Doctor of technical science, Professor, Kurgan state university. E-mail: vviprof@rtural.ru.

Igor Alexandrovich Taratorkin, Doctor of technical science, Professor, Head of Department of Mechanics of Transport Machines, Mechanical Engineering Institute (RAS UrB), Yekaterinburg, Russia. E-mail: ig_tar@mail.ru.

Victor Borisovich Derzhansky, Doctor of technical science, Leading Researcher, Mechanical Engineering Institute (RAS UrB), Yekaterinburg, Head of the Department of Caterpillar Machines and Applied Mechanics, «Kurgan state university»; Kurgan, Russia. E-mail: dvb_47@mail.ru.

Sergey Vladimirovich Abdulov, Candidate of technical science, Chief Designer, JSC «Special Engineering Bureau for Mechanical Engineering», (Kurgan), Associate Professor of Caterpillar Machines Department, Kurgan state university; Kurgan, Russia. E-mail: skbm@skbm.ru.

Anton Gennadievich Yakovlev, Engineer, JSC «Special Engineering Bureau for Mechanical Engineering», (Kurgan), Engineer of Mechanical Engineering Institute (RAS UrB); Yekaterinburg, Russia. E-mail: tofik91@yandex.ru.

вающую повышение устойчивости движения).

Эффективность предлагаемого подхода планируется оценить моделированием управляемого движения БТС и при проведении экспериментальных исследований.

Ключевые слова: гусеничное транспортное средство, диаграмма Вороного, траектория движения, математическая модель.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-26-33

Annotation

The article focuses on the method of caterpillar-mounted vehicle movement route planning. A key peculiarity of this method is in consideration of

nonholonomocity of the link between a caterpillar drive and a supporting base.

Within the frame of solving the given task the three directions of work can be marked: a) detailing of a caterpillar-mounted vehicle (kinematic parameters and parameters of interaction between the drive and the supporting base are found in real time with the use of modern information technology); b) elaboration of movement route planning algorithm (the developed route is ultimately distant from obstacles; the movement route algorithm should be able to operate efficiently within the frame of nonholonomic model of interaction between

the caterpillar and the supporting base; c) application of the method to determine parameters of interaction with the environment in real time (dependencies of the side slip resistance coefficient make it possible to synthesize a correcting matrix which provides movement stability increase).

Efficiency of the proposed approach is planned to be evaluated by simulation of the DTV controlled movement and during experimental research.

Key words: caterpillar-mounted vehicle, Voronoi graph, movement path, mathematical model.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-26-33

Для решения транспортных задач при отсутствии инфраструктуры эффективно использование быстроходных гусеничных машин. Большая протяженность маршрутов, тяжелые погодные условия – все это ставит вопрос о целесообразности применения автономных беспилотных систем управления. Но создание автономной системы управления гусеничной машиной осложняется недостаточной информативностью существующей математической модели движения. Неголономность связей движителя с опорным основанием, чьи параметры и физико-механические свойства носят случайный характер, не позволяет достичь высокого качества процесса управления гусеничной машиной. Требования к алгоритму беспилотного транспортного средства должны включать в себя построение маршрута по предварительно заданным данным и его корректировку в соответствии с окружающей обстановкой. Траектория движения должна учитывать текущие параметры взаимодействия внутри механической системы и ее взаимодействие с опорной поверхностью. Для безопасного движения при

обходе препятствий необходим гарантированный зазор.

Анализ опубликованных работ по построению маршрута выделяет два подхода: вычисление траектории в заранее известном статическом окружении и огибание обнаруженных препятствий с учетом поступающей от датчиков информации. Наилучший результат дает их совместное использование [1].

Расчет траектории в статическом окружении позволяет спланировать маршрут по заданным параметрам (кратчайший путь, определенная кривизна, наименьшее затраченное время и т.д.). Задача нахождения пути между начальной и конечной точками решается по-разному, например, методом потенциальных полей, дорожной карты, генетическим, применением нейронной сети и др. [1].

Методы, основанные на том или ином виде «машинного обучения» (генетический метод, нейронная сеть), заключаются в многократном проигрывании заданной ситуации со случайным изменением параметров либо поведения объекта. Вариант, дающий наилучшие результаты, становится базовым

для дальнейших мутаций, хотя высокая трудоемкость реализации и требования к мощности вычислительных ресурсов затрудняет практическое применение этих способов.

Широко распространен метод потенциальных полей [2]. Робот и препятствия представляются в виде положительных зарядов, а точка назначения – отрицательного. Несмотря на простоту реализации данного метода, требуется решить проблемы «ловушки локального минимума» [1] и прохождения между двумя близко расположенными препятствиями.

Методы дорожной карты используют построенный на известной карте вокруг препятствий каким-либо образом граф (Roadmap); предлагается множество способов ее построения: граф видимости [3], клеточное разбиение [4], быстрорастущие случайные деревья (RRT) [5, 6].

Один из методов дорожной карты основан на построении диаграммы Вороного вокруг препятствий. Диаграмма Вороного [7, 8] представляет собой граф, состоящий из ребер, наиболее удаленных от заданных точек. В отличие от других упомянутых методов (граф видимости, RRT), маршрут, построенный на её основе, обеспечивает связность во всей рассматриваемой области и наиболее безопасен с точки зрения столкновения с препятствиями.

Движение безэкипажного транспортного средства в естественном динамическом и/или неизвестном окружении сопровождается появлением неучтенных препятствий на заранее вычисленном маршруте. Для безаварийного движения необходимо вносить корректировки; для этого применяются алгоритмы семейства Bug [1, 9]. Кроме того, существуют модификации различных методов, например, потенциального поля, графа Вороного и т. п. [10, 11].

В качестве основы для алгоритма планирования маршрута использован граф Вороного. Построение маршрута представлено на рис. 1; вначале (рис. 1, а) строится граф (синяя линия) вокруг препятствий (лиловые многоугольники). Начальная и конечные точки отмечены символами «○» и «+». Потом вычисляется кратчайший маршрут, основанный на линиях графа. Полученная траектория (рис. 1, б) выделена зеленым цветом.

Реальное транспортное средство в отличие от материальной точки перемещается с ограничениями, обусловленными взаимодействием отдельных частей и агрегатов внутри механической системы, и движителя – с опорной поверхностью. Полученная траектория (рис. 1, б) не обеспечивает оптимальное энергоэффективное движение и минимальное время пути.

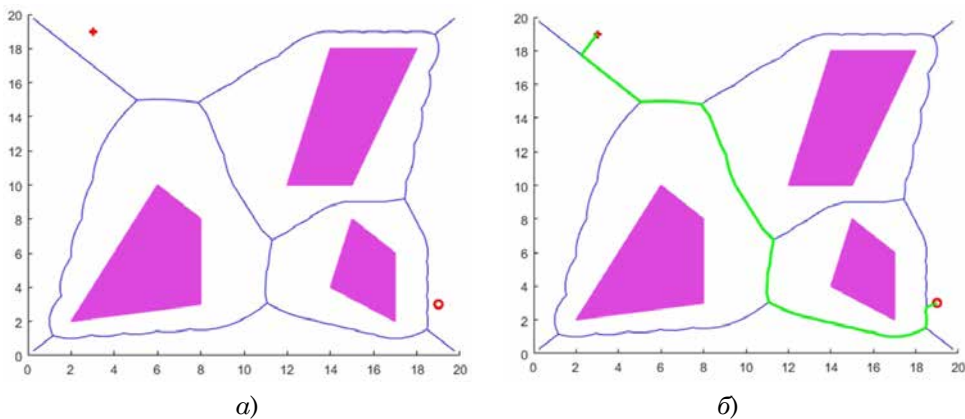


Рис. 1. Построение графа Вороного на области с препятствиями (а) и нахождение кратчайшего маршрута от начальной точки «○» к конечной «+» (б)

Следующий этап построения маршрута – анализ траектории с точки зрения математической модели движения гусеничного транспортного средства. Кратчайшая траектория не гарантия движения с оптимальной скоростью, следовательно, наименьшего времени прохождения пути. Минимально возможный радиус поворота, в зависимости от скорости движения в определенных условиях, может привести к столкновению с огибаемым препятствием; для обеспечения безопасного движения потребуется снизить скорость. Скорость движения реальной машины ограничивается следующими факторами: проходимость машины, плавность хода при движении по неровностям, энергоэффективность при вариации коэффициентов сопротивления движению и повороту, а также обеспечение тягово-сцепных свойств (ограничение буксования движителя, определяемое значением коэффициента сцепления). Значит, маршрут должен корректироваться в зависимости от значения физико-механических свойств опорного основания, параметров взаимодействия с движителем, измеряемых в реальном времени.

При проектировании маршрута необходима математическая модель движения машины. Известные модели требуют корректировки, которые учитывают дополнительные ограничения, определяемые алгоритмом функционирования системы автономного управления. Новизна используемой нами модели состоит в том, что учитываются упруго-инерционные свойства системы управления поворотом (упруго-инерционные свойства системы «двигатель-трансмиссия-движитель»). Это позволяет точнее моделировать качество переходных процессов. Кроме того, в математической модели принято, что момент сопротивления формируется силами бокового увода элементов движителя, функция коэффициента сопротивления уводу от угла скольжения является нелинейной. Математическая модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений.

Первые два уравнения системы описывают поступательное движение машины в продольном x и боковом y направлениях. Третье уравнение определяет вращательное движение машины относительно вертикальной оси z с учетом действия центробежной силы. Четвертое уравнение определяет колебательный процесс в приводе управления в системе «двигатель-трансмиссия-машина».

Плоскопараллельное движение машины определяется системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dV_x / dt &= \delta_x^{-1} g(f_d - f_c) - V_y \omega_z, \\ m dV_y / dt &= m V_x \omega_z + \sum C_{yi} \theta_i, \\ J_z d\omega_z / dt &= -m V_x \omega_z (\chi - l_{цм}) + \\ &+ \sum C_{yi} \theta_i (\chi - l_i) - C_{\text{тор}} (\varphi_M - \varphi_D) - \\ &- b_{\text{дис}} (\omega_z - \omega_D), \\ J_D d\omega_D / dt &= -C_{\text{тор}} (\varphi_D - \varphi_M) - \\ &- b_{\text{дис}} (\omega_z - \omega_D) + M(f), \\ f_c &= f_{\text{гр}} + i + f_{\text{П}}, \\ \chi &= f(V_x, \omega_z, \mu), \\ \theta_i &= f(\omega_z, V_x, \chi), \\ C_{yi} &= f(\mu, \omega_z), \end{aligned}$$

где m – масса машины; V_x , V_y , dV_x/dt , dV_y/dt – продольная и поперечная скорости и ускорения соответственно; ω_z , $d\omega_z/dt$ – угловая скорость и ускорение двигателя соответственно, приведенная к оси Z ; g – ускорение свободного падения; f_d – динамический фактор; f_c – коэффициент сопротивления движению; C_{yi} – коэффициент сопротивления уводу i -й пары опорных катков; χ – продольное смещение полюса поворота; θ_i – угол увода оси i -й пары опорных катков; l_i – расстояние от оси задней пары опорных катков до оси i -й пары опорных катков; $l_{цм}$ – расстояние от оси задних опорных катков до центра масс; J_z – момент инерции машины; J_D – момент инерции двигателя, приведенный к оси Z ; φ_M , ω_z – угол и угловая скорость машины; φ_D , ω_D – угол и угловая скорость двигателя, приведенная

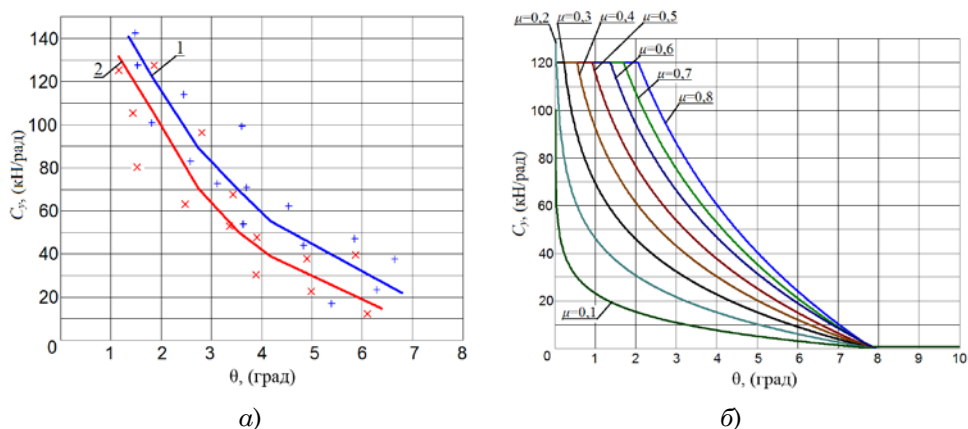


Рис. 2. Зависимость коэффициентов сопротивления боковому уводу от углов скольжения элементов конструкции гусеничного движителя
 а – экспериментальные зависимости; б – аппроксимированные зависимости

к оси Z ; b_{dis} – коэффициент диссипации; C_{tor} – приведенная жесткость системы управления.

Очень важен неголономный характер взаимодействия гусеничного движителя с опорной поверхностью. Для формализации процесса скольжения гусениц разрабатываются методы расчетно-экспериментального определения и вводятся в математическую модель коэффициенты буксования забегающей и юз-отстающей гусениц, поперечное смещение полюсов вращения гусениц, значения коэффициентов сцепления отстающего и забегающего бортов, ограничивающих реализацию сил тяги. Один из основных параметров – коэффициент сопротивления боковому уводу (функция угла скольжения элементов движителя) [12].

Измерение коэффициента сопротивления боковому уводу определяется по величине боковой силы, действующей на балансир опорного катка (определение углов скольжения элементов движителя – сложная и не до конца решенная задача). Для определения углов скольжения используют оптические датчиков [13, 14]; при таком

методе анализируется движение характерных точек опорной поверхности, выделенных на цифровом изображении*. Другой подход состоит в использовании координат GPS [17, 18]. Это позволяет исключить влияние внешних факторов (запыленность, грязь, осадки, иней и туман). Так, при изучении особенностей поведения гусеничной машины на различных типах грунта реализован способ определения углов скольжения элементов конструкции движителя по отношению поперечных и продольных скоростей [19].

В ходе испытаний определялись координаты двух разнесенных приемников GPS. Анализ полученных данных позволил найти реальный угол скольжения в каждый отдельный момент. В дальнейшем найдена зависимость коэффициентов сопротивления боковому уводу от углов скольжения элементов конструкции гусеничного движителя (рис. 2).

Результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления боковому уводу от углов для двух типов грунтов для гусеничной машины представлены на рис. 2, а (1 – дернистый грунт; 2 – песчаный грунт),

* Применяется в автомобильной промышленности, ведутся работы по расширению возможностей применения при низких скоростях движения на неровной поверхности, т.е. для внедорожной техники [15, 16].

аппроксимированные зависимости для различных грунтов при вариации коэффициента сопротивления повороту от 0,1 до 0,8 – на рис. 2, б.

Приведенные зависимости позволяют предложить достоверный способ определения типа грунта, по которому движется машина. Становится возможным корректировать управляющие воздействия и собственные параметры транспортной машины в соответствии с текущими измеренными физико-механическими свойствами опорной поверхности.

Итак, на основе анализа известных методов планирования маршрута движения автономной транспортной машины в области с препятствиями установлено, что одним из наиболее эффективных алгоритмов является построение

траектории на основе диаграмме Воронова.

Проектируемый маршрут необходимо корректировать в соответствии с математической моделью объекта управления. Уточнение должно обеспечить движение без бокового заноса, проходимость машины, плавность хода при движении по неровностям, энергоэффективность при вариации коэффициентов сопротивления движению и повороту.

Разработан метод расчетно-экспериментального определения коэффициента сопротивления боковому уводу элементов конструкции движителя как функции угла скольжения. Эта функция является нелинейной, что определяется неголономностью связи движителя с опорным основанием. ■

Литература

1. Lumekky V. J., Stepanov A. A. Path Planning Strategies for a Point Mobile Automation Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape // *Algorithmica*. 1987. № 2. Pp. 403–430. ISSN 1432-0541.
2. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // *Int. Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5. № 1. Pp. 90–98. ISSN 0278-3649.
3. Simeon T., Laumond J.-P., Nissoux C. Visibility based probabilistic roadmaps for motion planning // *Advanced Robotics*. 2000. Vol. 14. № 6. Pp. 477–493. ISSN 0169-1864.
4. Brooks R., Lozano-Perez T. A subdivision algorithm in configuration space for path with rotation // *IEEE Trans. Syst.* 1985. Vol. 15. № 2. Pp. 224–233. ISSN 0018-9472.
5. Kuffner J. J., LaValle S. M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // *Int. Conf. on Robotics and Automation*. 2000. Vol. 2. Pp. 995–1001. ISSN 1050-4729.
6. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning // *Int. Journal of Robotics Research*. 2011. Vol. 30. № 7. Pp. 846–894. ISSN 0278-3649.
7. Choset H., Burdick J. Sensor Based Motion Planning: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph // *Int. Journal of Robotics Research*. 2000. Pp. 96–125. ISSN 0278-3649.
8. Lau B., Sprunk C., Burgard W. Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams // *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2010. Pp. 281–286. ISSN 2153-0858.
9. Magid E., Rivlin E. CautiousBug: a competitive algorithm for sensory-based robot navigation // *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2004. Vol. 3. Pp. 2757–2762. ISSN 2153-0858.
10. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots // *Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1998. Vol. 2. Pp. 1572–1577. ISSN 1050-4729.
11. Magid E., Lavrenov R., Afanasyev I. Voronoi-Based Trajectory optimization for UGV Path Planning // *Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering*. 2017. Pp. 383–387.
12. Chung T., Yi K. Design and evaluation of side slip angle-based vehicle stability control scheme on a virtual test track // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2006. Vol. 14. № 2. Pp. 224–234. ISSN 1063-6536.
13. Bevely D. M., Ryu J., Gerdes J. C. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, and tire cornering stiffness // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2006. Vol. 7. № 4. Pp. 483–493. ISSN 1524-9050.

14. Botha T. R., Els P. S. Vehicle sideslip estimation using unscented Kalman filter, AHRS and GPS // *Int. Journal of Automotive Technology*. 2011. Vol. 12. № 4. Pp. 651–659. ISSN 1229-9138.
15. Botha T.R., Els P.S. Digital image correlation techniques for measuring typeroad interface parameters // *Terrramech*. 2015. № 61. Pp. 87–100.
16. Johnson D. K., Botha T. R., Els P. S. Real-time side-slip angle measurements using digital image correlation // *Terrramech*. 2019. № 81. Pp. 35–42.
17. Seegmiller N., Rogers-Marcovitz F., Miller G., Kelly A. Vehicle Model Identification by Integrated Prediction Error Minimization // *Int. Journal of Robotics Research*. 2013. Vol. 32. No. 8. Pp. 912–931. ISSN 0278-3649.
18. Lee S. U., Iagnemma K. Robust Motion Planning Methodology for Autonomous Tracked Vehicles in Rough Environment Using Online Slip Estimation // *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2016. Pp. 3589–3594. ISSN 2153-0866.
19. Волков А.А. Повышение скорости движения в повороте быстроходной гусеничной машины на основе совершенствования алгоритмов управления движением : автореф. дис. ... канд техн. наук. – Курган, 2018. – 24 с.

Literature

1. Lumekky V. J., Stepanov A. A. Path Planning Strategies for a Point Mobile Automation Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape // *Algorithmica*. 1987. № 2. Pp. 403–430. ISSN 1432-0541.
2. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots // *Int. Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5. № 1. Pp. 90–98. ISSN 0278-3649.
3. Simeon T., Laumond J.-P., Nissoux C. Visibility based probabilistic roadmaps for motion planning // *Advanced Robotics*. 2000. Vol. 14. № 6. Pp. 477–493. ISSN 0169-1864.
4. Brooks R., Lozano-Perez T. A subdivision algorithm in configuration space for path with rotation // *IEEE Trans. Syst.* 1985. Vol. 15. № 2. Pp. 224–233. ISSN 0018-9472.
5. Kuffner J. J., LaValle S. M. RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning // *Int. Conf. on Robotics and Automation*. 2000. Vol. 2. Pp. 995–1001. ISSN 1050-4729.
6. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning // *Int. Journal of Robotics Research*. 2011. Vol. 30. № 7. Pp. 846–894. ISSN 0278-3649.
7. Choset H., Burdick J. Sensor Based Motion Planning: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph // *Int. Journal of Robotics Research*. 2000. Pp. 96–125. ISSN 0278-3649.
8. Lau B., Sprunk C., Burgard W. Improved Updating of Euclidean Distance Maps and Voronoi Diagrams // *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2010. Pp. 281–286. ISSN 2153-0858.
9. Magid E., Rivlin E. CautiousBug: a competitive algorithm for sensory-based robot navigation // *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 2004. Vol. 3. Pp. 2757–2762. ISSN 2153-0858.
10. Ulrich I., Borenstein J. VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots // *Int. Conf. on Robotics and Automation*. 1998. Vol. 2. Pp. 1572–1577. ISSN 1050-4729.
11. Magid E., Lavrenov R., Afanasyev I. Voronoi-Based Trajectory optimization for UGV Path Planning // *Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering*. 2017. Pp. 383–387.
12. Chung T., Yi K. Design and evaluation of side slip angle-based vehicle stability control scheme on a virtual test track // *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2006. Vol. 14. № 2. Pp. 224–234. ISSN 1063-6536.
13. Bevy D. M., Ryu J., Gerdes J. C. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, and tire cornering stiffness // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2006. Vol. 7. № 4. Pp. 483–493. ISSN 1524-9050.
14. Botha T. R., Els P. S. Vehicle sideslip estimation using unscented Kalman filter, AHRS and GPS // *Int. Journal of Automotive Technology*. 2011. Vol. 12. № 4. Pp. 651–659. ISSN 1229-9138.
15. Botha T. R., Els P. S. Digital image correlation techniques for measuring typeroad interface parameters // *Terrramech*. 2015. № 61. Pp. 87–100.
16. Johnson D. K., Botha T. R., Els P. S. Real-time side-slip angle measurements using digital image correlation // *Terrramech*. 2019. № 81. Pp. 35–42.

17. Seegmiller N., Rogers-Marcovitz F., Miller G., Kelly A. Vehicle Model Identification by Integrated Prediction Error Minimization // Int. Journal of Robotics Research. 2013. Vol. 32. No. 8. Pp. 912–931. ISSN 0278-3649.
18. Lee S. U., Iagnemma K. Robust Motion Planning Methodology for Autonomous Tracked Vehicles in Rough Environment Using Online Slip Estimation // Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. 2016. Pp. 3589–3594. ISSN 2153-0866.
19. Volkov A. A. Movement speed increase in the turn of a fast caterpillar machine on the basis of improvement of movement control algorithms [Povyshenie skorosti dvizheniya v povorote bystrohodnoj gusenichnoj mashiny na osnove sovershenstvovaniya algoritmov upravleniya dvizheniem]: extended abstract of dissertation ... Candidate of tech.science. – Kurgan, 2018. – 24 p.

Статья сдана в редакцию 30 марта 2019 года

0,74 а.л.

УДК 512.64, 519.21, 519.72

Н. В. Медведева, С. С. Титов

К разработке абсолютно стойких систем передачи данных

UDC 512.64, 519.21, 519.72

N. V. Medvedeva, S. S. Titov

In regards to completely failure-free systems of data communication

Аннотация

Обеспечение информационной безопасности – одна из приоритетных задач в сфере управления технологическими процессами критической инфраструктуры. Защита информации крайне важна для функционирования транспортной системы, в частности, железнодорожной.

В настоящей статье исследуется проблема построения абсолютно стойких систем передачи данных посредством создания шифров, не раскрывающих никаких сведений об открытых текстах. На основе аналогов теоремы Шеннона о совершенных шифрах рассматривается задача описания выпуклого многогранника (полиэдра) в многомерном пространстве, каждая точка которого определяет распределение вероятностей ключей некоторого совершенного шифра.

Предложенный в работе математический аппарат позволяет сформировать концепцию исследований, направленных на разработку шифров, абсолютно стойких к атаке по шифр-тексту, в развитие аналогов или обобщений теоремы Шеннона.

В терминах комбинаторного анализа выпуклых множеств многомерного пространства получены аналоги теоремы Шеннона для совершенных шифров. Найдена оценка априорных вероятностей шифр-обозначений, в общем случае справедливая и для эндоморфных, и для неэндоморфных шифров. Показано, что даже для эндоморфных совершенных неминимальных шифров нет прямого аналога теоремы Шеннона. В результирующей части работы приведены таблицы зашифрования совершенных шифров, готовые к непосредственному применению при организации канала связи на транспорте.

Ключевые слова: передача данных, защита информации, совершенные шифры, эндоморфные шифры, неэндоморфные шифры.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-34-43

Annotation

Ensuring information security – is one of the top-priority tasks in the field of technological process management of the critical infrastructure. Information security is of the utmost importance for transport system operation, particularly, the railway one.

The issue of building completely failure-free data communication systems by means of creating cyphers which do not disclose any data about the open texts is investigated in the present article. Based on the prototypes of the Shannon theorem on the perfect cyphers the task of description of a convex polytope (polyhedron) in a multi-dimensional space and where its each point defines the probability distribution of keys of a certain perfect cypher.

The mathematical tool which is proposed in this work allows to form a research concept aimed at designing the cyphers which are completely failure-free against cypher-text attacks, development of the analogues or extensions of the Shannon's theorem.

In terms of combinatorial analysis of the convex varieties of multidimensional space the analogues for perfect cyphers of the Shannon theorem are obtained. The assessment of a priori probabilities of cypher-designations is determined which is, in general, true for endomorphic and non-endomorphic cyphers. It is illustrated that even for endomorphic perfect non-minimal cyphers there are no an immediate analogue for the Shannon theorem. In the concluding part of the work some charts with encryption of perfect cyphers which are directly applicable in establishing communication lines in transport.

Key words: data communication, information security, perfect cyphers, endomorphic cyphers, non-endomorphic cyphers.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-34-43

Статья рекомендована к публикации С. В. Сизым, д-ром техн. наук, доцентом Уральского федерального университета. E-mail: s5125@e1.ru.

Наталья Валерьевна Медведева, канд. физ.-мат. наук, доцент; кафедра «Естественные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: medvedeva@usurt.ru.

Сергей Сергеевич Титов, д-р физ.-мат. наук, профессор; кафедра «Естественные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: stitov@usaaa.ru.

The article is recommended for publishing by S.V. Sizy, Doctor of technical sciences, Associate professor, Ural federal university. E-mail: s5125@e1.ru.

Natal'ya Valer'evna Medvedeva, Candidate of physical and mathematical sciences, Associate professor; «Natural science disciplines» department, Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia. E-mail: medvedeva@usurt.ru.

Sergey Sergeevich Titov, Doctor of physical and mathematical sciences, Professor; «Natural science disciplines» department, Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia. E-mail: stitov@usaaa.ru.

Введение

Специфика защиты передачи данных на транспорте (в частности, на железнодорожном) заключается в том, что невозможно организовать канал связи, защищенный от перехвата сообщений пассивным злоумышленником (который может перехватывать сообщения, но не может их генерировать и модифицировать). Решением проблемы передачи коротких и важных сообщений (абсолютно стойких к атаке по шифр-тексту) служит применение совершенных (по Шеннону) шифров [1].

В настоящей работе исследуется проблема создания шифров, не раскрывающих никаких сведений об открытых текстах, на основе аналогов теоремы Шеннона о минимальных совершенных шифрах.

Разрабатывая теорию криптографической стойкости, К. Шеннон ввел понятие совершенного шифра как шифра, абсолютно стойкого к атаке по шифр-тексту [2]. Такой шифр не дает криптоаналитику никакой дополнительной информации об открытом тексте при изучении перехваченной криптограммы. Также концепция совершенного шифра разрабатывалась под руководством В.А. Котельникова [1, 3].

В основе изучения совершенных шифров лежит математическая модель шифра. Вероятностная модель шифра Σ_B впервые рассмотрена в фундаментальной работе К. Шеннона [2]. Имеются и другие подходы к построению таких моделей [1, 4–10]. В [1] предлагается некоторая модификация модели, приведенной в [9]. Она использует понятия опорного шифра, ключевого потока; в ней введены два класса шифров – с ограниченным и неограниченным ключами.

Пусть X , Y – конечные множества соответственно шифр-величин и шифр-обозначений, с которыми оперирует некоторый шифр замены, K – множество ключей, причем $|X| = \lambda$, $|Y| = \mu$, $|K| = \pi$, где $\lambda > 1$, $\mu \geq \lambda$. Это означает, что открытые $x = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_j}$, $x_{i_j} \in X$, и шифрованные $y = y_{i_1} y_{i_2} \dots y_{i_j}$, $y_{i_j} \in Y$, тексты представля-

ются словами (l -граммами, $l \geq 1$) в алфавитах X и Y соответственно. Согласно [1, 9], под шифром Σ_B будем понимать совокупность множеств правил зашифрования и расшифрования с заданными распределениями вероятностей на множестве открытых текстов и ключей. Шифры, для которых апостериорные вероятности $p(x|y)$, где $x \in X^l$, $y \in Y^l$, открытых текстов совпадают с их априорными вероятностями $p(x)$, называются совершенными. В работе [2] полностью описаны эндоморфные ($|X| = |Y|$) совершенные шифры с минимально возможным числом ключей ($|K| = |Y|$). Согласно теореме К. Шеннона [2], эндоморфные совершенные шифры с минимально возможным числом ключей исчерпываются шифрами табличного гаммирования со случайной равновероятной гаммой.

Существование неэндоморфных ($|X| < |Y|$) совершенных шифров [1], а также шифров, минимальных не по числу ключей, а по включению (т.е. шифров, содержащих минимально возможное множество ключей зашифрования с ненулевыми вероятностями) оправдывает получение аналогов (обобщений) теоремы Шеннона для других совершенных шифров. К этому также приводит задача изучения минимальных (по включению) транзитивных шифров, так как совершенный шифр является транзитивным. Допускает обобщение и само понятие совершенного по Шеннону шифра, что подтверждается изучением современных аналогов совершенных шифров [1, 11].

В настоящей статье продолжают исследования [12–14, 17, 18] проблемы описания совершенных по Шеннону шифров. Здесь в терминах комбинаторного анализа выпуклых множеств многомерного пространства получены аналоги теоремы Шеннона для совершенных по Шеннону неминимальных ($|K| > |Y|$) шифров.

Постановка задачи

Рассмотрим совершенный по Шеннону шифр (возможно, неэндоморфный

и неминимальный) в вероятностной модели Σ_B , в которой, согласно подходу [1, 9], шифр задается распределением вероятностей ключей при $l = 1$. Пусть $X = \{x_1, x_2, \dots, x_\lambda\} = \{1, 2, \dots, \lambda\}$ – множество шифр-величин; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_\mu\} = \{1, 2, \dots, \mu\}$ – множество шифр-обозначений, с которыми оперирует некоторый шифр замены; $K = \{k_1, k_2, \dots, k_\pi\}$ – множество ключей. По условию, $|X| = \lambda$, $|Y| = \mu \geq \lambda$, $|K| = \pi \geq \mu$.

Для эндоморфного ($\lambda = \mu$) и неэндоморфного ($\lambda < \mu$) шифров перечисляются в некотором порядке все возможные $\pi_{\max} = \mu \cdot (\mu - 1) \cdot \dots \cdot (\mu - \lambda + 1)$ подстановки (инъекции) зашифрования, соответствующие ключам $k \in K$ и их вероятностям P_k . Получившийся π_{\max} -мерный упорядоченный набор P задает закон распределения вероятностей P_k ключей и рассматривается как точка π_{\max} -мерного пространства $\mathbb{R}^{\pi_{\max}}$. Распределение биграмм, триграмм и т. д. может задаваться распределениями вероятностей и при $l = 2, 3, \dots$

Задача описания шифров в вероятностной модели Σ_B приводит к описанию множества точек в π_{\max} -мерном пространстве $\mathbb{R}^{\pi_{\max}}$, которые являются распределениями вероятностей ключей некоторого шифра.

По теореме Шеннона [2], минимальные по числу ключей эндоморфные шифры соответствуют тем точкам пространства $\mathbb{R}^{\pi_{\max}}$, у которых все координаты равны нулю, кроме λ ненулевых координат, равных $1/\lambda$, а сам набор координат соответствует набору ключей (подстановок), образующих латинский квадрат. Как известно [17], множество точек пространства $\mathbb{R}^{\pi_{\max}}$, соответствующих совершенным шифрам, образует выпуклое множество, а выпуклая оболочка точек, соответствующих латинским квадратам (шифрам Шеннона), также задает совершенный шифр. Однако могут быть совершенные шифры, соответствующие точкам вне этой выпуклой оболочки.

Шифры, содержащие все инъекции e_k из X в Y , $k \in K$, т. е. для которых $|K| = \pi_{\max} = \mu \cdot (\mu - 1) \cdot \dots \cdot (\mu - \lambda + 1)$, на-

зываются максимальными. Для неэндоморфных максимальных совершенных шифров ключи могут быть неравновесными (пример 2.2.10 из [1]) из-за, например, разных затрат на шифрование посредством этих ключей. В [12] показано, что любой совершенный шифр вкладывается в максимальный совершенный шифр.

В работах [13, 14] показано, что в случае, когда мощность алфавита шифр-величин равна двум, множество возможных значений априорных вероятностей шифробозначений $p_s = P\{y = y_s\} = P\{y = s\}$, где $s = 1, 2, \dots, \mu$ допускает описание на основе теоремы Биркгофа о классификации дважды стохастических матриц [15]. Здесь описано выпуклое множество (полиэдр [16]) матриц вероятностей ключей и множество вероятностей шифр-обозначений неэндоморфных совершенных шифров с двумя шифр-величинами. Полиэдр описан через указание его вершин (экстремальных точек), которые представляют собой так называемые нормальные циклы.

В [17] в терминах комбинаторного анализа выпуклых множеств многомерного пространства сформулированы и доказаны некоторые обобщения (аналоги) теоремы Шеннона для совершенных по Шеннону неминимальных шифров. Содержащиеся в работе [18] примеры иллюстрируют нетривиальность исследуемой проблемы, в частности, они показывают, что даже для эндоморфных совершенных по Шеннону неминимальных шифров нет прямого аналога теоремы Шеннона.

Таким образом, для решения задачи описания шифров в вероятностной модели Σ_B необходимо выяснить, как же правильно формулируется аналог теоремы Шеннона для совершенных шифров (возможно, неэндоморфных и неминимальных), т. е. требуется описать полиэдр в пространстве $\mathbb{R}^{\pi_{\max}}$, где $\pi_{\max} = \mu \cdot (\mu - 1) \cdot \dots \cdot (\mu - \lambda + 1)$, каждая точка которого определяет распределение вероятностей ключей некоторого совершенного шифра.

Построение совершенных шифров

Эндоморфный совершенный по Шеннону шифр с параметрами $\lambda = \mu = 2$ – это классический шифр Вернама по модулю два, абсолютная стойкость которого доказана К. Шенноном в работе [2].

Рассмотрим эндоморфный максимальный шифр с параметрами $\lambda = \mu = 3$ и $\pi = 3! = 6$. Здесь $X = \{x_1, x_2, x_3\} = \{1, 2, 3\}$ – множество шифр-величин; $Y = \{y_1, y_2, y_3\} = \{1, 2, 3\}$ – множество шифр-обозначений; $K = \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6\}$ – множество ключей. Все $\pi = 6$, соответствующие биекции зашифрования из X в Y , представлены в таблице 1.

Здесь под матрицей зашифрования понимается таблица зашифрования (в некоторой фиксированной нумерации ключей), расширенная столбцом вероятностей соответствующих ключей.

Таблица 1

Эндоморфный максимальный шифр при $\lambda = \mu = 3$

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	$P_k = P\{k = k_{qr2}\}$
1	$k_1 = k_{123}$	1	2	3	$P_1 = P\{k = k_{123}\}$
2	$k_2 = k_{132}$	1	3	2	$P_2 = P\{k = k_{132}\}$
3	$k_3 = k_{213}$	2	1	3	$P_3 = P\{k = k_{213}\}$
4	$k_4 = k_{231}$	2	3	1	$P_4 = P\{k = k_{231}\}$
5	$k_5 = k_{312}$	3	1	2	$P_5 = P\{k = k_{312}\}$
6	$k_6 = k_{321}$	3	2	1	$P_6 = P\{k = k_{321}\}$

Для данного шифра условия совершенности по Шеннону в вероятностной модели шифра Σ_B (т. е. условие для l -грамм при $l = 1$) [1] образуют систему девяти линейных уравнений относительно девяти неизвестных $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, p_1, p_2, p_3$:

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= p_1, & P_3 + P_4 &= p_2, & P_5 + P_6 &= p_3, \\ P_3 + P_5 &= p_1, & P_1 + P_6 &= p_2, & P_2 + P_4 &= p_3, \\ P_4 + P_6 &= p_1, & P_2 + P_5 &= p_2, & P_1 + P_3 &= p_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ – вероятности ключей соответственно $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$; p_1, p_2, p_3 – априорные вероятности шифр-обозначений соответственно 1, 2, 3.

Исключив неизвестные p_1, p_2, p_3 , получим однородную систему шести линейных уравнений относительно шести неизвестных $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$:

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 - P_3 - P_4 &= 0, & P_1 + P_6 - P_2 - P_5 &= 0, \\ P_3 + P_4 - P_5 - P_6 &= 0, & P_5 + P_6 - P_2 - P_4 &= 0, \\ P_3 + P_4 - P_1 - P_6 &= 0, & P_2 + P_4 - P_1 - P_3 &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

главный определитель которой равен нулю. При этом матрица A системы (2) эквивалентна матрице

$$A \sim \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Откуда последовательно находим

$$P_1 = P_5, P_2 = P_6, P_3 = P_6, P_4 = P_5,$$

а именно:

$$P_1 = P_4 = P_5 \text{ и } P_2 = P_3 = P_6.$$

Обозначим $P_1 = P_4 = P_5 = s$ и $P_2 = P_3 = P_6 = t$, где $0 \leq s \leq 1, 0 \leq t \leq 1$. Тогда, учитывая равенства системы (1), получаем, что априорные вероятности шифр-обозначений равны:

$$p_1 = p_2 = p_3 = s + t.$$

Следовательно,

$$p_1 = p_2 = p_3 = \frac{1}{3}$$

и вероятности $P_1 = P_4 = P_5 = s, P_2 = P_3 = P_6 = t$ ключей удовлетворяют условиям:

$$s + t = \frac{1}{3}, \quad s \geq 0, \quad t \geq 0.$$

Заметим, что в крайних случаях $\left(s = \frac{1}{3}, t = 0 \text{ и } s = 0, t = \frac{1}{3}\right)$ получаем минимальные эндоморфные совершенные по Шеннону шифры, соответствующие квазигруппам с таблицами (латинскими квадратами) зашифрования с равновероятными ключами:

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	P_k
1	k_1	1	2	3	1/3
4	k_4	2	3	1	1/3
5	k_5	3	1	2	1/3

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	P_k
2	k_2	1	3	2	1/3
3	k_3	2	1	3	1/3
6	k_6	3	2	1	1/3

При этом данные латинские квадраты 3×3 единственны с точностью до перенумерации строк, т.е. с точностью до перенумерации ключей. Следовательно, матрица зашифрования эндоморфного максимального совершенного по Шеннону шифра с параметрами $\lambda = \mu = 3$, $\pi = 6$ есть выпуклая оболочка матриц зашифрования минимальных эндоморфных совершенных по Шеннону шифров.

Таблица 2

Совершенный шифр при $\lambda = \mu = 3$

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	P_k	$P_k^{(1)}$	$P_k^{(2)}$
1	k_1	1	2	3	P_1	1/3	0
2	k_2	1	3	2	P_2	0	1/3
3	k_3	2	1	3	P_3	0	1/3
4	k_4	2	3	1	P_4	1/3	0
5	k_5	3	1	2	P_5	1/3	0
6	k_6	3	2	1	P_6	0	1/3

Для эндоморфного совершенного по Шеннону шифра с параметрами $\lambda = \mu = 3$ и $\pi = 6$ таблица зашифрования – это таблица 2, в которой точки $P^{(1)}$ и $P^{(2)}$ соответствуют латинским квадратам. С помощью параметров α и β таких, что $\alpha + \beta = 1$, $\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$ и $\alpha = 3s$, $\beta = 3t$, можно записать равенство

$$P = \alpha P^{(1)} + \beta P^{(2)},$$

где $P = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)^T$. Таким образом, доказано

Утверждение 1. Любой эндоморфный совершенный по Шеннону шифр с мощностью множества шифр-величин, равной трем, задается распределением вероятностей

$$P = \alpha P^{(1)} + \beta P^{(2)} = \alpha \left(\frac{1}{3}, 0, 0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0 \right)^T + \beta \left(0, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, 0, \frac{1}{3} \right)^T = \left(\frac{\alpha}{3}, \frac{\beta}{3}, \frac{\beta}{3}, \frac{\alpha}{3}, \frac{\alpha}{3}, \frac{\beta}{3} \right)^T,$$

$\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$, $\alpha + \beta = 1$, лежащим в выпуклой оболочке точек $P^{(1)}$, $P^{(2)} \in \mathbb{R}^6$.

Согласно утверждению 1, множество точек пространства \mathbb{R}^6 , соответствующих эндоморфному совершенному по Шеннону шифру (искомый полиэдр) с параметрами $\lambda = \mu = 3$, $\pi = 6$, – это отрезок в шестимерном пространстве.

В общем случае справедливо

Утверждение 2. Априорные вероятности p_j , $j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений совершенного по Шеннону шифра с мощностью множества шифр-величин, равной λ , и мощностью множества шифр-обозначений, равной μ , удовлетворяют неравенству $p_j \leq \frac{1}{\lambda}$ при $\lambda < \mu$ и равенству $p_j \leq \frac{1}{\lambda}$ при $\lambda = \mu$.

Доказательство. Пусть $\lambda = \mu$. Для данного эндоморфного шифра условия совершенности по Шеннону в вероятностной модели шифра Σ_B (т. е. условие для l -грамм при $l = 1$) [1] образуют систему $\mu! = \lambda!$ однородных линейных уравнений относительно $\mu! + \mu = \lambda! + \lambda$ неизвестных вероятностей P_k ключей $k \in K = \{k_1, k_2, \dots, k_{\mu!}\}$ и априорных вероятностей p_j , $j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений y_1, y_2, \dots, y_{μ} . При этом первые $\lambda = \mu$ уравнений данной системы, в которые входит вероятность p_1 , содержат все вероятности P_k ключей $k \in K$. Действительно, вероятность $P_k = P_{y_1 y_2 \dots y_{\mu}}$ входит в m -е уравнение, где $1 \leq m \leq \lambda$, если в подстановке

$$e_k = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & \lambda \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{\mu} \end{pmatrix}$$

единица в нижней строке значений находится на m -м месте. Так как для каждой такой подстановки существует единственное значение m , где $1 \leq m \leq \lambda$, то соответствующая вероятность $P_k = P_{y_1 y_2 \dots y_{\mu}}$ входит ровно один раз

в первые λ уравнений. Учитывая, что сумма всех вероятностей ключей равна единице, получаем, суммируя первые λ уравнений, $\lambda p_1 = 1$, откуда $p_1 = \frac{1}{\lambda}$. Аналогично проводя рассуждения для каждой априорной вероятности $p_j, j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений y_1, y_2, \dots, y_μ , получаем равенство

$$p_1 = p_2 = \dots = p_\mu = \frac{1}{\lambda},$$

т.е. априорные вероятности $p_j, j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений эндоморфного совершенного по Шеннону шифра с параметрами $\lambda = \mu$ одинаковы и равны $\frac{1}{\lambda}$.

Пусть $\lambda < \mu$. Для данного неэндоморфного шифра условия совершенности по Шеннону в вероятностной модели шифра Σ_B образуют систему $\pi = \mu \cdot (\mu - 1) \cdot \dots \cdot (\mu - \lambda + 1) \leq \mu!$ однородных линейных уравнений относительно $\pi + \mu$ неизвестных вероятностей P_k ключей $k \in K = \{k_1, k_2, \dots, k_\pi\}$ и априорных вероятностей $p_j, j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений y_1, y_2, \dots, y_μ . При этом первые $\lambda < \mu$ уравнений данной системы, в которые входит вероятность p_1 , могут содержать не все вероятности P_k ключей $k \in K$. Действительно, вероятность $P_k = P_{y_1 y_2 \dots y_\mu}$ не входит в первые $\lambda < \mu$ уравнений, если в соответствующей подстановке

$$e_k = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & \mu \\ y_1 & y_2 & \dots & y_\mu \end{pmatrix}$$

единица в нижней строке значений находится на m -м месте, где $\lambda < m < \mu$. Тогда, суммируя первые λ уравнений, получаем неравенство $\lambda p_1 \leq 1$, откуда $p_1 \leq \frac{1}{\lambda}$. Аналогично проводя рассуждения для каждой априорной вероятности $p_j, j = 1, 2, \dots, \mu$, шифр-обозначений y_1, y_2, \dots, y_μ , получаем неравенства

$$p_j \leq \frac{1}{\lambda}, \quad j = 1, 2, \dots, \mu,$$

что и требовалось доказать.

Примеры эндоморфных совершенных шифров

В случае, когда $\lambda = \mu > 3$, выпуклая оболочка совершенных по Шеннону шифров с минимальным числом ключей является лишь частью множества точек, соответствующих совершенным шифрам. Известно, что при $\lambda = \mu = 4$ существуют минимальные (по включению) совершенные шифры, не содержащие в себе наборов ключей (подстановок), образующих латинский квадрат [18].

Пример 1 ([17, 18]). Рассмотрим совершенный эндоморфный шифр с множеством из четырех шифр-величин: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} = \{1, 2, 3, 4\}$ – множество шифр-величин; $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\} = \{1, 2, 3, 4\}$ – множество шифр-обозначений; $K = \{k_1, k_2, \dots, k_\pi\}$ – множество ключей.

Таблица зашифрования данного шифра (таблица 3) составлена из единичной подстановки $e = e_1 = (1)(2)(3)(4)$ и шести полноцикловых подстановок [19] группы S_4 :

$$f_1 = e_2 = (1234), \quad f_2 = e_3 = (1342),$$

$$f_3 = e_4 = (1423), \quad f_4 = e_5 = (1324),$$

$$f_5 = e_6 = (1234), \quad f_6 = e_7 = (1432).$$

Таблица 3

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	x_4	P_k
1	k_1	1	2	3	4	1/4
2	k_2	2	4	1	3	1/8
3	k_3	3	1	4	2	1/8
4	k_4	4	3	1	2	1/8
5	k_5	3	4	2	1	1/8
6	k_6	2	3	4	1	1/8
7	k_7	4	1	2	3	1/8

При этом указанные полноцикловые подстановки $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ группы S_4 обладают свойством: для каждой подстановки f имеется ровно четыре различных других полноцикловых подстановок g_1, g_2, g_3, g_4 таких, что для любого $i, i = 1, 2, 3, 4$, найдется единственное такое значение $j, j = 1, 2, 3, 4$,

что выполняется равенство $f(i) = g_j(i)$. Например, пусть $g_1 = f_3$, $g_2 = f_4$, $g_3 = f_5$, $g_4 = f_6$. Тогда для подстановки f_1 выполняются равенства:

$$f_1(1) = g_3(1) = 2, f_1(2) = g_2(2) = 4,$$

$$f_1(3) = g_1(3) = 1, f_1(4) = g_4(4) = 3.$$

Следовательно, никакая из подстановок g_j , $j = 1, 2, 3, 4$, не может быть включена в латинский квадрат, содержащий подстановку f . Поэтому максимальные четырехстолбцовые латинские прямоугольники в этой таблице состоят из трех строк вида e, f, f^{-1} , а латинских квадратов – нет.

Отметим также, что при $\lambda = \mu > 3$ существуют шифры с равновероятными ключами, не лежащие в выпуклой оболочке совершенных по Шеннону неминимальных по числу ключей шифров [18].

Пример 2. Рассмотрим совершенный эндоморфный шифр при $\lambda = \mu = 4$ с равновероятными ключами и таблицей зашифрования (таблица 4), не содержащей латинских квадратов и составленной из следующих биекций (подстановок) группы S_4 .

Таблица 4

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	x_4	P_k
1	k_1	1	3	2	4	1/8
2	k_2	1	4	3	2	1/8
3	k_3	2	1	3	4	1/8
4	k_4	2	4	1	3	1/8
5	k_5	3	1	4	2	1/8
6	k_6	3	2	4	1	1/8
7	k_7	4	2	1	3	1/8
8	k_8	4	3	2	1	1/8

Это означает, что равновероятность ключей также не приводит к прямому аналогу (обобщению) теоремы Шеннона.

Таблица 5

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	x_4	P_k	$P_k^{(1)}$	$P_k^{(2)}$	$P_k^{(3)}$	P^*
1	k_1	1	2	3	4	P_1	1/4	1/4	0	1/6
2	k_2	1	2	4	3	P_2	0	0	0	0
3	k_3	1	3	2	4	P_3	0	0	1/8	1/24
4	k_4	1	3	4	2	P_4	0	0	0	0
5	k_5	1	4	2	3	P_5	0	0	0	0
6	k_6	1	4	3	2	P_6	0	0	1/8	1/24
7	k_7	2	1	3	4	P_7	0	0	1/8	1/24
8	k_8	2	1	4	3	P_8	0	0	0	0
9	k_9	2	3	1	4	P_9	0	0	0	0
10	k_{10}	2	3	4	1	P_{10}	1/4	1/8	0	1/8
11	k_{11}	2	4	1	3	P_{11}	0	1/8	1/8	1/12
12	k_{12}	2	4	3	1	P_{12}	0	0	0	0
13	k_{13}	3	1	2	4	P_{13}	0	0	0	0
14	k_{14}	3	1	4	2	P_{14}	0	1/8	1/8	1/12
15	k_{15}	3	2	1	4	P_{15}	0	0	0	0
16	k_{16}	3	2	4	1	P_{16}	0	0	1/8	1/24
17	k_{17}	3	4	1	2	P_{17}	1/4	0	0	1/12
18	k_{18}	3	4	2	1	P_{18}	0	1/8	0	1/24
19	k_{19}	4	1	2	3	P_{19}	1/4	1/8	0	1/8
20	k_{20}	4	1	3	2	P_{20}	0	0	0	0
21	k_{21}	4	2	1	3	P_{21}	0	0	1/8	1/24
22	k_{22}	4	2	3	1	P_{22}	0	0	0	0
23	k_{23}	4	3	1	2	P_{23}	0	1/8	0	1/24
24	k_{24}	4	3	2	1	P_{24}	0	0	1/8	1/24

Так как множество точек π_{\max} -мерного пространства, соответствующих совершенным шифрам, образует выпуклое множество (полиэдр), то и выпуклая оболочка этих точек также соответствует совершенным шифрам [17].

Пример 3. Рассмотрим совершенный эндоморфный шифр при $\lambda = \mu = 4$, таблица зашифрования (таблица 5) которого составлена из всех подстановок группы S_4 .

Таблица 5 дополнена также столбцами $P_k^{(1)}, P_k^{(2)}, P_k^{(3)}$, которые представляют собой точки в 24-мерном пространстве \mathbb{R}^{24} . Так, точка $P_k^{(1)}$ соответствует латинскому квадрату (таблица 6), точка $P_k^{(2)}$ соответствует совершенному шифру с таблицей 3 зашифрования, а точка $P_k^{(3)}$, соответствует совершенному шифру с таблицей 4 зашифрования.

Таблица 6

№	$K \setminus X$	x_1	x_2	x_3	x_4	P_k
1	k_1	1	2	3	4	1/4
2	k_2	2	3	4	1	1/4
3	k_3	3	4	1	2	1/4
4	k_4	4	1	2	3	1/4

Используя параметры α, β и γ , такие, что $\alpha + \beta + \gamma = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0, \gamma \geq 0$, можно записать равенство

$$P = \alpha P^{(1)} + \beta P^{(2)} + \gamma P^{(3)},$$

где $P = (P_1, P_2, \dots, P_{24})^T$, задающее все совершенные шифры, лежащие в выпуклой оболочке точек $P^{(1)}, P^{(2)}, P^{(3)}$ – вершин полиэдра, соответствующих

совершенным шифрам с таблицами зашифрования 6, 3, 4.

Столбец P^* таблицы 5 задает распределение вероятностей эндоморфного совершенного по Шеннону шифра с мощностью множества шифр-величин, равной четырем, при $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$.

Поиски правильной формулировки аналога (обобщения) теоремы Шеннона на основе транзитивных шифров также не позволяют дать исчерпывающее описание совершенных по Шеннону эндоморфных шифров. В [18] показано, что не всякий транзитивный шифр является совершенным при некотором распределении вероятностей ключей. Существуют примеры [18] минимальных (по включению) транзитивных шифров, которые не могут быть совершенными ни при каких распределениях вероятностей. При этом из их таблиц зашифрования невозможно извлечь латинский квадрат.

Таким образом, в работе рассмотрена проблема построения совершенных по Шеннону шифров. В терминах комбинаторного анализа выпуклых множеств многомерного пространства получены аналоги теоремы Шеннона для совершенных неминимальных шифров. Показано, что даже для эндоморфных совершенных неминимальных шифров нет прямого аналога теоремы Шеннона. Также в работе приведены таблицы зашифрования совершенных шифров, готовые к непосредственному применению при организации канала связи на транспорте. ■

Литература

1. Зубов А. Ю. Совершенные шифры. М. : Гелиос АРВ, 2003. 160 с. ISBN 5-854338-076-5.
2. Шеннон К. Теория связи в секретных системах // Работы по теории информации и кибернетике. М. : Наука, 1963. С. 333–402.
3. Андреев Н. Н., Петерсон А. П., Прянишников К. В., Старовойтов А. В. Основоположник отечественной засекреченной телефонной связи // Радиотехника. 1998. № 8. С. 8–12.
4. Goldlewsky P., Mitchell C. Key-minimal cryptosystems for unconditional secrecy // Journal of Cryptology. 1990. P. 1–25.
5. Stinson D. R. Cryptography: Theory and practice // CRC Press, N. Y. 1995. 616 p.
6. M. De Soete. Some constructions for authentication-secrecy code // Proceedings of Crypto'87; Advances in Cryptology. 1998. P. 57–75.
7. Stinson D. R. A construction for authentication secrecy codes from certain combinatorial designs // Proceedings of Crypto'87 ; Advances in Cryptology. 1998. P. 355–366.
8. Брассар Ж. Современная криптология. М. : Полимед. 1999. 268 с.

9. Алферов А. П., Zubov A. Ю., Кузьмин А. С., Черемушкин А. В. Основы криптографии. М. : Гелиос АРВ. 2001. 480 с.
10. Бабаш А. В., Шанкин Г. П. Криптография (аспекты защиты). М. : СОЛОН-Р. 2002. 512 с. ISBN 5-93455-135-3.
11. Титов С. С., Гутарин Д. С., Коновалова С. С., Титов Е. С., Тимин В. И. Комбинаторные проблемы существования совершенных шифров // Труды ИММ УрО РАН. 2008. Т. 13. № 4. С. 61–73. ISSN 0134-4889.
12. Медведева Н. В., Титов С. С. О неминимальных совершенных шифрах // Прикладная математика. Приложение. 2013. № 6. С. 42–44. ISSN 2226-308X.
13. Медведева Н. В., Титов С. С. Неэндоморфные совершенные шифры с двумя шифр-величинами // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2015. С. 63–66. ISSN 2226-308X.
14. Медведева Н. В., Титов С. С. Описание неэндоморфных максимальных совершенных шифров с двумя шифр-величинами // Прикладная дискретная математика. 2015. № 4(30). С. 43–55. ISSN 2071-0410.
15. Birkhof G. D Tres observations sobre el algebra lineal // Revista Universidad Nacional Tucuman. 1946. Ser. A. V 5. P. 147–151.
16. Носов В. А., Сачков В. Н., Тараканов В. Е. Комбинаторный анализ (неотрицательные матрицы, алгоритмические проблемы) // Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика». М. : ВИНТИ, 21. 1977. С. 120–178.
17. Медведева Н.В., Титов С.С. Аналогии теоремы Шеннона для эндоморфных неминимальных шифров // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2016. С. 62–65. ISSN 2226-308X.
18. Медведева Н.В. Об аналогах теоремы Шеннона для совершенных шифров // CEUR Workshop Proceedings. 2016. Т. 1825. С. 232–239. ISSN 1613–0073.
19. Погорелов Б.А. Основы теории групп подстановок. Ч. I. Общие вопросы. М. : 1986. 316 с.

Literature

1. Zubov A. Yu. Perfect cyphers. [Sovershennyye shifry] M.: Gelios ARV, 2003. 160 p. ISBN 5-854338-076-5.
2. Shennon K. Communication theory in secret systems // Works on information and cybernetics. [Teoriya svyazi v sekretnykh sistemakh // Raboty po teorii informacii i kibernetike.] M. : Nauka, 1963. pp. 333–402.
3. Andreev N. N., Peterson A. P., Pryanishnikov K. V., Starovojtov A. V. The founding father of indigenous Russian secure telephone communication // Radiotechnics. [Osnovopolozhnik otechestvennoj zasekrechennoj telefonnoj svyazi // Radiotekhnika.] 1998. № 8. pp. 8–12.
4. Goldlewsky P., Mitchell C. Key-minimal cryptosystems for unconditional secrecy // Journal of Cryptology. 1990. P. 1–25.
5. Stinson D. R. Cryptography: Theory and practice// CRC Press, N. Y. 1995. 616 p.
6. M. De Soete. Some constructions for authentication-secrecy code // Proceedings of Crypto'87; Advances in Cryptology. 1998. P. 57–75.
7. Stinson D. R. A construction for authentication secrecy codes from certain combinatorial designs // Proceedings of Crypto'87 ; Advances in Cryptology. 1998. P. 355–366.
8. Brassar Zh. Modern cryptology. [Sovremennaya kriptologiya] M. : Polymed. 1999. 268 p.
9. Alferov A. P., Zubov A. Yu., Kuz'min A. S., Cheremushkin A. V. Fundamentals of cryptography. [Osnovy kriptografii] M. : Helios ARV. 2001. 480 p.
10. Babash A. V., Shankin G. P. Cryptography (aspects of protection). [Kriptografiya (aspekty zashchity)]M. : SOLON-R. 2002. 512 p. ISBN 5-93455-135-3.
11. Titov S. S., Gutarin D. S., Konovalova S. S., Titov E. S., Timin V. I. The combinatorial problems of existence of perfect cyphers // Proceedings of Institute of mathematics and mechanics of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences. [Kombinatornye problemy sushchestvovaniya sovershennykh shifrov // Trudy IMM UrO RAN] 2008. V. 13. № 4. pp. 61–73. ISSN 0134-4889.
12. Medvedeva N. V., Titov S. S. Concerning non-minimal perfect cyphers // Applied mathematics. Appendix. [O neminimal'nykh sovershennykh shifrah // Prikladnaya matematika. Prilozhenie.] 2013. № 6. С. 42–44. ISSN 2226-308X.

13. Medvedeva N.V., Titov S.S. Non-endomorphic perfect cyphers with two two-valued plaintext alphabet // Applied discrete mathematics. Appendix. [Neendomorfnye sovershennyye shifry s dvumya shifrvelichinami // Prikladnaya diskretnaya matematika. Prilozhenie.] 2015. pp. 63–64. ISSN 2226-308X.
14. Medvedeva N. V., Titov S. S. Description of non-endomorphic maximum perfect cyphers with two-valued plaintext alphabet // Applied discrete mathematics. [Opisanie neendomorfnykh maksimal'nykh sovershennykh shifrov s dvumya shifrvelichinami // Prikladnaya diskretnaya matematika.] 2015. № 4 (30). pp. 43–55. ISSN 2071-0410.
15. Birkhof G. D Tres observations sobre el algebra lineal // Revista Universidad Nacional Tucuman. 1946. Ser. A. V 5. P. 147–151.
16. Nosov V. A., Sachkov V. N., Tarakanov V. E. Combinatorial analysis (non-negative matrices, algorithmic problems) // Findings of science and technics. «Theory of probabilities. Mathematical statistics. Theoretical cybernetics» series. [Kombinatornyy analiz (neotricatel'nye matricy, algoritmicheskie problemy) // Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Teoriya veroyatnostej. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika»] M. : All-Russian Institute for Scientific and Technical Information, 21. 1977. pp. 120–178.
17. Medvedeva N. V., Titov S. S. Analogues for the Shannon theorem for endomorphic non-minimal cyphers // Applied discrete mathematics. Appendix. [Analogi teoremy Shennona dlya endomorfnykh neminimal'nykh shifrov // Prikladnaya diskretnaya matematika. Prilozhenie.] 2016. pp. 62–65. ISSN 2226-308X.
18. Medvedeva N. V. Concerning analogues of the Shannon theorem for perfect cyphers [Ob analogah teoremy Shennona dlya sovershennykh shifrov] // CEUR Workshop Proceedings. 2016. T. 1825. pp. 232–239. ISSN 1613–0073.
19. Pogorelov B. A. Fundamentals of substitution group theory. [Osnovy teorii grupp podstanovok.] P. I. General questions. M. : 1986. 316 p.

Статья сдана в редакцию 26 февраля 2019 года

0,84 а. л.

УДК 621.43.001.53

*А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, К. В. Глемба, Д. Б. Власов,
А. Г. Карпенко, В. В. Руднев*

Поэтапное моделирование процесса подачи топлива электрических насосов роликового объемного типа

UDC 621.43.001.53

*A. M. Plaksin, A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, D. B. Vlasov,
A. G. Karpenko, V. V. Rudnev*

Stepwise simulation of fuel flow input of volumetric roller electric pumps

Аннотация

Методом моделирования исследуется поэтапное движение топлива по топливным трубопроводам системы пита-

ния – элементам топливного бака, фильтру грубой очистки, электрическому топливному насосу, фильтру тонкой очистки до топливной рампы

с форсунками. Исследования позволяют выявить причины неисправностей и их взаимосвязь, влияющие на изменение параметров давле-

Статья рекомендована к публикации В.И. Васильевым, д-ром техн. наук, профессором Курганского государственного университета. E-mail: vviprof@rtural.ru.

Алексей Михайлович Плаксин, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Эксплуатация машинно-тракторного парка»; ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ; Челябинск, Россия. E-mail: plaksin-am@mail.ru.

Александр Владимирович Гриценко, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Автомобильный транспорт» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; профессор кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Челябинск, Россия. E-mail: alexgrits13@mail.ru.

Константин Вячеславович Глемба, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автомобильный транспорт» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»; доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Челябинск, Россия. E-mail: glemba77@mail.ru.

Дмитрий Борисович Власов, ассистент; кафедра «Технология и организация технического сервиса» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»; Челябинск, Россия. E-mail: dimon.vlasoff2012@yandex.ru.

Анатолий Григорьевич Карпенко, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автомобильный транспорт, информационные технологии и методика обучения техническим дисциплинам», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет (ЧГПУ); Челябинск, Россия. E-mail: angr123@list.ru.

Валерий Валентинович Руднев, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Автомобильный транспорт, информационные технологии и методика обучения техническим дисциплинам», ФГБОУ ВО Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет (ЧГПУ); Челябинск, Россия. E-mail: ru.dnev@v@mail.ru.

The article is recommended for publishing by V. I. Vasiliev, Doctor of technical science, Professor, Kurgan state university. E-mail: vviprof@rtural.ru.

Alexey Mikhailovich Plaksin, Doctor of tech.science, Professor, Operation of Machine and Tractor Fleet Department, Southern Ural SAU; Chelyabinsk, Russia. E-mail: plaksin-am@mail.ru.

Alexander Vladimirovich Gritsenko, Doctor of tech.science, Professor, Automobile Transport Department, Southern Ural state university; Professor of Operation of Machine and Tractor Fleet Department, Southern Ural state agrarian university; Chelyabinsk, Russia. E-mail: alexgrits13@mail.ru.

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, Cand.of tech.science, Associate Professor of Automobile Transport Department, Southern Ural state university; Associate Professor of Operation of Machine and Tractor Fleet, Southern Ural state agrarian university; Chelyabinsk, Russia. E-mail: glemba77@mail.ru.

Dmitry Borisovich Vlasov, Assistant of the Technology and Organization of Technical Service, Southern Ural state agrarian university; Chelyabinsk, Russia. E-mail: dimon.vlasoff2012@yandex.ru.

Anatoly Grigorievich Karpenko, Cand.of tech. science, Associate Professor of Automobile Transport, Information Technology and Methods of Teaching Technical Disciplines, Southern Ural state humanitarian and pedagogical university; Chelyabinsk, Russia. E-mail: angr123@list.ru.

Valery Valentinovich Rudnev, Cand.of tech. cience, Associate Professor of Automobile Transport, Information Technology and Methods of Teaching Technical Disciplines, Southern Ural state humanitarian and pedagogical university; Chelyabinsk, Russia. E-mail: rudnev@v@mail.ru.

ния в системе топливоподачи, расход топлива, функционирование электрического топливного насоса роликового объемного типа. Так, на процесс подачи топлива сильно воздействуют засоренность сетки фильтров грубой и тонкой очистки, износ конструктивных параметров крыльчатки насосов [1]. В работе представлены схематические и математические модели, позволяющие описать взаимосвязь параметров подачи топлива, оборотов ротора электрического насоса и его электрических параметров в зависимости от уровня технического состояния топливной системы. От работы топливного насоса зависит правильность функционирования всей топливной системы, например, при аварийном состоянии электрического насоса объемного роликового типа бензиновый двигатель работает неустойчиво, с перебоями, постоянно глохнет, не поддерживает максимальную частоту вращения коленчатого вала. Теоретические исследования позволили выявить закономерность влияния степени засоренности топлив-

ной системы и изношенности конструктивных параметров электрических насосов роликового типа на уровень давления в топливной системе и прочие режимные параметры, в том числе и на величину потребляемой энергии электрическим насосом.

Ключевые слова: топливная система, загрязнение, сопротивление, электрический топливный насос, износ, подача, давление, сила тока, напряжение.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-44-55

Annotation

Stepwise fuel flow through feeding system fuel pipes (fuel tank elements, coarse-mesh filter, electric fuel pump, fine mesh filter towards the fuel rail with nozzles) is studied with the help of simulation method. The investigation data make it possible to reveal the causes of faults and their interrelation, influencing the pressure parameters change in the fuel flow input system, fuel consumption, functioning of volumetric roller electric fuel pump. The process of fuel flow input is severely affected by dirtiness of strainers of

both coarse and fine mesh filters, deterioration of design factors of a pump impeller [1]. The paper contains schematic and mathematical models, enabling to describe interrelation of fuel flow input parameters, electric pump rotor speed and its electric parameters depending on the level of fuel system technical condition. Fuel pump functioning influences operation of the whole fuel system, for example, in case of malfunction a fuel pump is functioning unsteadily, intermittently, is constantly cutting off, fails to keep up the maximum shaft speed. Theoretical investigations made it possible to detect regularities of influence of fuel system dirtiness extent and deterioration of design factors of roller electric pumps on pressure level in fuel system and other operating parameters, including the consumed power value.

Key words: fuel system, dirtiness, resistance, electric fuel pump, deterioration, input, pressure, current intensity, voltage.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-44-55

Изучение причин неисправности и отказов в системе питания автомобиля показало, что одним из возможных источников служит электрический топливный насос (ЭТН) [2, 3]. Наиболее частая неисправность ЭТН и причина его преждевременного выхода из строя заключается в загрязнении топливных каналов крупными и мелкими частицами, способствующими износу. Причинами функциональных неисправностей и повреждений ЭТН также может быть загрязненное или смешанное с водой топливо, вызывающее 50 % отказов в работе системы питания двигателя. Загрязнение воздействует различным образом: забивание

фильтров, уменьшение объема подачи, повышение уровня шума, работа насоса всухую, блокирование ротора – все это может привести к остановке двигателя. Дифференцированное исследование процесса подачи топлива позволит выявить причины и закономерности изменения параметров работы ЭТН (объем подачи топлива Q (л/ч), давление в топливной системе P (кПа), силу тока в цепи питания I (А), напряжения питания U (В), сопротивление в обмотке электродвигателя R (Ом)).

Цель исследований: изучить процесс поэтапной подачи топлива в системе питания двигателя и определить закономерности изменения параметров

работы ЭТН на разных режимах, которые могли бы привести к выходу его из строя.

Рассмотрим элементы топливной системы бензинового ДВС, состоящей из бака, фильтра грубой очистки (ФГО), ЭТН, фильтра тонкой очистки (ФТО), топливопровода, рампы, регулятора давления с форсунками, обратного топливопровода в виде функциональной схемы (рис. 1).

Дифференцированное исследование процесса подачи топлива позволит упростить анализ физических закономерностей при формировании давления топлива в топливной магистрали, а также установить однозначные связи между техническим состоянием ЭТН системы топливоподачи и двигателем [4, 5]. Для этого разделим процесс подачи топлива на ряд участков (А, В, С), позволяющих исследовать работу всех элементов системы питания: участок А – движение топлива от бака до ЭТН, В – движение топлива от ЭТН до

ФТО, С – движения топлива от ФТО до топливной рампы с форсунками [6–8]. Эти участки имеют различные местные сопротивления (фильтры, утечки в насосе), сечение и длину. Очевидно, что полная потеря напора на элементе А–В–С равна сумме потерь напора во всех последовательно соединенных участках. Рассмотрим участок А (рис. 2).

Первичный элемент системы топливоподачи (СТ), через который проходит полный объем подаваемого топлива, – топливный ФГО, расположенный перед полостью всасывания насосом топлива. Основной характеристикой этого фильтра служит гидравлическое сопротивление при прохождении топлива. Пропускная способность фильтра должна быть достаточной, чтобы обеспечивать работу двигателя при максимальных оборотах коленчатого вала [9–11]. Из-за высокого сопротивления в полости всасывания (например, засор сетки топливного фильтра) насосы работают всухую, перегреваясь, и затем выходят из строя.

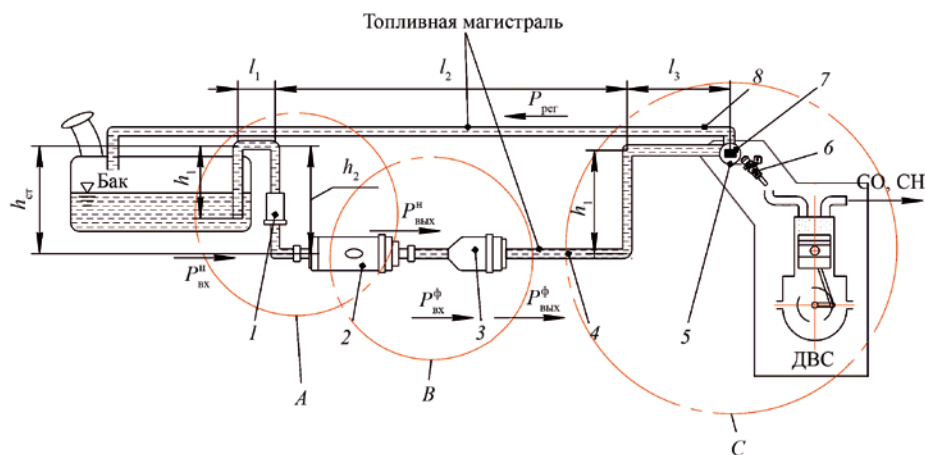


Рис. 1. Функциональная схема системы топливоподачи

1 – фильтр грубой очистки; 2 – ЭТН; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – топливопровод; 5 – рампа; 6 – форсунки; 7 – регулятор давления; 8 – обратный топливопровод; $P^н_{вх}$, $P^н_{вых}$ – давление на входе и выходе, создаваемые насосом, кПа; $P^ф_{вх}$, $P^ф_{вых}$ – давление на входе в фильтр и на выходе из него, кПа; $P_{пер}$ – давление после регулятора, кПа; $h_{ст}$ – высота системы топливоподачи, мм; h_1 – высота участка всасывания топлива, мм; l_1 – длина подачи топлива от бака до ФГО, мм; h_2 – высота опускания топлива и прохождения его через ФГО до уровня насоса, мм; l_2 – длина движения топлива через ЭТН и ФТО, мм; h_3 – высота подъема топлива до уровня рампы, мм; l_3 – длина движения топлива до рампы, мм; А, В, С – участки разделения

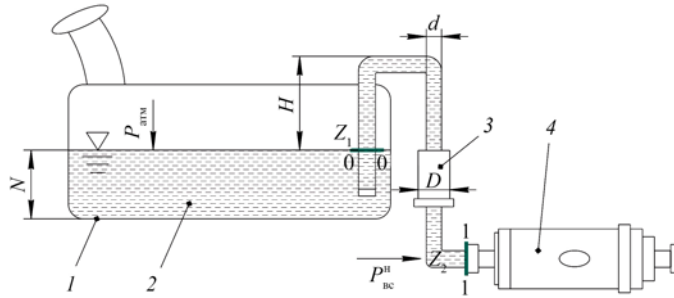


Рис. 2. Процесс всасывания топлива и его прохождения через ФГО (участок А)

1 – топливный бак; 2 – топливо; 3 – ФГО; 4 – ЭТН;

H – высота подъема топлива насосом, м; N – уровень топлива, м; d – диаметр топливопровода, м; D – диаметр ФГО, м; $P_{атм}$ – атмосферное давление на уровне залитого топлива, Н/м²; $P_{вс}$ – давление всасывания насосом, Н/м²; z_1, z_2 – высоты расположения сечений, м

Поэтому следует рассмотреть работу ЭТН при различном техническом состоянии топливного фильтра грубой очистки.

Опишем движение топлива на участке 0-1 уравнением Бернулли:

$$\frac{P_{атм}}{\rho g} = H + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{Q^2}{2gS^2} + \lambda \frac{lQ^2}{2dgS^2} + \varepsilon \frac{Q^2}{2gS^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность топлива, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; P_2 – давление всасывания насосом, Н/м² ($P_2 = P_{вс}$); λ – коэффициент Дарси для топливопровода; ε – коэффициент сопротивления на сетке топливного фильтра; Q – расход топлива через ФГО, м³/с; l – длина топливопровода на участке, м; S – площадь сечения топливопровода, м²; d – диаметр топливопровода, м.

Этим уравнением можно выразить величину расхода топлива через фильтр грубой очистки (м³/с):

$$Q = \sqrt{\frac{2g(H_{вас} - H)S^2}{\left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \varepsilon\right)}}, \quad (2)$$

где $H_{вас}$ – вакууметрическая высота всасывания, м; H – высота подъема топлива насосом, м.

Расход топлива Q через фильтр грубой очистки прямо пропорционально влияет на частоту вращения ротора насоса $n_{р.н}$ (мин⁻¹), а также на давление объемного насоса $P_{эtn}$ в системе топливоподачи:

$$n_{р.н} = \frac{60Q}{V_0}, \quad (3)$$

где V_0 – объем полостей между роликами ЭТН, м³/об.

$$P_{эtn} = \frac{Q^2 \rho}{2\mu^2 S^2}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода топлива (0,8 ед.).

Для определения влияния на сигнал давления в топливной магистрали технического состояния ЭТН следует рассмотреть его насосную часть, расположенную на валу электродвигателя (рис. 3) [12–14]. Давление насосом создается благодаря перекачиванию топлива насосной частью 3 и 8 (крыльчаткой), а именно, с помощью роликов 9 захватывается жидкость из полости всасывания и перемещается в топливопровод [15]. При этом происходят торцевой и радиальный износ роликов, вызывая торцевые и радиальные утечки Q_y^p , Q_y^r [16, 17].

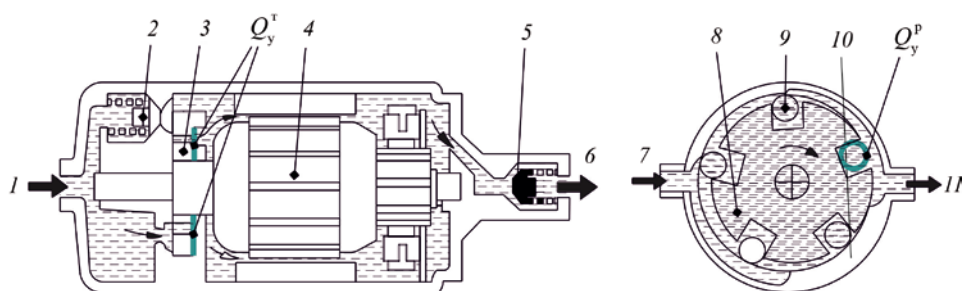


Рис. 3. Нагнетающая полость ЭТН

1 – впускной штуцер; 2 – предохранительный клапан; 3 – роторный насос; 4 – якорь электродвигателя; 5 – обратный клапан; 6 – выпускной клапан; 7 – сторона впуска; 8 – диск ротора; 9 – ролик; 10 – корпус насоса; 11 – сторона нагнетания; Q_y^p , Q_y^r – торцевые и радиальные утечки, л/ч

Давление объемного насоса $P_{ЭТН}$ представляют как разность между давлением на выходе из насоса $P_{вых}^H$ и давлением на входе в него $P_{вх}^H$ [18] с учетом потерь энергии при работе насоса, кПа:

$$P_{ЭТН} = P_{вых}^H - P_{вх}^H + \rho g(z_{вых} - z_{вх}) + \frac{\rho \alpha (v_{вых}^2 - v_{вх}^2)}{2}, \quad (5)$$

где $P_{вых}^H$, $P_{вх}^H$ – давление на выходе из насоса и на входе в него, кПа; $z_{вых}$, $z_{вх}$ – высоты центра тяжести сечений на выходе из насоса и входе в него относительно выбранной плоскости сравнения, м; α – коэффициент Кориолиса; $v_{вых}$, $v_{вх}$ – средние скорости жидкости на выходе из насоса и входе в него, м/с.

Находим КПД насоса:

$$\eta = \frac{Q_p - Q_y}{Q_p} = \frac{N_{пол} - N_{пот}}{N_{пол}}, \quad (6)$$

где Q_p , Q_y – объем реальной подачи и объем утечек, л/ч; $N_{пол}$, $N_{пот}$ – мощность полезная и мощность потерь, Вт.

Определим полезную мощность $N_{пол}$ (Вт) и мощность потерь $N_{пот}$ (Вт):

$$N_{пол} = P_{ЭТН} \cdot Q_p, \quad (7)$$

$$N_{пот} = N_{гид} + N_{эл}, \quad (8)$$

где $N_{гид}$, $N_{эл}$ – затраты мощности ЭТН на гидравлические потери и потери на обмотке ротора насоса, Вт.

Рассмотрим участок на входе в ФТО (рис. 4). На пути следования к топливным форсункам топливо проходит через топливный ФТО, обеспечивающий выполнение очень важной функции – фильтрацию топлива от продуктов внешней среды, но также создающий и сопротивление потоку топлива.

Перепад давления ΔP (кПа) на элементе ФТО в рабочем режиме определяется по формуле:

$$\Delta P_{фто} = P_{вх}^{\Phi} - P_{вых}^{\Phi}. \quad (9)$$

Перепад давления при засорении паровых каналов ФТО составит (по М. А. Григорьеву):

$$\Delta P_{фто} = \frac{\omega \mu}{k} R_{\Phi} l_{\Phi}, \quad (10)$$

где k – удельная пропускная способность фильтра; ω – скорость движения жидкости в фильтре, м/с; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; R_{Φ} – радиус фильтра, м; l_{Φ} – длина фильтра, м.

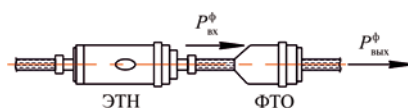


Рис. 4. Функциональная схема на входе в ФТО (участок В)

$P_{вх}^{\Phi}$ – давление на входе в фильтр, кПа;
 $P_{вых}^{\Phi}$ – давление на выходе из фильтра, кПа

Таким образом, на элементе ФТО происходит перепад давления, который зависит от его технического состояния (степени засоренности поровых каналов).

Рассмотрим участок, на котором происходит реальная подача топлива форсунками Q_{ϕ} (л/ч) (рис. 5). С учетом неисправной работы предыдущих участков, где происходят утечки между роликами и корпусом ЭТН, засоряются топливные фильтры, что сопровождается перепадом давления, в топливную рампу двигателя подается топливо насосом Q_n^p (кПа), объем которого значительно меньше необходимого нормативного Q_n^n (кПа). Поэтому реальная подача топлива форсунками Q_{ϕ}^p (л/ч) ограничена реальной подачей насосом Q_n^p (л/ч). При этом не обеспечивается качественное распыление топлива, оно окисляется некачественно [19, 20], как следствие, увеличиваются выбросы токсических газов CO, CH в атмосферу [21, 22]. В результате перепада подачи топлива форсунками ΔQ_{ϕ} происходит неустойчивая работа ДВС, он не развивает максимальных оборотов [23, 24], под нагрузкой происходят перебои и провалы [25, 26].

Гидравлическое сопротивление на всех участках СТ и износ насосной ча-

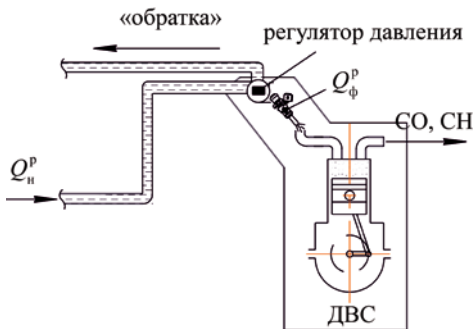


Рис. 5. Функциональная схема конечного участка подачи топлива (участок С)

Q_n^p – реальная подача топлива ЭТН, кПа;
 Q_{ϕ}^p – реальная подача топлива форсунками, кПа; CO, CH – отработавшие газы, % и млн частиц

сти ЭТН изменяются, поэтому будут изменяться и электрические параметры в цепи питания насоса (сила тока I (А) и напряжение питания U (В)). Эти структурные параметры можно соотнести с косвенными параметрами – давлением в топливной системе P (кПа) и подачей топлива Q (л/ч). Следует рассмотреть их взаимосвязь, используя уравнение баланса энергии источника тока ЭТН ($E_{\text{под}}$) с затраченной энергии по перемещению жидкости в топливной магистрале ($E_{\text{пер}}$), Дж:

$$E_{\text{под}} = E_{\text{пер}}, \quad (11)$$

где $E_{\text{под}}$ – подведенная энергия к ЭТН, Дж; $E_{\text{пер}}$ – затраченная энергия по перемещению жидкости в топливопроводе, Дж.

Опишем выражение подведенной энергии $E_{\text{под}}$, Дж:

$$E_{\text{под}} = IUt, \quad (12)$$

где I – сила тока, потребляемая ЭТН, А; U – напряжение питания ЭТН, В; t – время работы насоса, с.

Опишем баланс затраченной энергии $E_{\text{пер}}$, Дж:

$$E_{\text{пер}} = E_{\text{эл.пот}} + E_{\text{гид.пот}} + A, \quad (13)$$

где $E_{\text{эл.пот}}$ – энергия потерь в электрических цепях насоса, Дж; $E_{\text{гид.пот}}$ – затраты энергии на гидравлические потери, Дж; A – полезная работа ЭТН, Дж.

Рассмотрим энергию на потери в электрических цепях насоса $E_{\text{эл.пот}}$, Дж:

$$E_{\text{эл.пот}} = N_{\text{эл.пот}} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (14)$$

где R – сопротивление на обмотке ротора, Ом; $N_{\text{эл.пот}}$ – мощность, затрачиваемая на потери в электрических цепях насоса, Вт.

Рассмотрим энергию потерь жидкости в насосе $E_{\text{гид.пот}}$, Дж:

$$E_{\text{гид.пот}} = N_{\text{гид.пот}} \cdot t, \quad (15)$$

где $N_{\text{гид.пот}}$ – мощность затрачиваемая на потери жидкости в насосе, Вт.

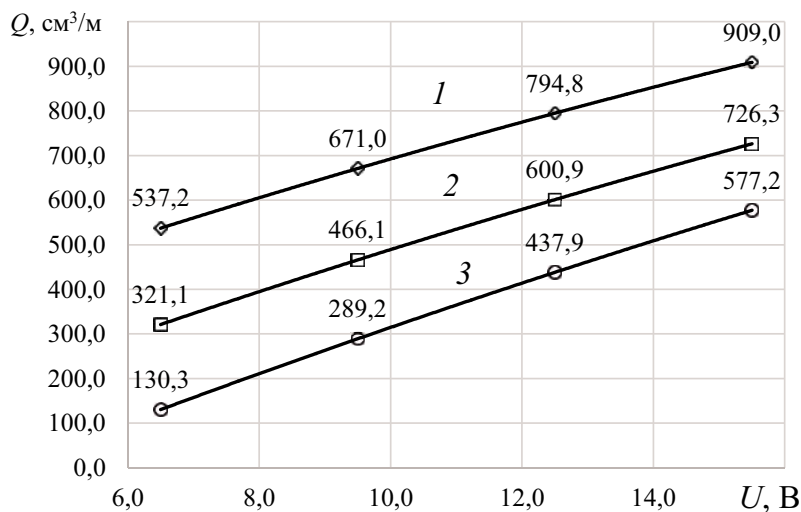


Рис. 6. Зависимость изменения объема утечек топлива Q (см³/мин) от напряжения питания ЭБН U (В) при имитации износа его насосной части (эквивалент зазору с сечением 0,785 мм²) и степени засоренности (эквивалент площади остаточного сечения: 1 – 0,07 мм²; 2 – 0,385 мм²; 3 – 1,13 мм²)

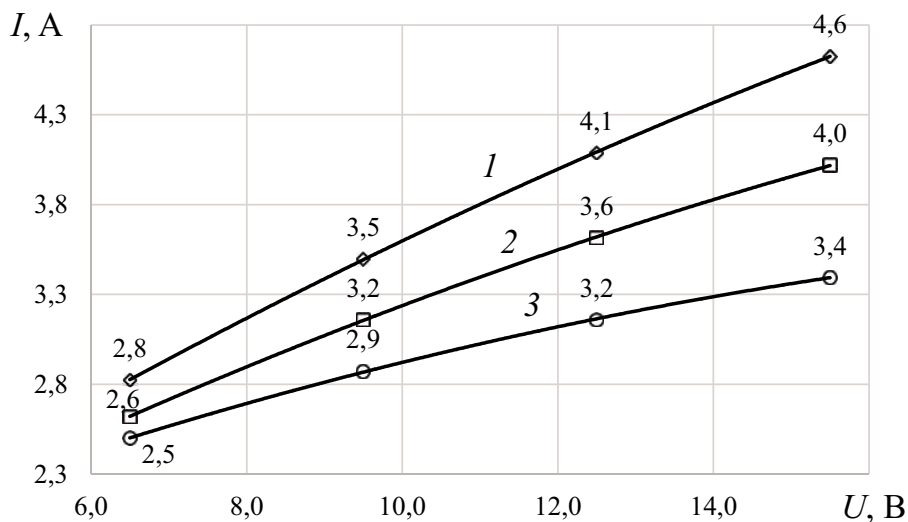


Рис. 7. Вольтамперная характеристика, показывающая зависимость изменения величины силы тока I (А) от напряжения питания ЭТН U (В) при имитации износа его насосной части (эквивалент зазору с сечением 0,785 мм²) и степени засоренности (эквивалент площади остаточного сечения: 1 – 0,07 мм²; 2 – 0,385 мм²; 3 – 1,13 мм²)

Рассмотрим полезную работу ЭТН А, Дж:

$$A = Q_p \Delta P_{\text{ст}} t = \mu S t \sqrt{\frac{2 \Delta P_{\text{ст}}^3}{\rho}}, \quad (16)$$

где Q_p – объем реальной подачи топлива, л/ч; $\Delta P_{\text{ст}}$ – перепад давления на участках СТ, кПа; μ – коэффициент расхода топлива; S – площадь сечения зазоров в топливопроводе (либо между роликами и корпусом в ЭТН), м²; ρ – плотность топлива, кг/м³.

После всех преобразований получим выражение мощности гидравлических потерь жидкости $N_{\text{гид.пот}}$, Вт:

$$N_{\text{гид.пот}} = I(U - IR) - \mu S \sqrt{\frac{2 \Delta P_{\text{ст}}^3}{\rho}}. \quad (17)$$

Таким образом, получена математическая зависимость затрат мощности ЭТН на гидравлические потери от электрических параметров приводного двигателя (I , U , R) и технического состояния его основных элементов (S , ΔP).

Как показывают экспериментальные исследования, проведенные на двигателе ЗМЗ-406.2 с роликовым топливным насосом, установленным снаружи топливного бака, ЭТН потребляет силу тока до 4,6 А при имитации различной засоренности топливной системы. Таким образом, увеличение противодействия в СТ вызывает рост тока питания ЭТН. При имитации износа насосной части ЭТН количество топлива, необходимое для нормальной работы, в рампу не поступает, и сила тока при этом незначительна (меньше номинального значения

потребления). Например, при наибольших утечках сила тока равна 2,5 А при напряжении питания 12,5 В.

Результаты эксперимента в виде зависимости изменения величин утечек топлива и силы тока от напряжения питания при имитации износа насосной части ЭТН (эквивалент зазору сечением 0,785 мм²) и степени засоренности (эквивалент остаточного сечения 0,07, 0,385 и 1,13 мм²) представлены на рис. 6, 7.

В ходе дифференцированного исследования участков топливной системы от топливного бака до топливных форсунок (участки А–В–С) выявлено, что суммарная потеря давления P (кПа) и подачи топлива Q (л/ч) на всем участке равна сумме потерь давления и подачи во всех последовательно соединенных участках. Так, на участке А при загрязнении ФГО возникает сопротивление протеканию топлива через него, из-за чего насосы работают всухую, перегреваются и заклинивают. При рассмотрении ЭТН в его насосной части ясно, что происходят радиальный и торцевой износ роликов, причем с увеличением рабочей температуры износ может формироваться существенно интенсивнее. Участок В характеризуется засорением ФТО, из-за чего на выходе давление $P_{\text{вых}}^{\Phi}$ может быть предельно низким. На конечном участке С к форсункам поступает реальный объем топлива $Q_{\text{ф}}^{\text{р}}$, который ограничен реальной (пониженной) величиной подачи насоса $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$. Неисправности в СТ ведут к неустойчивой работе двигателя, снижению оборотов при возрастающей нагрузке. ■

Литература

1. Пласкин А. М., Гриценко А. В., Запечалов М. В., Костюченков Н. В. Производственный потенциал сельского хозяйства: этапы развития, состояние, проблемы модернизации : учебное пособие. Челябинск : ЮУрГАУ, 2018. 291 с. ISBN 978-5-88156-798-9.
2. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Диагностирование системы топливоподачи ДВС на тестовых режимах : м-лы Международн. научн.-техн. конф. Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. С. 9–13. ISBN 978-5-88156-739-2.
3. Гриценко А. В., Глемба К. В. Разработка мероприятий по обеспечению нагрузочных режимов в процессе диагностирования двигателей : м-лы Международн. научн.-практ. конф. Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. С. 108–114. ISBN 978-5-9961-1339-2.

4. Бакайкин Д. Д. Разработка тестовых приемов диагностирования автомобилей : м-лы Международн. научн.-практич. конф. Челябинск : ЮУрГАУ, 2017. С. 19–23. ISBN 978-5-88156-769-9.
5. Плаксин А. М., Гриценко А. В., Глемба К. В., Лукомский К. И., Шепелёв В. Д. Тестовые методы диагностирования систем двигателей внутреннего сгорания автомобилей : монография. Челябинск : ЮУрГАУ, 2016. 210 с. ISBN 978-5-88156-729-3.
6. Гриценко А. В., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Результаты экспериментальных исследований пропускной способности электромагнитных форсунок : сб. научн. тр. «Инжиниринг, инновации, инвестиции» / под ред. В.В. Ерофеева. Челябинск, 2013. С. 59–64. ISBN 978-5-904593-41-4.
7. Гриценко А. В., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Теоретическое исследование процесса топливоподачи электромагнитной форсунки : сб. научн. тр. «Инжиниринг, инновации, инвестиции» / под ред. В.В. Ерофеева. Челябинск, 2013. С. 53–58. ISBN 978-5-904593-41-4.
8. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В. Диагностирование электромагнитных форсунок легковых автомобилей : сб. научн. тр. «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». Воронеж : ВГЛТА, 2015. Т. 3. № 4-1 (15-1). С. 164–168. ISSN 2308-8877.
9. Бакайкин Д. Д., Куков С. С., Гриценко А. В. Техническое обслуживание элементов системы топливоподачи бензинового двигателя с электронной системой управления // Вестник ЧГАУ, 2006. Т. 47. С. 10–13. ISBN 5-88156-373-5.
10. Гриценко А. В., Куков С. С., Глемба К. В., Бакайкин Д. Д. Диагностирование пропускной способности электромагнитных форсунок : Международн. научн.-практ. конф. «Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса». : КузГТУ, 2013. С. 91–96.
11. Бакайкин Д. Д., Гриценко А. В., Абросимов Д. А. Диагностирование электромагнитных форсунок ДВС на тестовых режимах. Челябинск : ЮУрГАУ, 2015. Т. 72. № 1. С. 16–18. ISSN 2587-8824.
12. Гриценко А. В., Власов Д. Б. Определение технического состояния электрических бензонасосов на тестовых режимах его диагностирования : сб. научн. тр. «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика». Воронеж : ВГЛТА, 2017. Т. 5. № 6 (32). С. 190–196. ISSN 2308-8877.
13. Способ диагностирования электробензонасосов системы топливоподачи автомобиля : пат. на изобретение 2477384 Рос. Федерация. № 2012109956 ; заявл. 14.03.12 ; опубл. 10.03.13. Бюл. № 7.
14. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Исследование режимов работы электрических бензиновых насосов автомобилей при искусственном формировании гидравлического сопротивления // Вестник УрГУПС, 2016. № 2 (30). С. 47–55. ISSN 2079-0392.
15. Гриценко А. В., Глемба К. В., Власов Д. Б. Выявление скрытых отказов электрических топливных насосов мобильных энергетических средств в сельском хозяйстве методом тестового диагностирования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2018. № 11. С. 50–57. ISSN 2074-9635.
16. Гриценко А. В., Власов Д. Б., Глемба К. В. Исследование изменения параметров работы объемного электрического бензонасоса в режимах имитации сопротивления топливоподачи : м-лы Международн. научн.-техн. конф. Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2018. С. 94–98. ISBN 978-5-9961-1661-8.
17. Гриценко А. В., Лукомский К. И., Власов Д. Б., Глемба К. В. Тестовое диагностирование электрических топливных насосов // АПК России, 2017. Т. 24. № 5. С. 1161–1167. ISSN 2587-8824.
18. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Методика и результаты диагностирования электрических насосов автомобилей : сб. научн. тр. «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования». Воронеж : ВГЛУ, 2015. Т. 2. № 2. С. 419–424. ISSN 2409-7829.
19. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Шефер Л. А., Салимоненко Г. Н., Карпенко А. Г., Руднев В. В., Назаров М. В. Контроль экологических параметров автомобиля при имитации различных режимов нагружения ДВС методом создания сопротивления на выпуск // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2018. № 8. С. 85–95. ISSN 2077-7175.

20. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Шефер Л. А., Салимоненко Г. Н., Карпенко А. Г., Руднев В. В. Исследование экологических параметров бензинового ДВС при имитации различных режимов нагружения // Транспорт Урала, 2018. № 3 (58). С. 58–63. ISSN 1815-9400.
21. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Исследование способа повышения экологичности и экономичности автотранспорта на тестовых режимах холостого хода работы двигателя внутреннего сгорания // Транспорт Урала, 2016. № 1 (48). С. 97–102. ISSN 1815-9400.
22. Гриценко А. В., Глемба К. В., Ларин О. Н. Экологические аспекты и вопросы диагностирования систем ДВС автотранспорта в рабочем и тестовом режимах : Международн. научн.-практ. конф. «Инновации и исследования в транспортном комплексе». Курган : УрО РАО ; Барнаул : Принтэкспресс, 2014. С. 225–231. ISBN 978-5-904064-10-5.
23. Кожанов В. Н., Петелин А. А., Гриценко А. В., Шепелёв В. Д. Снижение токсичности отработавших газов дизельного двигателя путем отключения части его цилиндров // Вестник ЮУрГУ, 2018 ; Сер. : Машиностроение. Т. 18. № 2. С. 34–44. ISSN 1990-8504.
24. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vozmilov A. G. Improving the car environmental qualities by studying the engine load characteristics in the modes of injection rate off // Transportation Research Procedia, 2018. Vol. 36. Pp. 237–244.
25. Plaksin A., Gritsenko A., Glemba K. Experimental studies of cylinder group state during motoring // Procedia Engineering, 2016. Vol. 150. Pp. 1188–1191.
26. Gritsenko A., Kukov S., Glemba K. Theoretical Underpinning of Diagnosing the Cylinder Group During Motoring // Procedia Engineering, 2016. Vol. 150, Pp. 1182–1187.

Literature

1. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Zapevalov M., Kostyuchenkov N. V. Production possibilities of agriculture: development stages, condition, problems of modernization: [Proizvodstvennyy potencial sel'skogo hozyajstva: etapy razvitiya, sostoyanie, problemy modernizacii] teaching aid. – Chelyabinsk, 2018. 291 p. ISBN 978-5-88156-798-9.
2. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V. Diagnostics of fuel input in testing modes [Diagnostirovanie sistemy toplivopodachi DVS na testovyh rezhimakh] / Mat-s of Internat. scient. and technical conf., Chelyabinsk, SUSAU, 2016. С. 9–13. ISBN 978-5-88156-739-2.
3. Gritsenko A. V., Glemba K. V. Elaboration of measures to provide load modes during diagnostics of engines [Razrabotka meropriyatij po obespecheniyu nagruzochnyh rezhimov v processe diagnostirovaniya dvigatelej] / Mat-s Internat. scient. and technical conf., Chelyabinsk, SUSAU, 2017. P. 108–114. ISBN 978-5-9961-1339-2.
4. Bakaikin D. D. Elaboration of testing techniques of diagnostics of automobiles [Razrabotka testovyh priemov diagnostirovaniya avtomobilej] / Mat-s Internat. scient. and technical conf., Chelyabinsk, SUSAU, 2017. P. 19–23. ISBN 978-5-88156-769-9.
5. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Lukomsky K. I., Shepelev V. D. Testing methods of automobile internal combustion engine systems diagnostics [Testovye metody diagnostirovaniya sistem dvigatelej vnutrennego sgoraniya avtomobilej]: monograph. – Chelyabinsk: SUSAU, 2016. 210 p. ISBN 978-5-88156-729-3.
6. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Results of experimental studies of electromagnetic nozzle flow capacity [Rezultaty eksperimental'nyh issledovanij propuskoj sposobnosti elektromagnitnyh forsunok] / Collection of scientific papers edited by V. V. Yerofeyeva: Engineering, innovations, investments. Chelyabinsk, 2013. P. 59–64. ISBN 978-5-904593-41-4.
7. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Theoretical studies of electromagnetic nozzle fuel input process [Teoreticheskoe issledovanie processa toplivopodachi elektromagnitnoj forunki] / Col. of scient.papers / edited by V. V. Yerofeyeva: Engineering, innovations, investments. – Chelyabinsk, 2013. P. 53–58. ISBN 978-5-904593-41-4.
8. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V. Diagnostics of automobile electromagnetic nozzles // Up-to-date trends of 21st century scientific investigations [Diagnostirovanie elektromagnitnyh forsunok legkovykh avtomobilej : sb. nauchn. tr. «Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika»]: theory and practice, 2015. V. 3. № 4-1 (15-1). P. 164–168. ISSN 2308-8877.
9. Bakaikin D. D., Kukov S. S., Gritsenko A. V. Technical maintenance of fuel input system elements of fuel engines with electronic control system // Herald of ChSAU, 2006.

- [ekhnicheskoe obsluzhivanie elementov sistemy toplivopodachi benzinovogo dvigatelya s elektronnoy sistemoy upravleniya // Vestnik ChGAU, 2006.] V. 47. P. 10–13. ISSN 5-88156-373-5.
10. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Glemba K. V., Bakaikin D. D. Diagnostics of flow capacity of electromagnetic nozzles / Internat. scient. & practical conf. "Challenges of development and safety of automobile transport complex". [Diagnostirovanie propusknosti elektromagnitnyh forsunok : Mezhdunarodn. nauchn.-prakt. konf. «Perspektivy razvitiya i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa».] Novokuznetsk, KuzSTU, 2013. P. 91–96.
 11. Bakaikin D. D., Gritsenko A. V., Abrosimov D. A. Diagnostics of electromagnetic nozzles in testing modes [Diagnostirovanie elektromagnitnyh forsunok DVS na testovyh rezhimakh.] // Russia's AIC, 2015. V. 72. № 1. P. 16–18.
 12. Gritsenko A. V., Vlasov D. B. Determination of technical condition of electric fuel pumps in testing modes of its diagnostics // Up-to-date trends of 21st century scientific investigations: theory and practice. 2017. [Opredelenie tekhnicheskogo sostoyaniya elektricheskikh benzonasosov na testovyh rezhimakh ego diagnostirovaniya : sb. nauchn. tr. «Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika».] V. 5. №6 (32). P. 190–196. ISSN 2308-8877.
 13. A technique for diagnosis of electric fuel pumps of automobile fuel input system: patent 2477384 Rus. Federation. [Sposob diagnostirovaniya elektrobenzonasosov sistemy toplivopodachi avtomobilya : pat. na izobretenie 2477384 Ros. Federaciya. № 2012109956] № 2012109956 ; decl. 14.03.12; pub. 10.03.13, Bul. № 7.
 14. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Studies of operational modes of automobile electric fuel pumps in artificial formation of hydraulic resistance // Herald of USURT. 2016. [Issledovanie rezhimov raboty elektricheskikh benzinovyh nasosov avtomobilej pri iskusstvennom formirovanii gidravlicheskogo soprotivleniya // Vestnik UrGUPS, 2016] № 2 (30). P. 47–55. ISSN 2079-0392.
 15. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vlasov D. B. Detection of hidden faults of electric fuel pumps of mobile power devices in agriculture by testing diagnostics // Electrical equipment: operation and repairs. 2018. [Vyyavlenie skrytyh otkazov elektricheskikh toplivnyh nasosov mobil'nyh energeticheskikh sredstv v sel'skom hozyajstve metodom testovogo diagnostirovaniya // Elektrooborudovanie: ekspluataciya i remont, 2018] № 11. P. 50–57. ISSN 2074-9635.
 16. Gritsenko A. V., Vlasov D. B., Glemba K.V. Studies of operational parameters change of the volumetric electric fuel pump in emulation modes of fuel input resistance / Mat-s of Internat. scient.&tech.conf. Tyumen : Tyumen industrial university, 2018. [Issledovanie izmeneniya parametrov raboty ob"emnogo elektricheskogo benzonasosa v rezhimakh imitacii soprotivleniya toplivopodachi : m-ly Mezhdunarodn. nauchn.-tekhn. konf. Tyumen' : Tyumenskij industrial'nyj universitet, 2018.] P. 94–98. ISBN 978-5-9961-1661-8.
 17. Gritsenko A. V., Lukomski K. I., Vlasov D. B., Glemba K. V. Testing diagnostics of electric fuel pumps. [Testovoe diagnostirovanie elektricheskikh toplivnyh nasosov] Russia' AIC, 2017. V. 24. № 5. P. 1161–1167. ISSN: 2587-8824.
 18. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Methods and results of automobile electric pump diagnostics / Alternative power sources in transport and technological complex: problems and prospects of rational usage. [Metodika i rezul'taty diagnostirovaniya elektricheskikh nasosov avtomobilej : sb. nauchn. tr. «Al'ternativnye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskom komplekse: problemy i perspektivy racional'nogo ispol'zovaniya».] Voronezh : VGLU, 2015. V. 2. № 2. P. 419–424. ISSN 2409-7829.
 19. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Shefer L. A., Salimonenko G. N., Karpenko A. G., Rudnev V. V., Nazarov M. V. Control over automobile environmental parameters in emulation of different modes of loading by the method of output resistance // Intellect. Innovations. Investments, [Kontrol' ekologicheskikh parametrov avtomobilya pri imitacii razlichnyh rezhimov nagruzheniya DVS metodom sozdaniya soprotivleniya na vypusk // Intellect. Innovacii. Investicii] 2018. №8. P. 85–95. ISSN 2077-7175.
 20. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Shefer L. A., Salimonenko G. N., Karpenko A. G., Rudnev V. V. Investigation of fuel ICE environmental parameters in emulation of loading different modes [Issledovanie ekologicheskikh parametrov benzinovogo DVS pri imitacii razlichnyh rezhimov nagruzheniya] // Transport of the Urals, 2018. № 3 (58). P. 58–63. ISSN 1815-9400.

21. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N., Kukov S. S., Bakaikin D. D. Studies of ways to increase automobile transport environmental friendliness and efficiency in testing modes of internal combustion engine idling cycle [Issledovanie sposobov povysheniya ekologichnosti i ekonomichnosti avtotransporta na testovykh rezhimakh holostogo hoda raboty dvigatelya vnutrennego sgoraniya] // Transport of the Urals, 2016. № 1 (48). P. 97–102. ISSN 1815-9400.
22. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Larin O. N. Ecological aspects and issues of automobile transport ICE systems diagnostics in operational and testing modes / International scient.& pract. conf. "Innovations and investigations in transport complex". [Ekologicheskie aspekty i voprosy diagnostirovaniya sistem DVS avtotransporta v rabochem i testovom rezhimakh : Mezhdunarodn. nauchn.-prakt. konf. «Innovacii i issledovaniya v transportnom komplekse»] – Kurgan ; RAT UrB : Printexpress (Barnaul), 2014. P. 225–231. ISBN 978-5-904064-10-5.
23. Kozhanov V. N., Petelin A. A., Grutsenko A. V., Shepelev V. D. Reduction of diesel engine exhaust gases toxicity by switching some of its cylinders off [Snizhenie toksichnosti otrabotavshikh gazov dizel'nogo dvigatelya putem otklyucheniya chasti ego cilindrov] // Herald of SUSU, 2018. – Ser. : Mechanical Engineering. V. 18. № 2. P. 34–44. ISSN 1990-8504.
24. Gritsenko A. V., Glemba K. V., Vozmilov A. G. Improving the car environmental qualities by studying the engine load characteristics in the modes of injection rate off // Transportation Research Procedia, 2018. Vol. 36. Pp. 237–244.
25. Plaksin A., Gritsenko A., Glemba K. Experimental studies of cylinder group state during motoring // Procedia Engineering, 2016. Vol. 150. Pp. 1188–1191.
26. Gritsenko A., Kukov S., Glemba K. Theoretical Underpinning of Diagnosing the Cylinder Group During Motoring // Procedia Engineering, 2016. Vol. 150, Pp. 1182–1187.

Статья сдана в редакцию 1 апреля 2019 года

1 а. л.

УДК 625.1

А. И. Скутин, М. М. Мыльников

Моделирование вертикальных и поперечных воздействий в балластном слое

UDC 625.1

A. I. Skutin, M. M. Mylnikov

Simulation of vertical and transverse exposures in ballast bed

Аннотация

Рассмотрены технические параметры и требования, предъявляемые к балластному слою. Проанализированы данные по загрязнению железнодорожных путей на действующих и предремонтных участках и неисправностях, возникающих из-за эксплуатации балласта с отступлением от нормативных условий. Проведен анализ поперечной устойчивости балластного слоя под нагрузкой, рассмотрены расчетные методики и способы оценки стабильности балластных материалов.

Для выяснения истинного поведения балласта разработан лабораторный стенд – короб с подвижной стенкой, в котором испытывался щебень разных фракций с изменяемой влажностью. Физическая модель, используемая в стенде, описывает работу балластного слоя в элементарном сечении железнодорожного пути под поездной нагрузкой. По результатам моделирования определены критические поперечные силы, возникающие в балластном слое до разрушения.

В ходе экспериментов получены зависимости разрушающих нагрузок от поперечных сил для фракций балласта 2–5 и 5–10 мм, находящихся во влажном и сухом состояниях. Эти зависимости можно рассматривать как сдвигающие и удерживающие силы в балластном слое. Выявлены тенденции развития остаточных деформаций при различных фракциях балласта, влияние влажности на несущую способность балластного материала.

Ключевые слова: балласт, поперечная устойчивость, испытательный стенд, влажность, щебень.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-56-65

Annotation

Technical parameters and requirements to the ballast bed are overviewed. The data on contamination of railway tracks at operating and pre-repair sections and breakdowns due to the use of ballast with deviation from normative conditions are analyzed. The analysis of transverse steadiness of the ballast bed under load was made, computational methods and evaluation techniques of stability of ballast materials are looked upon.

In order to find true ballast behavior a laboratory bench was worked out – a container with a movable boundary where crushed ballast of different fractions with varying moisture was tested. The physical model used in the bench describes functioning of the ballast bed in the railway track elementary cross-section under train load. According to the results of simulation critical transverse forces are determined emerging in the ballast bed prior to destruction.

During experiments dependences of destructive loads on transverse forces for ballast fractions 2-5 and 5-10 mm in moist and dry conditions are obtained. These dependences can be seen as displacing and restraining forces in the ballast bed. Development tendencies of residual deformations in different ballast fractions, exposure of moisture to ballast load-bearing capability.

Key words: ballast, transverse steadiness, testing bench, moisture, crushed ballast.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-56-65

Статья рекомендована к публикации Г.Л. Аккерманом, д-ром техн. наук, профессором, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: GAKkerman@usurt.ru.

Александр Иванович Скутин, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: askutin@usurt.ru.

Максим Михайлович Мыльников, аспирант; кафедра «Путь и железнодорожное строительство» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: mmmlynikov@yandex.ru.

The article is recommended for publishing by G.L. Akkerman, Doctor of technical science, Professor, Ural state university of railway transport. E-mail: GAKkerman@usurt.ru.

Alexander Ivanovich Skutin, Cand. of tech. science, Associate Professor, Railway Track and Construction Department, Ural state university of railway transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: askutin@usurt.ru.

Maxim Mikhailovich Mylnikov, Post Graduate Student; Railway Track and Construction Department, Ural state university of railway transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: mmmlynikov@yandex.ru.

Балластный слой верхнего строения железнодорожного пути предназначен для равномерного распределения поездной нагрузки на земляное полотно, удерживания шпал против поперечного и продольного сдвигов и поддержания упругой работы подвижного состава и пути. Для выполнения этих функций к балластному слою предъявляются технические требования.

В СНиП 32-01-95 описаны конструктивные параметры балластного слоя для строящихся и реконструируемых участков пути: толщина балласта под шпалой, ширина балластной призмы и крутизна ее откосов [1]. В СП 238.1326000.2015 указаны материалы для сооружения балластной призмы: щебень 1-й или 2-й категории или гравийно-песчаная смесь [2]. При использовании в балластной призме щебня параметры балластного материала должны удовлетворять требованиям ГОСТ 7392-2014. Согласно ему, для железнодорожного пути используется щебень со следующими физико-механическими и гранулометрическими свойствами [3]: размер зерен не менее 22,4 и не более 63 мм, содержание частиц менее 0,5 и 0,16 мм не более 5 и 1 % по массе соответственно, содержание зерен пластинчатой и игловатой формы не более 18 % по массе, содержание зерен длиной более или равных 100 мм не более 6 % по массе, содержание дробленых зерен не более 50 % по массе (для валунов и гравия), отсутствуют органические примеси (для щебня из осадочных и метаморфических горных пород), отсутствует глина в комках, содержание зерен слабых пород не более 5 % по массе, потеря массы после испытания на копре и в полочном барабане не более 10,5 и 20 % соответственно, марка по морозостойкости не ниже F300, средняя плотность зерен 2,4 г/см³; электрическая проводимость 0,32 См/м, эффективная активность ЕРН А 740 Бк/кг. Эти параметры справедливы как для нового, так и для очищенного балласта при реконструкции путей, что позволяет их совместное использование.

Для строящихся линий укладка смешанного щебня не допускается [2].

При эксплуатации балластный слой загрязняется, его периодически необходимо очищать или заменять. В «Положении о системе ведения путевого хозяйства» [4] устанавливаются межремонтные сроки облуживания балласта. Так, при капитальном ремонте пути заменяется балласт – восстанавливается несущая способность балластной призмы. При среднем ремонте после очистки восстанавливаются дренирующие и прочностные свойства балластной призмы [4]. Критерий выбора участка для очистки балласта – загрязненность щебня (при 30%-ной и более загрязненности балласта путь подлежит ремонту). Заменять балласт необходимо и при наличии зерен слабых пород, если фракция балласта не соответствует ГОСТу, если требуется заменить асбестовый или другие виды балласта на щебень [4]. Нормативный срок службы в зависимости от класса пути составляет 400–1500 млн т брутто (18–40 лет).

Итак, к балластному слою предъявляется весьма узкий круг требований. К основным можно отнести: конструктивные размеры балластной призмы и фракционную градацию балластного материала, упругость, водопроницаемость, загрязненность, форму зерен.

На железных дорогах России предельное загрязнение балласта происходит раньше, чем наступает время очередного ремонта. Для путей пяти-, шестилетней эксплуатации загрязнение балласта достигает 38 %. Для Транссибирской и Среднесибирской магистралей предельные значения загрязненности достигаются при пропущенных тоннажах 500 и 800 млн т брутто [5]. Данные геологических изысканий на участках пути Свердловской железной дороги, находящихся на стадии преддверия капитального ремонта, показывают практически полное отсутствие нормативной фракции 25–60 мм – доля загрязнителей на таких участках достигает 77 % [6]. По данным Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры, на

путях 3-4 класса установленный порог загрязненности превышен на 20 и более процентов при величине пропущенного тоннажа менее нормативного [7]. Балластная призма в этих случаях эксплуатируется с отступлением от нормативных требований. Загрязнение балласта неизбежно, и, если нельзя вовремя провести техническое обслуживание для его очистки, то необходимо изучать влияние загрязнителей на поведение балласта под поездной нагрузкой.

Нарушение нормативных условий эксплуатации приводит к серьезным последствиям: потеря устойчивости пути, как следствие, сходы и крушения поездов. По данным 2017 г., 11 % аварий связаны с большими поперечными нагрузками на путь и возникновением выбросов [8]. Малый срок безотказной работы балласта – одна из основных проблем верхнего строения пути [9]. Высокие расходы на эксплуатацию железнодорожного пути связывают с геотехническими проблемами в балластном слое [10], например, недостаточное боковое сопротивление балластной призмы против поперечного сдвига, вызванное наличием органических и внешних загрязнителей [11]. Как правило, потеря устойчивости происходит в местах локального ослабления сопротивляемости пути, обусловленного ослаблением связей шпалы с балластом при ремонтных работах [12]. Величины перемещений пути на участках, где производилось разрыхление балласта, в период стабилизации пути могут достигать 30 мм [13]. Техническое обслуживание пути, направленное на очистку и/или замену балласта, – необходимая статья расходов текущего содержания. Снижение эксплуатационных расходов – приоритетная задача для железнодорожной сферы. Для ее решения необходимо найти (выбрать) способ увеличения надежности балластного слоя, обеспечивающий совместную бесперебойную работу элементов верхнего строения пути. Значит, необходимо иметь ясную картину работы балластного слоя, понимать, какие

факторы влияют на работу балластного материала и от чего зависит сопротивляемость балластной призмы внешним нагрузкам.

Анализ литературных источников показал, что в основном детально изучаются внешние аспекты работы балластного слоя, т.е. совместная работа балласта и элементов пути. Так, например, установлено, что сопротивление сдвигу, приходящееся на каждую шпалу, уменьшается с увеличением количества сдвигаемых шпал; сопротивление зависит от ширины слоя балласта в направлении сдвига, т.е. от размера плеча балластной призмы [14]. Исследователи рассмотрели стабилизацию пути на асбестовом балласте, установили влияние величины пропущенного тоннажа на сопротивление балластной призмы поперечному сдвигу [15]. Исследовано влияние внешних нагрузок на горизонтальные перемещения балластной призмы (получены графики зависимостей максимальных сил сопротивления сдвигу от вертикальной нагрузки) [16]. Однако пока остаются открытыми вопросы работы балластного материала; неизвестно, каким образом взаимодействуют сами балластные зёрна, т.к. свойства и характеристики балластных материалов мало изучены. Этим объясняется недостаточное информативное наполнение государственного стандарта, регулирующего применение балластных материалов на железных дорогах. Без полного представления о влиянии параметров (характеристик) балласта на его работу невозможно уверенно прогнозировать устойчивость рельсошпальной решетки в потенциально опасном (ослабленном) сечении. Методики оценки поперечной устойчивости позволяют точно оценивать устойчивость пути с учетом сопротивляемости балласта лишь по всей длине участка [12].

Сопротивляемость балласта рассматривается как способность балластного слоя без разрушения перерабатывать (перераспределять) внешние нагрузки на нижележащий слой. Максимальные

силы сопротивления сдвигу моделировались в реальных условиях полигонов и в лабораториях [14–16] с использованием различных экспериментальных стендов и установок. Как правило, рассматривались следующие виды балластов: песок, асбест, гравий, ракушечник, комбинированные балласты, щебень. Но многие аспекты, влияющие на работу балласта, не изучены, соответственно, не отражены в нормативных документах [17].

Для определения горизонтальных напряжений в балласте авторами настоящей статьи предложен лабораторный стенд для моделирования поведения балласта под нагрузкой. Отличительная особенность стенда – небольшой размер ($50 \times 25 \times 25$ см). Это позволяет выполнять множество испытаний при малых временных затратах (рис. 1).

Испытательный стенд представляет собой короб с тремя неподвижными стенками и одной подвижной. Подвижная

стенка разделяет короб на два отсека ($25 \times 25 \times 25$ см). В первый отсек загружается балластный материал, на который подается нагрузка с известным весом. Во второй отсек устанавливается противовес – набор грузов с известным весом.

Предлагаемая физическая модель позволяет описывать работу балластного слоя в конкретном элементарном сечении железнодорожного пути (рис. 2).

Поездная нагрузка 1 (рис. 2, а) оказывает давление через рельсы и шпалы на балластный слой 2 (рис. 2, а). В балластном слое возникают поперечные сдвигающие силы $F_{\text{сд}}$, стремящиеся сместить частицы балласта в сторону. Плечо балластной призмы 3 (рис. 2, а) стремится воспрепятствовать движению балластных частиц через удерживающую силу $F_{\text{уд}}$.

В лабораторном стенде (рис. 2 б, в) этот процесс моделируется. Вместо поездной нагрузки используются грузы 1

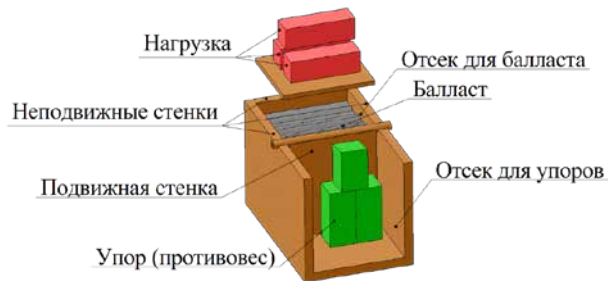


Рис. 1. Схема испытательного стенда

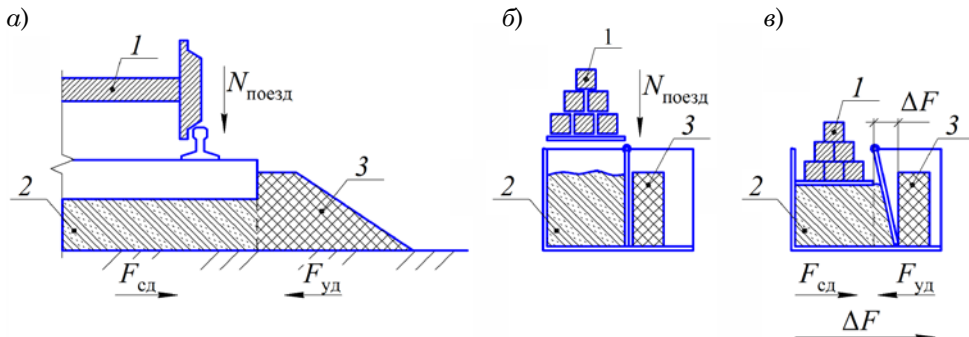


Рис. 2. Физическая модель появления поперечных сил

а – верхнее строение пути под поездной нагрузкой; б – физическая модель испытательного стенда до разрушения; в – физическая модель испытательного стенда после разрушения

(рис. 2, б, в). Работу плеча балластной призмы имитирует противовес \mathcal{Z} (рис. 2, б, в). Движение подвижной стенки Δl обуславливают силы $\Delta F = F_{\text{сд}} - F_{\text{уд}}$, которые не могут быть скомпенсированы, потому что балласт находится в неудовлетворительных условиях. То есть на балласт влияют вредные факторы, уменьшающие его несущую способность (недостаточное плечо балластной призмы, повышенные нагрузки от подвижного состава, загрязненность, засоренность, влажность и другие).

Для выявления степени влияния поперечных сил, возникающих в балластной призме под нагрузкой, проведен ряд испытаний.

Для первой серии экспериментов в качестве балластного заполнителя принят щебень из твердых горных пород. Балластный материал отсортирован на две фракции (от 2 до 5 мм и от 5 до 10 мм). Влажность балласта – 0 % по массе, то есть полностью сухой.

Для определения диапазона возникновения критических поперечных сил

проведены испытания с различным соотношением прилагаемой нагрузки $F_{\text{сд}}$ и весом противовесов $F_{\text{уд}}$.

При увеличении вертикальной нагрузки $F_{\text{сд}}$ возникают критические поперечные силы $F_{\text{уд}}$, которые не может компенсировать противовес. В таком случае подвижная стенка распаивается (это действие называется потерей устойчивости).

В ходе экспериментов прилагалась нагрузка до 60 кг, что соответствует фактической нагрузке около 1,2 т/м². Результаты испытаний представлены на рис. 3.

Из графиков (рис. 3) видно, что при увеличении веса упора (противовеса) возрастает удерживающая сила. Балласт при этом выдерживает более высокую нагрузку до разрушения. При увеличении фракции балласта в два раза несущая способность балластной призмы увеличивается на 150 %, что обусловлено использованием противовеса с большей массой. При увеличении нагрузки поведение балласта

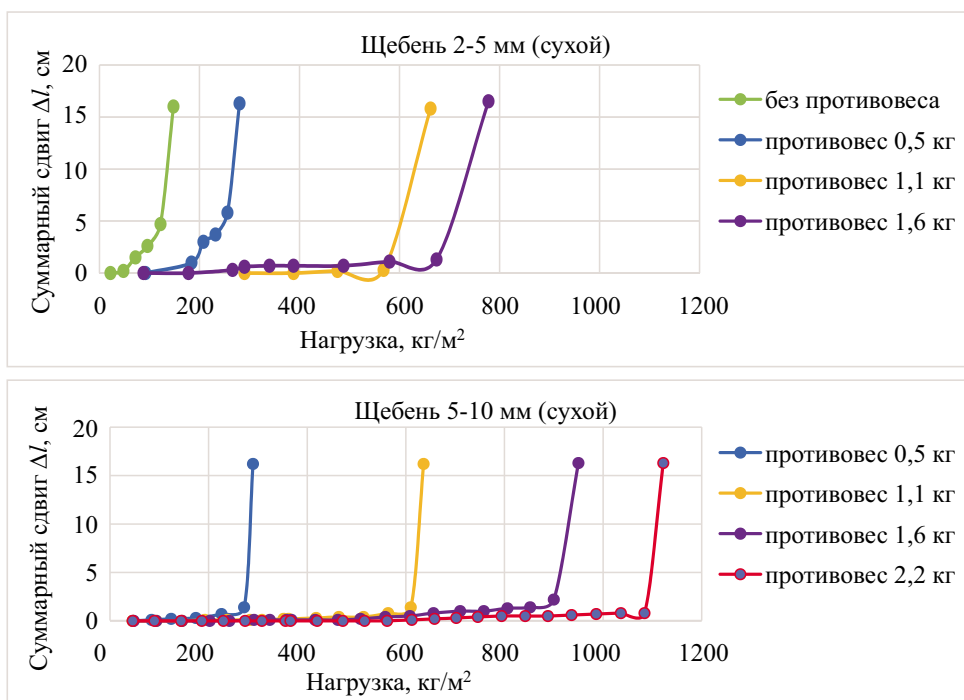


Рис. 3. Результаты испытаний сухого балласта

стабилизируется, деформации накапливаются равномернее. Увеличиваются интервалы до потери устойчивости при разных противовесах: для фракции 2–5 мм ступень нагрузки до разрушения на каждые 0,5 кг составляет в среднем 180 кг/м^2 , для фракции 5–10 мм этот параметр равен 270 кг/м^2 . Полученные данные свидетельствуют, что увеличение фракции балласта увеличивает сопротивляемость балластной призмы к внешним нагрузкам; таким образом, увеличивается в целом несущая способность верхнего строения пути.

Следующая серия испытаний проводилась для балласта с повышенной влажностью. С учетом большого количества пор в щебне удалось добиться влажности балластного материала фракции 2–5 мм до 10 % от веса, общего по массе. Для фракции щебня 5–10 мм создать условия повышенной влажности не удалось – вода полностью просачивалась сквозь поры. Авторы полагают, это явление связано применением чистого щебня, на зернах которого практически отсутствовали мелкие частицы и другие загрязнители, что значительно снизило возможность смачиваемости. Поэтому эта серия испытаний проводилась только для балласта фракции 2–5 мм.

Результаты испытаний балласта с повышенной влажностью представлены на рис. 4.

Влияние влажности на поведение балласта отражается в неравномерно-

сти интервалов до потери устойчивости при разных противовесах по сравнению с сухим балластом. Изменение ступени нагрузки от среднего значения шага нагружения до разрушения для сухого балласта варьируется от 50 до 128 кг/м^2 , для влажного – от 6 до 194 кг/м^2 , то есть возникает неравномерность поведения балласта при равномерном увеличении нагрузки (это подтверждают площади полигонов, которые ограничены отрезками, стремящимися к вертикальности, характеризующими потерю устойчивости балластного материала). Суммарная нагрузка, которую выдержал влажный балласт, на 20 % выше, чем у сухого. Если сравнивать критические нагрузки при равных противовесах, то получается, что потеря устойчивости наступает раньше именно во влажном балласте. Значит, увеличение влажности, с одной стороны, способствует снижению фрикционных характеристик между отдельными частицами, с другой, создает предпосылки для увеличения вязкости балластной призмы в целом.

На основании экспериментов построены зависимости поперечных усилий в балласте от влажности (рис. 5) и гранулометрического состава (рис. 6).

Угол поворота линии, отражающей поведение влажного балласта, круче угла поворота линейной аппроксимации балласта в сухом состоянии (рис. 5). Во влажном балласте поперечные силы, значит, и деформации будут

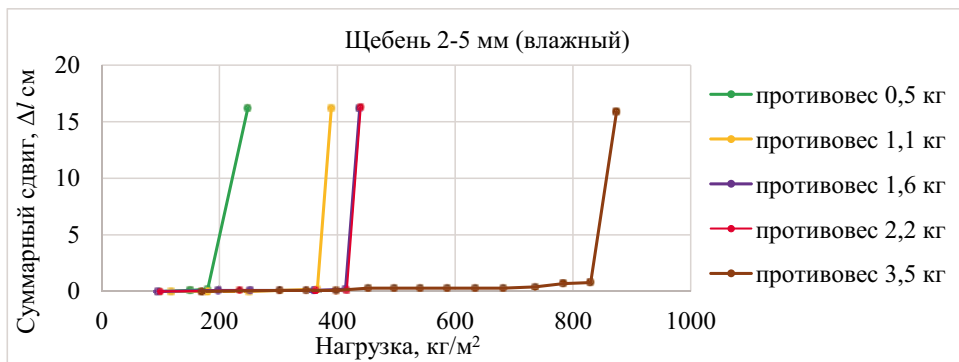


Рис. 4. Результаты испытаний влажного балласта

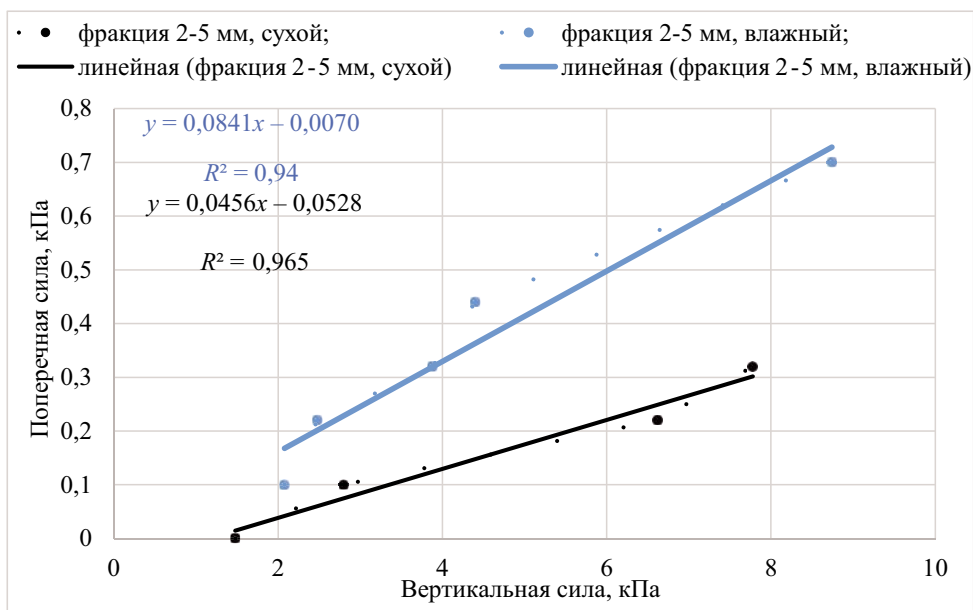


Рис. 5. Влияние влажности щебня на критические поперечные силы

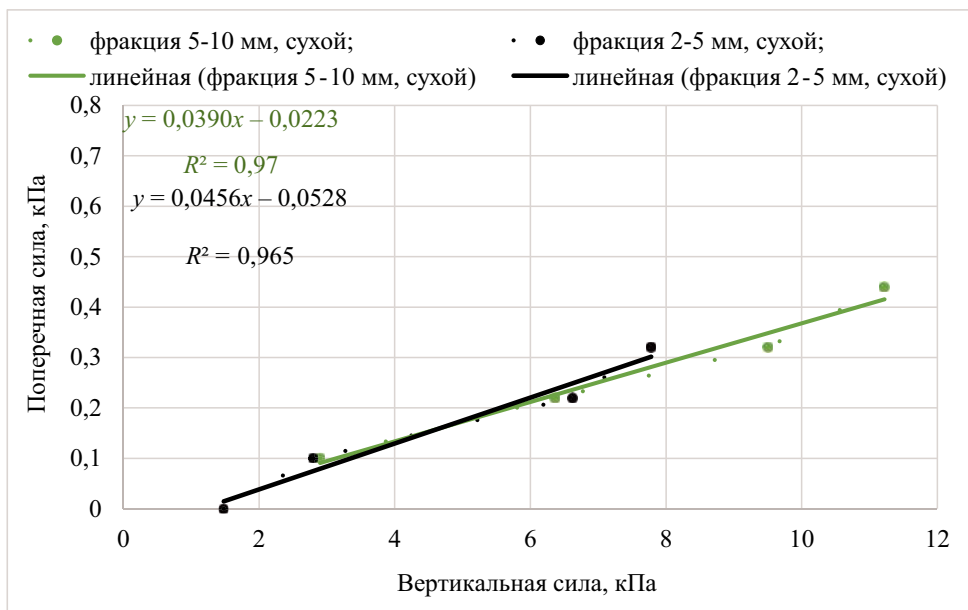


Рис. 6. Влияние фракции щебня на критические поперечные силы

развиваться на 180 % стремительнее. Рис. 6 демонстрирует подобный процесс, хотя и не так выражено. Для балласта меньшей фракции сдвигающие силы будут развиваться до 116 % (по сравнению

с укрупненным балластом). Высокий коэффициент корреляции при использовании линейной аппроксимирующей может быть следствием того, что одной из ключевых характеристик, влияющих

Сравнение результатов лабораторных испытаний

		Суммарная нагрузка при разрушении, кг			
Фракция, мм		2–5	5–10	2–5	5–10
Влажность		Сухой балласт		Влажный балласт	
Вес упора, кг	без упора	7,4	17,6	6,4	–
	0,5	14	14,5	12,4	–
	1,1	–	31,8	19,5	–
	1,6	33,1	47,5	21,9	–
	2,2	–	56,1	22,0	–
	3,5	–	–	43,7	–

на поведение балласта под нагрузкой, является коэффициент трения, который также описывается линейным законом.

По результатам исследований установлена зависимость влияния фракции и влажности на поведение балластного материала под нагрузкой. Для детального анализа составлена таблица с указанием величин противовесов и максимальной нагрузки в балласте.

Интенсивность накопления деформаций оказалась в 1,17 раз выше для щебня меньшей фракции (2–5 мм по сравнению с 5–10 мм) в рассматриваемом диапазоне изменения вертикальных нагрузок.

Влияние влажности в рассматриваемых случаях выразилось в увеличении поперечных сил в 1,85 раз при равных вертикальных нагрузках. Потеря устойчивости в увлажненном балласте наступала раньше.

Предложенный лабораторный стенд позволяет проводить эксперименты по определению поперечных сил в различных видах балластных материалов.

По результатам исследований выявлено, что балластный материал на железнодорожном пути эксплуатируется в условиях, отличных от нормативных. Существующие расчетные методики не позволяют определить характер работы загрязненного или увлажненного балластного материала. От стабильной работы балластного слоя – одного из ключевых элементов верхнего строения пути – во многом зависит бесперебойная и безопасная эксплуатация железнодорожного пути в целом. Поскольку имеется эксплуатация технически неисправного балласта, необходимо знать и понимать, каким образом осуществляется его работа в таких условиях, как влияют на его работу вредные факторы. Так, в ходе экспериментов установлено, что уменьшение размера фракционной составляющей балластного материала в результате истирания зерен балласта отрицательно сказывается на интенсивности накопления деформаций, а увеличенная влажность способствует раннему наступлению потери устойчивости. ■

Литература

1. СНиП 32-01–95. Железные дороги колеи 1520 мм. М. : ГП ЦПП, 1995. 56 с.
2. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124323> (дата обращения: 05.03.2019).
3. ГОСТ 7392–2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2015. 35 с.
4. Распоряжение ОАО «РЖД» от 31.12.2015 № 3212р «Об утверждении и введении в действие Положения о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=712561#09573579879888545> (дата обращения: 05.03.2019).
5. Величко Д. В., Толстикова Н. А. Анализ загрязненности щебеночного балласта // Известия Транссиба. 2016. №3 (27). С. 110–117. ISSN 2220-4245

6. Скутин А. И., Мыльников М. М. О качестве щебня в балластной призме железных дорог // РСР Эксперт. 2018. № 6-7 (110-111). С. 30–31.
7. Макагонов Р. А., Цигипов А. Д. Оценка загрязненности балласта на путях 3-4 класса // Современные наукоёмкие инновационные технологии : сб. Международн. научн.-практ. конф. (25.05.2018, Самара) : В 2 ч. Ч. 2. – Уфа : АЭТЕРНА, 2018. С. 76–79.
8. Аккерман Г. Л., Скутина М. А. Определение наиболее опасных мест выброса пути // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. тр. XIV Международн. научн.-техн. конф. (5-6 апреля 2017 г., Москва). – М., 2017. С. 154–156.
9. Абрашитов А. А., Зайцев А. А., Семак А. В., Шаврин Л. А. Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания частиц щебня при динамическом нагружении. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. тр. XIV Международн. научн.-техн. конф. (5-6 апреля 2017 г., Москва). – М., 2017. С. 184–187.
10. Indraratna B., Salim W. Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective. 1 изд. London: Taylor & Francis, 2005. 248 с. ISBN 9780415383295.
11. Anbazhagan P., Bharatha T. P., Amarajeevi G. Study of Ballast Fouling in Railway Track Formations // Indian Geotechnical Journal. 2012. Vol. 42. № 2. С. 87–99. ISSN 0046-8983.
12. Манигина Е.А. Влияние местных нарушений сопротивления поперечному сдвигу на устойчивость бесстыкового пути // Транспортное дело России. 2010. № 12. С.194–196. ISSN 2072-8689.
13. Николаенко А.А., Третьяк П.А., Антерейкин Е.С. Как не допустить выброса бесстыкового пути // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (35). С. 12–18. ISSN 1815-9265.
14. Першин С. П. О сопротивлении балласта сдвигу и способах усиления температурно-напряженного пути против потери устойчивости / Труды Московского института инженеров транспорта им. Ф. Э. Дзержинского : сб. научн. трудов. – Вып. 111. – М. : МИИТ, 1960. С. 126–136.
15. Щепотин К. И., Грищенко В. А. Исследование поперечной стабилизации пути на Джетыгаринском асбестовом балласте / Вопросы устройства и работы железнодорожного пути : сб. научн. тр. / под ред. Л. М. Дановского. – Новосибирск : [б. и.], 1971. С. 12–17.
16. Попов С. Н. О допускаемых напряжениях на балласт / Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути : сб. научн. тр. / М. Ф. Вериги [и др.]. – М. : Гос. трансп. ж.-д. изд-во, 1955. С. 353–385.
17. Колос А. Ф., Осипов Г. В., Клищ С. А., Леус А. С., Каминный О. А. Исследование прочностных свойств щебня, применяемого для балластного слоя железнодорожного пути / Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия : сб. научн. тр. по матер. XXIII Международн. научн.-практ. конф. (Москва, 20–22 марта 2018 г.). – М., 2018. С. 19–24.

Literature

1. Construction norms and regulations 32-01–95. Railways with 1520 gauge. [Zheleznyye dorogi kolei 1520 mm.] M. : 1995. 56 p.
2. СП 238.1326000.2015. Railway Track. [Zheleznodorozhnyy put'] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124323> (reference date: 05.03.2019).
3. GOST 7392–2014. Dense rock gravel for railway ballast bed. Technical conditions. [GOST 7392–2014. Shheben' iz plotnyh gornyh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya.] M. : Standardinform, 2015. 35 p.
4. JSC RZD order as of 31.12.2015 № 3212p «On approval and enforcement of Provision about keeping JSC RZD track facilities». [Rasporyazhenie OAO «RZhD» ot 31.12.2015 № 3212r «Ob utverzhdenii i vvedeniie Polozheniya o sisteme vedeniya putevogo hozyajstva OAO «RZhD».] URL:<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=712561#09573579879888545> (reference date: 05.03.2019).
5. Velichko D. V., Tolstikova N. A. Analysis of crushed stone ballast contamination [Analiz zagryaznennosti shhebenochnogo ballasta] // Transsib Bulletin. 2016. № 3 (27). P. 110–117. ISSN 2220-4245.
6. Skutin A. I., Mylnikov M. M. About gravel quality in the railway ballast section [O kachestve shhebenya v ballastnoj prizme zheleznyh dorog] // Expert. 2018. № 6-7 (110-111). P. 30–31.

7. Makagonov R. A., Tsigipov A. D. Evaluation of ballast contamination on 3-4 class tracks // Modern knowledge consumptive technology [Ocenka zagryaznennosti ballasta na putyah 3-4 klassa // Sovremennye naukovomkie innovacionnye tekhnologii]: col. International scien.&pract. conf. (25.05.2018, Samara): In 2. P. 2. – Ufa : AETERNA, 2018. P. 76–79.
8. Akkerman G.L., Skutina M.A. Detection of the most hazardous track buckling points // Modern problems of designing, construction and operation of the rail track [Opredelenie naibolee opasnyh mest vybroza puti // Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatacii zheleznodorozhnogo puti] : Proceedings of XIV Internat. scien.& pract. conf. (5–6 April 2017., Moscow). – M., 2017. P. 154–156.
9. Abrashitov A. A., Zaitsev A. A., Semak A. V., Shavrin L. A. Evaluation of crushed stone ballast bed contamination sources and simulation of destruction and wear of ballast particles in dynamic loading. Modern problems of designing, construction and operation of the rail track [Ocenka istochnikov zagryazneniya ballastnogo sloya iz granitnogo shhebnya i modelirovanie razrusheniya i istiraniya chastic shhebnya pri dinamicheskom nagruzhenii. Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatacii zheleznodorozhnogo puti]: Proceedings of XIV Internat. scien.& pract. conf. (5-6 April 2017., Moscow). – M., 2017. P. 184–187.
10. Indraratna B., Salim W. Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective. 1 issue. London: Taylor & Francis, 2005. 248 c. ISBN 9780415383295.
11. Anbazhagan P., Bharatha T. P., Amarajeevi G. Study of Ballast Fouling in Railway Track Formations // Indian Geotechnical Journal. 2012. Vol. 42. № 2. P. 87–99. ISSN 0046-8983.
12. Manyugina E. A. Influence of local disorders of resistance to transverse shift for stability of continuous welded rail track // Transport industry of Russia. [Vliyanie mestnyh narushenij soprotivleniya poperechnomu sdvigu na ustojchivost' besстыkovogo puti // Transportnoe delo Rossii] 2010. № 12. P. 194–196. ISSN 2072-8689.
13. Nikolayenko A. A., Tretyak P. A., Antereikin E. S. How to prevent continuous welded rail track buckling [Kak ne dopustit' vybroza besстыkovogo puti] // Herald of Siberian state university of railway transport. 2015. № 4 (35). P. 12–18. ISSN 1815-9265.
14. Pershin S. P. On ballast resistance to shift and means of strengthening temperature-stressed track against stability loss / Proceedings of Moscow Institute of transport engineers named after F.E. Dzerzhinsky [soprotivlenii ballasta sdvigu i sposobah usileniya temperaturno-napryazhennogo puti protiv poteri ustojchivosti / Trudy Moskovskogo instituta inzhenerov transporta im. F. E. Dzerzhinskogo]: col.of scient.papers. – Issue 111. – M. : MITE, 1960. P. 126–136.
15. Schepotin K. I., Grischenko V. A. Studies of track transverse stabilization on Dzhetygar asbest ballast / Issues of rail track laying and operation [Issledovanie poperechnoj stabilizacii puti na Dzhetygarinskom asbestovom ballaste / Voprosy ustrojstva i raboty zheleznodorozhnogo puti]: col. of scient. papers. / edited by L. M. Danovski. – Novosibirsk : 1971. P. 12–17.
16. Popov S. N. About admissible stresses on ballast / Interaction of track and rolling stock and issues of track computations [O dopuskaemyh napryazheniyah na ballast / Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava i voprosy raschetov puti]: col. of scient. papers / M. F. Verigo [et al]. – M. : State transport ry publisher, 1955. P. 353–385.
17. Kolos A. F., Osipov G. V., Klisch S. A., Leus A. S., Kaminnykh O. A. Investigation of strength of crushed stone used for rail track ballast bed / Scientific studies: III millennium key challenges [Issledovanie prochnostnyh svojstv shhebnya, primenyaemogo dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti / Nauchnye issledovaniya: klyuchevye problemy III tysyacheletiya]: col.of scient.papers by proceedings of XXIII Internat. scient. & pract. conf. (Moscow, 20–22 March 2018.). – M., 2018. P. 19–24.

Статья сдана в редакцию 10 мая 2019 года

0,89 а. л.

Организация и логистика

УДК 629.472.3

К.В. Панов

Исследование вероятностных процессов функционирования локомотиворемонтного предприятия

UDC 629.472.3

K.V. Panov

Investigation of probabilistic processes of locomotive repair enterprise functioning

Аннотация

В статье рассматриваются и исследуются закономерности появления заявок и простоя тягового подвижного состава на всех видах ремонта и технического обслуживания в сервисном локомотивном депо (СЛД) Московка. В качестве исходной информации взяты производственные и статистические данные исследуемого предприятия. Приведены описательная статистика и гистограммы распределений стохастических случайных величин.

Выявлено, что распределение поступления заявок на плановые виды ремонта описывается по закону Пуассона, а для непланового ремонта время между поступлением заявок – законом распределения Рэлея, простой ремонтируемого тягового подвижного состава на технологических участках депо для технического осмотра ТО-2 и ТО-4, текущего ремонта ТР-2 и ТР-3 описывается гамма-распределением. Для текущего ремонта ТР-1 и непланового ремонта выбрано логнормальное распределение. Для каждого исследуемого параметра рассчитаны значения показателей вероятностных законов распределения.

Квантильные графики и проверка выбранных законов распределения по критерию согласия Пирсона (хи-квадрат) показали, что гипотезы вероятностного распределения не могут быть отвергнуты.

Ключевые слова: депо, ремонт подвижного состава, распределение вероятностей, математическая статистика, закон распределения.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-66-75

Annotation

The article looks upon and studies regularities of coming of orders and deadtime of the traction rolling stock at all kinds of repairs and technical service in the service locomotive depot (SLD) Moskovka. The enterprise production and statistical data were taken as the source information. Descriptive statistics and bargraphs of distribution of stochastic random values are given.

It was revealed that distribution of coming of orders for scheduled repairs is described by Poisson law, and for unscheduled repairs the time period between order coming – Relay distribution law, the deadtime of the traction rolling stock under repairs at technological depot sections for technical inspection TI-2 and TI-4, current repair CR-2 and CR-3 is described by gamma-distribution. For current repair CR-1 and unscheduled repair lognormal distribution is the choice.

Quantile graphs and inspection of chosen distribution laws according to Pearson criterion (chi-square) showed that hypotheses of probabilistic distribution cannot be denied.

Key words: depot, repair of rolling stock, distribution of probabilities, mathematical statistics, distribution law.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-66-75

Статья рекомендована к публикации С.Г. Истоминим, канд. техн. наук, доцентом кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС. E-mail: istomin_sg@mail.ru.

Кирилл Вячеславович Панов, преподаватель; кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения; Омск, Россия. E-mail: k.v.panov@ya.ru.

The article is recommended for publishing by S.G. Istomin, Cand. of tech. science, Associate Professor of Electric Railway Rolling Stock Department, OmSURT. E-mail: istomin_sg@mail.ru.

Kirill Vyacheslavovich Panov, Teacher, Electric Railway Rolling Stock Department, Omsk state university of railway transport; Omsk, Russia. E-mail: k.v.panov@ya.ru.

Для повышения эффективности функционирования предприятий по ремонту тягового подвижного состава (ТПС) необходимо выявить закономерности различных явлений и процессов производства. Для этого используем статистический метод (сбор, обработка и анализ количественных данных производства) [1].

Законы распределения потока заявок и продолжительности переходных периодов выбраны потому, что переходные периоды могут составлять существенную часть рабочего времени системы, а закон распределения входного потока заявок может влиять на статистические характеристики выходных параметров системы массового обслуживания. Не учитывая период нестационарности и влияние вида закона распределения потока заявок, невозможно оптимизировать рабочие характеристики системы в целом [2].

СЛД Московка – одно из крупнейших предприятий по ремонту тягового подвижного состава в СТМ-Сервис, обеспечивающее надежную работу электропоездов серии ЭЭС6, ВЛ11 и ВЛ10

разных индексов [3, 4]. В качестве исходных данных взяты технологические акты выполненных работ в депо. По результатам обработки получена выборка значений времени простоя локомотива $t_{\text{пр}}^i$ на технологическом участке и времени поступления заявки на ремонт t_3^i для каждого вида технического обслуживания и текущего ремонта в депо.

Результаты статистических показателей распределения для переменных $t_{\text{пр}}^i$ и t_3^i i -го вида ремонта представлены в таблицах 1 и 2.

Для технического обслуживания ТО-4 время поступления на участок $t_{\text{пр}}^{\text{ТО-4}}$ не рассчитывалось (операции такого обслуживания локомотивов производятся после выполнения операций текущего ремонта ТР-1). Если необходима обточка колесной пары (ТО-4), то такая операция относится к неплановому виду ремонта (НР).

Время поступления заявки на текущий ремонт ТР-3 также не рассчитывалось, так как нет характеристик этого вида восстановительных операций (в рассматриваемое депо на ТР-3 поступают два электропоезда в неделю).

Таблица 1
Результат статистических показателей распределения для переменной $t_{\text{пр}}^i$

Параметр	$t_{\text{пр}}^{\text{ТО-2}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{ТО-4}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{ТР-1}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{ТР-2}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{ТР-3}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{НР}}$
Количество наблюдений $N_{\text{пр}}^i$, ед.	244	104	730	164	166	1231
Математическое ожидание $t_{\text{пр}}^{\text{ср}}$, ч	1,67	14,43	73,61	112,75	250,7	27,65
Стандартная ошибка среднего $S_{\text{пр}}^i$, ч	0,11	0,91	3,37	4,49	11,8	1,48
Минимальное значение $t_{\text{пр}}^{\text{min}}$, ч	0,38	3,5	12,44	68,03	125,53	0,24
Максимальное значение $t_{\text{пр}}^{\text{max}}$, ч	8,18	32,11	464,12	227,01	632,15	600
Медиана $Me_{\text{пр}}^i$, ч	1,2	14,5	52,91	94,31	221,56	12,1
Дисперсия $\sigma_{\text{пр}}^2$, ч	1,54	43,34	4041,06	1654,63	11553,5	2689,5
Мода $Mo_{\text{пр}}^i$, ч	1,07	15,0	207,08	89,14	304	18,75
Среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\text{пр}}^i$, ч	1,24	6,58	63,57	40,68	107,49	51,86
Коэффициент асимметрии $A_{\text{пр}}^i$	0,22	0,33	0,13	0,26	0,26	0,07
Коэффициент эксцесса $E_{\text{пр}}^i$	0,43	0,65	0,26	0,52	0,52	0,14
Доверительный интервал для среднего $\bar{x}_{\text{пр}}^i$, ч	1,42	16,26	80,24	48,07	126,88	53,99
Сумма значений измерений $\sum t_{\text{пр}}^i$, ч	408,8	1500,68	52413,4	18490,9	20808,4	34040,1

Таблица 2

Результат описательной статистики для переменной t_3^i по видам ремонта

Параметр	$t_3^{\text{ТО-2}}$	$t_3^{\text{ТР-1}}$	$t_3^{\text{ТР-2}}$	t_3^{HP}
Количество наблюдений N_3^i , ед.	483	166	243	244
Математическое ожидание t_3^{cp} , ч	3,73	5,22	5,42	5,01
Стандартная ошибка среднего $S_{t_3^{\text{cp}}}$, ч	0,09	0,19	0,12	0,18
Минимальное значение t_3^{min} , ч	1	1	1	0
Максимальное значение t_3^{max} , ч	12	11	10	12,87
Медиана Me_{t_3} , ч	3	5	5	4,66
Дисперсия $\sigma_{t_3}^2$, ч	3,74	5,72	4,06	7,95
Мода Mo_{t_3} , ч	3	5	5	{4,8, 5,5}
Среднеквадратичное отклонение σ_{t_3} , ч	1,93	2,39	2,02	2,82
Коэффициент асимметрии A_{t_3}	0,12	0,19	0,16	0,15
Коэффициент эксцесса E_{t_3}	0,23	0,37	0,31	0,31
Доверительный интервал \bar{x}_3 , ч	2,07	2,68	2,21	3,09
Сумма значений измерений $\sum t_3$, ч	1635	867	1318	1220,22

Из-за особенности технологического процесса локомотиворемонтных предприятий для переменных $t_3^{\text{ТО-2}}$, $t_3^{\text{ТР-1}}$, $t_3^{\text{ТР-2}}$ случайная величина принимает дискретные значения. Локомотивы поступают на производство на плановые виды восстановительных операций в соответствии графиком и программой ремонта в депо. Заявка на количество локомотивов, которым необходимо произвести обслуживание, формируется заранее.

В остальных случаях, где случайная величина непрерывна, статистические параметры распределения показали, что недопустимо считать полученные данные близкими к нормальному закону распределения, т.к. значения медианы и математического ожидания не одинаковы, а значения асимметрии и эксцесса не равны нулю.

Для определения вида законов вероятностного распределения необходимо оценить параметры графическим методом. Гистограммы для определения

законов распределения простоев локомотивов на технологическом участке $t_{\text{пр}}^i$ для каждого i -го вида технического обслуживания и ремонта в депо представлены на рис. 1.

Применить наиболее вероятное теоретическое распределение к наблюдаемым данным можно при помощи графика квантиль-квантиль (рис. 2) [5]. На графике показана связь между наблюдаемыми значениями переменных Q_N^i и расчетными квантилями Q_T^i .

Для технического обслуживания ТО-2 и ТО-4, текущих ремонтов ТР-2 и ТР-3 выбрано гамма-распределение, плотность распределения которого определяется по формуле [6]:

$$p(t_{\text{пр}}^i) = \frac{(t_{\text{пр}}^i - t_{\text{min}}^i)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{[t_{\text{пр}}^i - t_{\text{min}}^i]}{\beta}\right),$$

где t_{min}^i – минимальное значение гамма-распределения для i -го вида ремонта; α – фактор формы вероятностного

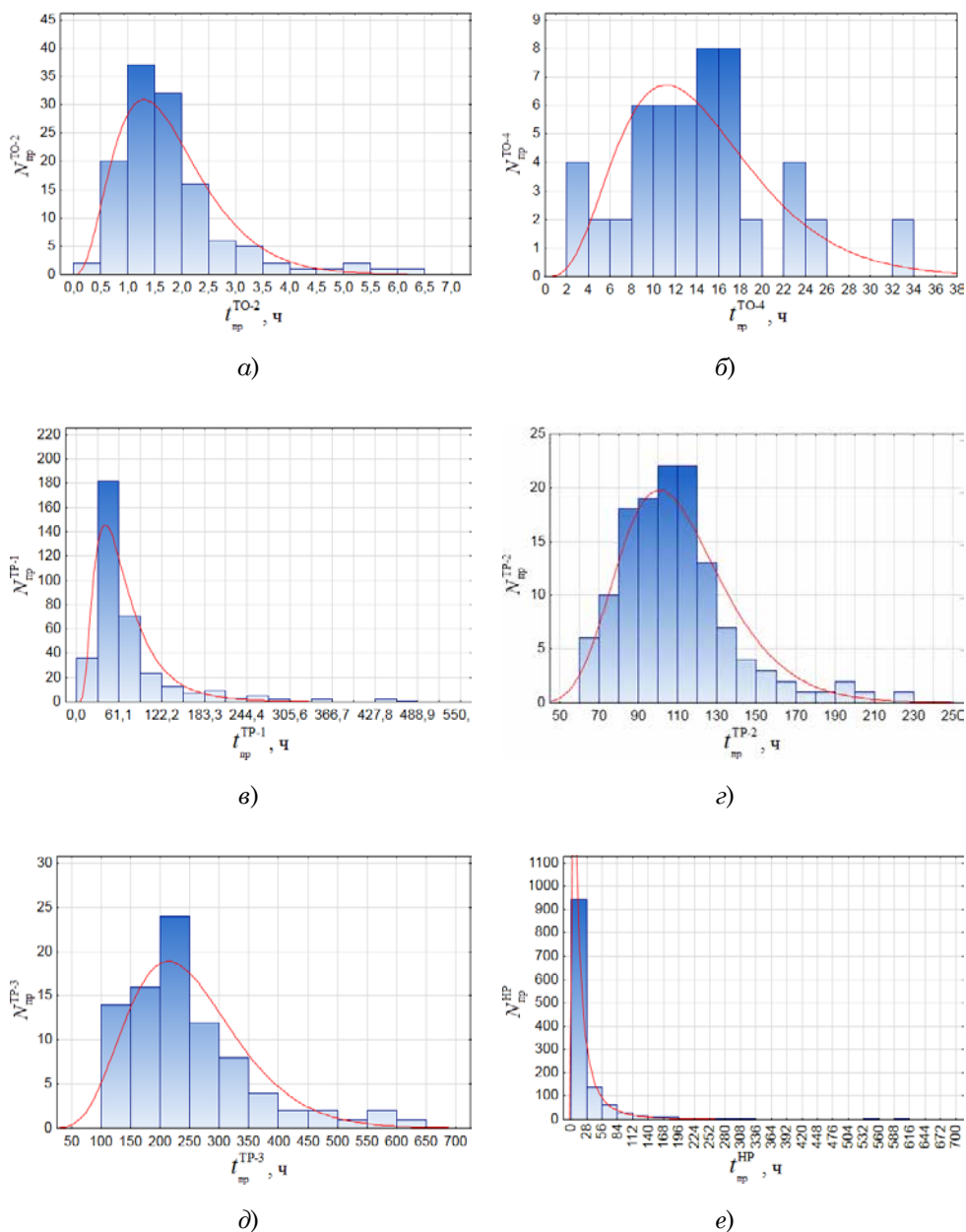


Рис. 1. Гистограмма распределения времени простоя локомотивов на ТО и ТР $t_{\text{пр}}^i$
 а – ТО-2; б – ТО-4; в – ТР-1; г – ТР-2; д – ТР-3; е – НР

распределения; β – параметр масштаба распределения; $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} (t_{\text{пр}}^i)^{\alpha-1} e^{-t_{\text{пр}}^i} dx$ – гамма-функция.

Значения параметров закона гамма-распределения для i -го вида ремонта приведены в таблице 3.

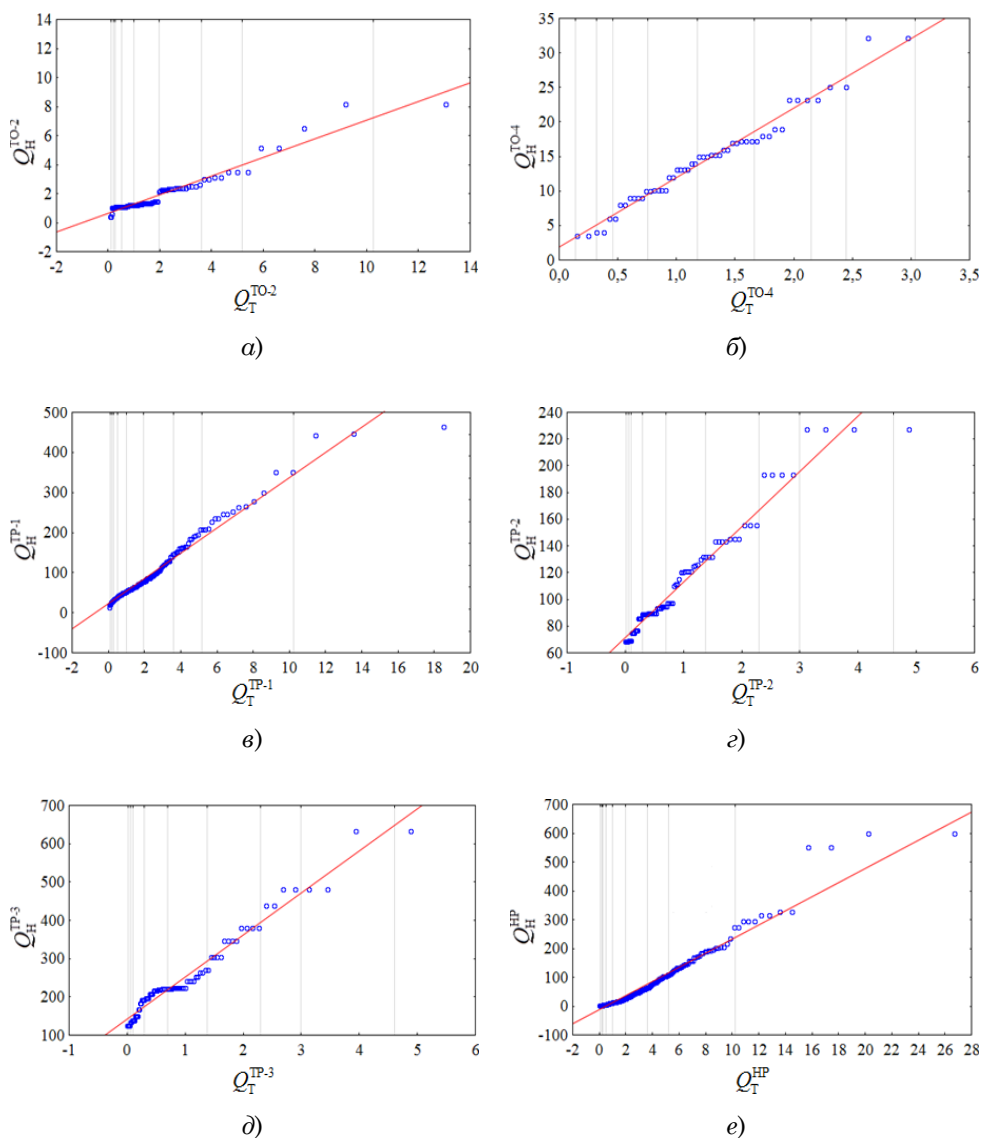


Рис. 2. График квантиль-квантиль переменной $t_{пр}^i$
 а – TO-2 (гамма-распределение); б – TO-4 (гамма-распределение);
 в – TP-1 (логнормальное распределение); г – TP-2 (гамма-распределение);
 д – TP-3 (гамма-распределение); е – HP (логнормальное распределение)

Таблица 3
 Значения параметров закона гамма-распределения переменной $t_{пр}^i$

Параметр	$t_{пр}^{TO-2}$	$t_{пр}^{TO-4}$	$t_{пр}^{TP-2}$	$t_{пр}^{TP-3}$
Минимальное значение распределения $t_{мин}^i$, ч	0,43	1,59	10,6	3
Фактор формы вероятностного распределения α	3,64	4,43	9,25	6,85
Коэффициент масштаба распределения β	0,48	3,26	12,18	36,6

Таблица 4

Значения параметров логнормального закона распределения переменной $t_{\text{пр}}^i$

Параметр	$t_{\text{пр}}^{\text{TP-1}}$	$t_{\text{пр}}^{\text{HP}}$
Минимальное значение распределения $t_{\text{мин}}^i$, ч	6,22	0,24
Среднее значение включенной нормальной величины σ , ч	0,6	1,2
Среднеквадратичное отклонение включенной нормальной величины μ , ч	4,08	2,52

Для TP-1 и непланового ремонта выбрано логнормальное распределение, плотность распределения которой определяется по формуле [7]:

$$p(t_{\text{пр}}^i) = \frac{1}{(t_{\text{пр}}^i - t_{\text{мин}}^i) \sqrt{2\pi\sigma^2}} \times \exp\left(-\frac{[\ln(t_{\text{мин}}^i - t_{\text{мин}}^i) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right),$$

где $t_{\text{мин}}^i$ – минимальное значение логнормального распределения для i -го

вида ремонта; σ – среднее значение включенной нормальной величины; μ – среднеквадратичное отклонение включенной нормальной величины.

Значения параметров логнормального закона распределения для i -го вида ремонта приведены в таблице 4.

Для дискретных значений поступления заявки на техническое обслуживание $t_3^{\text{TO-2}}$ и текущий ремонт $t_3^{\text{TP-1}}$, $t_3^{\text{TP-2}}$ выборка значений рассматривается как вероятность поступления на участок N объектов на i -й вид ремонта за время Δt (рис. 3).

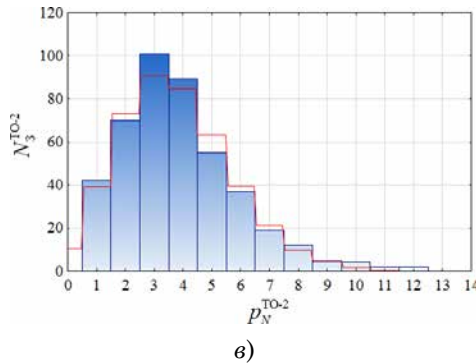
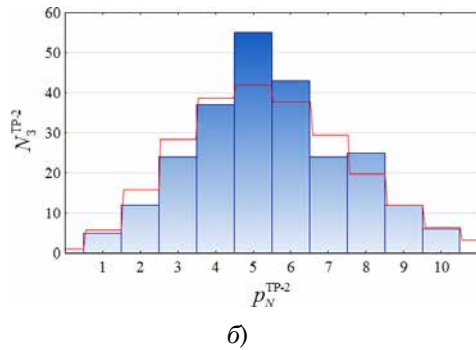
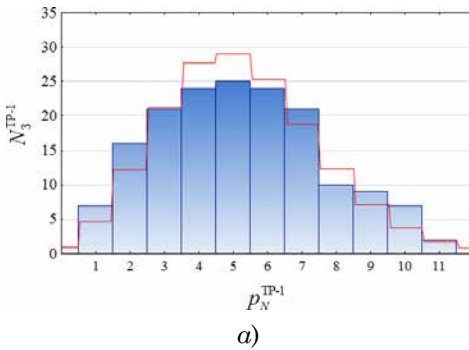


Рис. 3. Гистограмма распределения дискретных значений поступления заявки на ремонт t_3^i
а – TP-1; б – TP-2; в – TO-2

В качестве значений формирования потока заявок на ремонт в условиях, что события выполняются с некоторой фиксированной интенсивностью и независимо друг от друга, применяют закон Пуассона [8]:

$$p_N^i = \frac{(\overline{p}t_i \cdot \Delta t)^N}{N!} \cdot e^{-\overline{p}t_i \cdot \Delta t}.$$

Расчет значений интенсивности потока событий $\overline{p}t_i \cdot \Delta t$ вероятностного распределения поступления заявок:

- для технического обслуживания ТО-2 – 3,73 ТПС/дн;
- текущего ремонта ТР-1 – 5,22 ТПС/дн;
- ТР-2 – 5,42 ТПС/неделя.

Поток заявок на неплановый ремонт является непрерывным распределением (рис. 4) и подчиняется особому случаю распределения Вейбулла – распределению Рэля [6, 9].

Плотность распределения поступления заявок на неплановый ремонт будет определяться по формуле [6]:

$$p(t_3^{\text{HP}}) = \frac{(t_3^{\text{HP}} - t_{\min}^{\text{HP}})}{\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{(t_3^{\text{HP}} - t_{\min}^{\text{HP}})^2}{2\sigma_R^2}\right),$$

где $t_{\min}^{\text{HP}} = 0,64$, минимальное значение распределение при поступлении заявок на НР, ч; $\sigma_R = 4,06$, параметр масштаба распределения при поступлении заявок на НР, ч.

Сравнение совокупности данных с принятым распределением Рэля

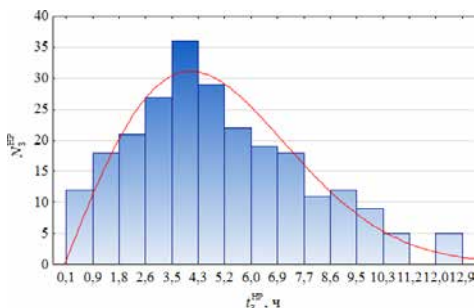


Рис. 4. Гистограмма распределения поступления заявок на НР

показано на квантильной диаграмме (рис. 5).

По критерию согласия Пирсона (хи-квадрат) в качестве подтверждения выбранных законов проведено сравнение эмпирических гистограмм распределения случайных величин с ее теоретической плотностью [10]:

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = N_{\text{изм}}^i \sum_{k=1}^n \frac{(P_k^{\text{T}} - P_k^{\text{Э}})^2}{P_k^{\text{T}}},$$

где P_k^{T} – теоретическая вероятность попадания случайной величины в k -й интервал; $P_k^{\text{Э}}$ – экспериментальная вероятность попадания случайной величины в k -й интервал.

В таблице 5 указаны значения $\chi_{\text{эмп}}^2$, степень свободы распределения χ_n^2 и уровень значимости ρ результатов для каждого исследуемого параметра.

Для параметра $t_{\text{пр}}^{\text{ТР-1}}$ значение $\chi_{\text{эмп}}^2$ вычислялась с учетом поправки Ф. Йейтса [11].

$$\chi_{\text{эмп}}^2 = N_{\text{изм}}^i \sum_{k=1}^n \frac{(|P_k^{\text{T}} - P_k^{\text{Э}}| - 0,5)^2}{P_k^{\text{T}}}.$$

Все значения критерия $\chi_{\text{эмп}}^2$ выполняются по условию $\chi_{\text{эмп}}^2 \leq \chi_{\text{т}}^2$, что говорит о статистической взаимосвязи между теоретическими $\chi_{\text{т}}^2$ и наблюдаемыми значениями параметров, а выбранные гипотезы вероятностного распределения не могут быть отвергнуты.

По результатам проведенных исследований получены законы и параметры

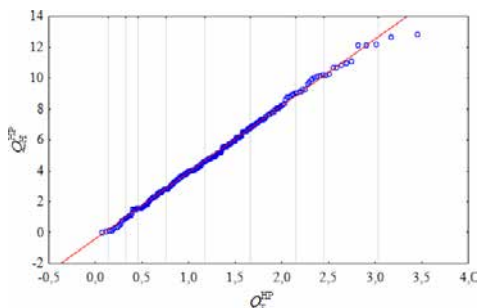


Рис. 5. График квантиль-квантиль переменной t_3^{HP} при распределении Рэля

Таблица 5

Результат проверки гипотез о законах распределения вероятностей

Параметр	Вид закона распределения	$\chi^2_{\text{эмп}}$	χ^2_n	ρ
Простой локомотива на ТО-2 $t_{\text{пр}}^{\text{ТО-2}}$, ч	Гамма-распределение	6,74	4	0,15
Простой локомотива на ТО-4 $t_{\text{пр}}^{\text{ТО-4}}$, ч	Гамма-распределение	1,7	4	0,79
Простой локомотива на ТР-1 $t_{\text{пр}}^{\text{ТР-1}}$, ч	Логнормальный	7,64	4	0,1
Простой локомотива на ТР-2 $t_{\text{пр}}^{\text{ТР-2}}$, ч	Гамма-распределение	4,79	7	0,68
Простой локомотива на ТР-3 $t_{\text{пр}}^{\text{ТР-3}}$, ч	Гамма-распределение	4,69	4	0,32
Простой локомотива на НР $t_{\text{пр}}^{\text{НР}}$, ч	Логнормальный	9,48	7	0,11
Количество заявок на ТО-2 в течение суток $N_3^{\text{ТО-2}}$, ед.	Пуассона	11,61	7	0,11
Количество заявок на ТР-1 в течение суток $N_3^{\text{ТР-1}}$, ед.	Пуассона	4,58	8	0,8
Количество заявок на ТР-2 в течение недели $N_3^{\text{ТР-2}}$, ед.	Пуассона	6,97	8	0,54
Время между заявками на НР $t_3^{\text{НР}}$, ч	Релея	2,59	7	0,92

вероятностных распределений поступлений локомотивов на предприятие и продолжительности простоев на техническом обслуживании и ремонте. Полученные значения позволяют определить причины сверхнормативного

простоя локомотивов, совершенствовать методы планирования и управления производственного процесса, учитывая вероятностный характер ремонтного производства. ■

Литература

1. Смирнов В. А. Целевые показатели оценки качества технологических решений предприятий по ремонту подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2013. № 1. С. 32–38. ISSN 2071-3827.
2. Пустовой И. В. Инкапсуляция статистических методов управления в информационную систему сервисного обслуживания и ремонта локомотивов // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 132–142. ISSN 2220-4245.
3. Доманов К. И. Проблемы сервисного обслуживания электровозов серии 2ЭС6 и мероприятия, направленные на повышение технологии их ремонта / Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : м-лы IV Всеросс. научн.-техн. конф. с междунардн. участием. – Омск, 2017. С. 97–103.
4. Смирнов В. А., Панов К. В. Повышение технологической гибкости ремонтного производства // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1–2. С. 47–50. ISSN 2071-3827.
5. Пустовой И. В. Роль вероятностно-статистических методов в управлении техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. С. 365–369.
6. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. М. : Физматлит, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0.
7. Сидорова Е. А. Применение корреляционно-регрессионного анализа для оценки энергетической эффективности вспомогательного оборудования пассажирских электровозов постоянного тока серии ЭП2К / Сидорова Е. А., Истомин С. Г., Гателюк О. В. //

Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3. С. 59–68. ISSN 0201-727X.

8. Таташев А. Г. Дискретная многоканальная система массового обслуживания с отказами и групповым поступлением заявок / А. Г. Таташев, М. Ахильгова, С. А. Щербуняев // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 7. С. 23–26. ISSN 2072-8735.
9. Яновский Г. Г. Оценка квантиля функции распределения времени задержки заявок в однолинейных системах массового обслуживания / Яновский Г. Г., Соколов А. Н. // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. Вып. 3. С. 27–30. ISSN 2073-3909.
10. Полетаев В. П. Управление периодичностью обслуживания технических систем при оптимизации коэффициента технического использования / В. П. Полетаев, Д. А. Богданов // Труды Международн. симпозиума «Надежность и качество», 2007. Т. 1. С. 237–239. ISSN 2220-6418.
11. Теория вероятностей и основы математической статистики : учебное пособие / Е. И. Борзенко, И. В. Еремин // Томск : ТГУ, 2014. 96 с.

Literature

1. Smirnov V. A. Target indicators of evaluation of quality of technological decisions of the enterprise on the rolling stock repair // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. [Celevye pokazateli ocenki kachestva tekhnologicheskikh reshenij predpriyatij po remontu podvizhnogo sostava // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka] 2013. № 1. P. 32–38. ISSN 2071-3827.
2. Pustovoy I. V. Incapsulation of statistical methods of control into informational system of service maintenance and repair of locomotives // Transsib Bulletin. [Inkapsulyaciya statisticheskikh metodov upravleniya v informacionnyu sistemu servisnogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov // Izvestiya Transsiba.] 2016. № 3 (27). P. 132–142. ISSN 2220-4245.
3. Domanov K. I. Problems of service maintenance of Series 2ЭС6 electric locomotives and measures aimed at improving technology of their repair / Technological support of repairs and improving dynamic qualities of railway rolling stock [Problemy servisnogo obsluzhivaniya elektrovozov serii 2EC6 i meropriyatiya napravlennye na povyshenie tekhnologii ih remonta / Tekhnologicheskoe obespechenie remonta i povyshenie dinamicheskikh kachestv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava]: mat-s of 4th All-Russia scient. & tech. conf. with international participants. – Omsk, 2017. P. 97-103.
4. Smirnov V. A., Panov K. V. Improving technological flexibility of repair production // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. [Povyshenie tekhnologicheskoy gibkosti remontnogo proizvodstva // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka] 2014. № 1–2. P. 47–50. ISSN 2071-3827.
5. Pustovoy I. V. The role of probabilistic and statistical methods in control over technical maintenance and repairs of locomotives // Transport infrastructure of the Siberian area. [Rol' veroyatnostno-statisticheskikh metodov v upravlenii tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona.] 2017. P. 365–369.
6. Kobzar A. I. Applied mathematical statistics. [Prikladnaya matematicheskaya statistika] M. : Phismathlit, 2006. 816 p. ISBN 5-9221-0707-0.
7. Sidorova E. A. Application of correlation-regression analysis for evaluation of power efficiency of auxilliary equipment of ЭП2К passenger DC electric locomotives [Primenenie korrelyacionno-regressionnogo analiza dlya ocenki energeticheskoy effektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya passazhirskih elektrovozov postoyannogo toka serii EP2K] / Sidorova E. A., Istomin S. G., Gatelyuk O. V. // Herald of Rostov state university of railway transport. 2018. № 3. P. 59–68. ISSN 0201-727X.
8. Tatashev A. G. Discrete multi-channel of mass serve with faults and batch arrivals [Diskretnaya mnogokanal'naya sistema massovogo obsluzhivaniya s otkazami i gruppovym postupleniem zayavok] / A. G. Tatashev, M. Akhilgova, S. A. Schebunyayev // T-Comm: Telecommunications and transport. 2017. V. 11. № 7. P. 23–26. ISSN 2072-8735.
9. Yanovski G. G. Evaluation of quantile of time distribution of delay of orders in single line mass service systems [Ocenka kvantilya funkcii raspredeleniya vremeni zaderzhki zayavok v odnolinejnykh sistemah massovogo obsluzhivaniya] / Yanovski G. G., Sokolov A. N. // Infocommunicational technology. 2008. V. 6. Issue. 3. P. 27–30. ISSN 2073-3909.

- Poletayev V. P. Control over intermittence of servicing technical systems in optimization of technical deployment coefficient [Upravlenie periodichnost'yu obsluzhivaniya tekhnicheskikh sistem pri optimizacii koefficienta tekhnicheskogo ispol'zovaniya] / V. P. Poletayev, D. A. Bogdanov // Proceedings of International symposium «Reliability and quality», 2007. V. 1. P. 237–239. ISSN 2220-6418.
10. Theory of probabilities and fundamentals of mathematical statistics [Теория вероятностей и основы математической статистики]: teaching aid / E. I. Borzenko, I. V. Yeremin // Tomsk : TSU, 2014. 96 p.

Статья сдана в редакцию 10 апреля 2019 года

0,76 а. л.

УДК 303.1

В. А. Антропов, М. Ю. Книсс

Методологические основы развития человеческого капитала для «зеленой» экономики России

UDC 303.1

V. A. Antropov, M. Yu. Kniss

Methodological framework of development of human capital for Russia's «green» economy

Аннотация

Феномен «зеленой» экономики, развивающийся в передовых странах мира, как показывают исследования, не подкреплен в должной мере в России теоретическими разработками, значит, нет обеспечивающих нормативно-правовых актов, недостаточно кадров для ее осуществления, не разрабатываются и соответствующие технологии.

Для перехода к широкой практической деятельности по развитию «зеленой» экономики необходимо теоретически и методологически максимально полно описать складывающуюся проблему, предложить механизмы ее решения с последующим существенным снижением негативных действий в ходе реализации.

Концептуально осмысленный алгоритм решения этих вопросов предлагается авторами статьи. В ней

обосновываются основополагающие направления предполагаемых исследований, ключевыми из которых являются формулировка ведущих понятий «экологический менеджмент – «зеленая» экономика – циклическая экономика»; анализ вызовов «зеленой» экономики системе формирования и развития человеческого капитала; формирование модели личности работника – носителя человеческого капитала для его реализации в условиях «зеленой» экономики; механизм развития инновационной восприимчивости человеческих ресурсов для «зеленой» экономики; организация и управление системой формирования человеческого капитала; разработка методики инновационной восприимчивости личности работника – носителя человеческого капитала.

Исследование предполагает встречное движение

мысли сверху от методологии науки к конкретной экономике и от рабочего места вверх по иерархии организационной структуры. Оно даст синергетический эффект и сэкономит время создания современной концепции подготовки человеческого капитала для «зеленой» экономики, одновременно реализуя авторское сопровождение по внедрению результатов работ (на базе любого образовательного учреждения, если там есть восприимчивый к новациям коллектив).

Работа носит интегративный характер и предусматривает единство трех наук: системной экономики, философии и педагогики профессионального образования.

Ключевые слова: человеческий капитал, «зеленая» экономика, информационно-коммуникативные технологии, мультидисциплинарный и трансдисциплинар-

Статья рекомендована к публикации С.В. Рачек, д-ром экон. наук, зав. кафедрой «Экономика транспорта», Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: SVRachek@usurt.ru.

Владимир Алексеевич Антропов, д-р экон. наук, профессор; Уральский государственный университет путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: antrvl49@yandex.ru.

Максим Юрьевич Книсс, аспирант; Уральский государственный университет путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: knissmax@mail.ru.

The article is recommended for publishing by S.V. Rachech, Doctor of economy, chair of «Transport economy» department, Ural state university of railway transport. E-mail: SVRachek@usurt.ru.

Vladimir Antropov Alekseevich, Doctor of economy, Professor, Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia. E-mail: antrvl49@yandex.ru.

Maksim Yur'evich Kniss, post-graduate student, Ural state university of railway transport, Yekaterinburg, Russia. E-mail: knissmax@mail.ru.

ный подходы в экономических исследованиях, клиповое мышление, трансфессии.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-76-86

Annotation

The «green» economy phenomenon which is developing in advanced countries of the world, as it is clearly seen from research, is still not supported by theoretical developments to the necessary extent in Russia. That means that there are no regulatory legal acts ensuring it, not enough specialists for its realization and relevant technologies are not being created.

In order to shift to broad practical activities for development of a «green» economy it is necessary to describe the emerging problem theoretically and methodologically to the fullest extent possible, suggest some mechanisms of its solution reducing the negative effects during its implementation substantially.

A conceptually reasonable algorithm for solution of these problems is proposed by the authors of the article. The principal directions of intended research are substantiated in it. The main of them are stating the key notions such as «ecological management – «green» economy – cyclical economy»; analysis of the challenges of «green» economy against the system of forming and development of human capital; formation of the model of an employee's personality – a host of human capital for its realization under «green» economy conditions; mechanism of development of innovational susceptibility of human resources for «green» economy; organization and management of the system of formation of human capital; elaboration of the methodology of innovational susceptibility of an employee's personality – a carrier of human capital.

The research involves a dual movement of an idea

from a methodology of a science to a particular economy and upwards from an employee through hierarchy of organizational structure. It will result in a synergetic effect and save time for the creation of a modern concept of human capital» training for «green» economy and simultaneously implementing author's supervision on introduction of the results of work in any educational establishment subject to it has susceptible to innovations staff members.

This work is predominantly of integrative nature and involves the unity of three sciences: systemic economy, philosophy and pedagogy of professional education.

Key words: human capital, «green» economy, information and communication technologies, multidisciplinary and transdisciplinary approach in economic research, clip thinking, transfessions.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-76-86

Прогресс человеческого общества
возможен только в единстве с природой.

Общество должно сформулировать феномен «зеленой» экономики не как определенную частность своей жизнедеятельности, а как синтетический вызов времени, меняющий экономическое и нравственно-этическое поведение людей в системе «человек-природа» [1].

Феномен «зеленой» экономики до сих пор не подкреплён в должной мере теоретическими разработками, а значит, нет нормативно-правовых актов, нет кадров для ее осуществления, не разрабатываются и соответствующие технологии.

Для перехода к широкой практической деятельности по развитию «зеленой» экономики необходимо теоретически и методологически максимально

полно описать складывающуюся проблему, предложить механизмы ее решения с последующим существенным снижением негативных действий в ходе реализации.

Требуется комплексное решение проблем «зеленой» экономики:

- понимание самого термина в его существенных признаках и логических связях с другими категориями (понятиями), характеризующими «зеленое» развитие как систему и как процесс;

- установление места «зеленой» экономики в производственно-технологической цепочке и в социально-экономической деятельности людей;

- выделение специфики влияния национальных и региональных условий, ментальности местного населения

на успешность осуществления «зеленой» экономики;

- составление перечня профессиональных компетенций (знаний, умений, владений), которыми специалисты по «зеленой» экономике должны обладать;

- определение результативности деятельности (эффективности функционирования) специалистов по «зеленой» экономике [2].

Проводником всех идей должна стать система образования и воспитания человека и гражданина на государственном уровне как носителя формируемого человеческого капитала*.

Подготовка работника с новым мышлением, активного носителя человеческого капитала, адекватного требованиям «зеленой» экономики, может быть организована в современной пространственно-временной среде, в другой дизайн-архитектуре, на базе новых информационно-коммуникативных технологий (ИКТ) обучения, новыми педагогами с учетом формируемого мирового сетевого образовательного пространства, на базе экономики знаний.

Такой подход в полной мере соотносится с вариантами социально-экономического развития Свердловской области. В соответствии с прогнозом областного Министерства экономики по социально-экономическому развитию региона, ближайшие 15 лет события могут развиваться в четырех вариантах: инерционный (первый, самый мрачный), умеренно-консервативный, базовый и инновационно-форсированный (четвертый, самый радужный) [3].

Самый благоприятный сценарий предполагает такое развитие высокотехнологичных и наукоемких отраслей, при котором экономика Свердловской области по своей структуре приблизится к уровню развитых стран. Он предусматривает развитие возобновляемых

источников энергии в регионе, высокий уровень инвестиций в разработку экологически-эффективных технологий, экономическое стимулирование сокращения выбросов, сбросов, образования и утилизации отходов.

Ранее нами сформулирован оптимальный подход в достижении цели данного исследования [1], возможный только на междисциплинарном уровне, где базовыми характеристиками будут теории системной [4] и институциональной экономики [5], психологии и педагогики профессионального образования [2], экономифизики [6], информационной экономики [7] и др.

Такой мультидисциплинарный и трансдисциплинарный подходы требуют кардинального пересмотра стереотипов отношения человека к осмыслению стоимости личностного человеческого капитала, возможности его развития и активного «выставления» на рынок.

Высказывается мнение, что инновационный процесс не нужен доминирующим группам, потому что инновации могут взорвать существующие соотношения сил и разрушить институты, на которые привыкли опираться доминирующие группы в любой стране. Он может быть не нужен и другим группам общества, так как он вызывает необходимость смены среды обитания, постоянное обучение новым технологиям и знаниям.

«Зеленая» экономика, функционирующая в реальных условиях, требует создания новых специальностей и квалификаций, о существовании которых мы пока и не догадываемся [8].

Ясно одно, что инерционные механизмы, противодействующие развитию и внедрению «зеленой» экономики, будут работать. Динамические характеристики больших систем еще никто не отменял, тем более таких, как социум в целом, система образования и др.

* На решение этих проблем направлена программа УрО РАН «Научно-техническое развитие регионов на принципах зеленой экономики (2018–2020 гг.) и ее первый этап «Теоретико-методологическое обоснование феномена «зеленой» экономики как синтетического вызова времени и принципов ее функционирования».

Последние решения руководства России явно направлены на решение «зеленой» проблематики [9]. Техника и технологии работают уже вживую. Но где те кадры, которые, как известно, решают все?

В многочисленных разработках российских и зарубежных ученых [1] практически нет информации по формированию и приумножению человеческого капитала как решающего фактора достижения конкурентных преимуществ организации для «зеленой» экономики и далее циркулярной экономики.

Может, это связано с тем, что система профессионального образования уже готовит востребованных «зеленой» экономикой специалистов? К сожалению, это не так.

В стране продолжается модернизация образования. Общим местом в настоящее время стала критика системы профессионального образования. Отмечается ее главный недостаток – отсутствие обоснованной методологии модернизации (реформирования, трансформации и т.д.). Результаты этих модернизаций никого не устраивают.

Продолжаются перемены в системе профессионального образования*. Но до сих пор неясно, куда идет страна, в русле каких тенденций она находится, какой национальной идее следует, какой гражданин и специалист ей нужен и какая для этого нужна для их подготовки система профессионального образования?

Понятно, что вместе с новым вектором мирового развития должна прийти и новая модель профессионального

образования. Что она возьмет с собой из прошлого опыта?

В действующей в России модели образование превращается в высокорентабельную сферу бизнеса, а вместо знаний утверждаются компетенции и соответствующие навыки – в виде товара, который в данный момент нужен бизнесу [10]. Ректор одного из вузов исходя из данной концепции сказал, что преподаватель, не занимающийся наукой, оказывается единицей нерентабельной(!).

Конечная цель проекта отказа от бесплатного высшего образования заключается в ликвидации к 2030 г. национальных традиционных моделей образовательных систем и переходе на глобальные образовательные платформы «Университет для миллиарда» [11].

На 2019–2022 гг. намечена цель: уход государства из сферы образования (за исключением административных функций) и приход в него «инновационного бизнеса» (который вместо государственного задания будет готовить кадры по своим программам и своему усмотрению).

Бесплатное образование по этим документам предполагается ликвидировать. Останется немного исключений, например, военное образование, некоторые вузы стратегической направленности. Какое место в этой логике займут транспортные университеты?

Если принять логику авторов проектов о переходе от образования как общественного блага к его пониманию как «образовательной услуги», то все становится закономерно и понятно. Именно так живет или собирается жить в перспективе западный мир.

* Антропов В.А. Проблемы модернизации и инноваций в российском профессиональном образовании. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2013. – 104 с.; Распоряжение правительства РФ от 30.04.2014 №722-р «Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Изменения в отраслях социальной сферы, направленные на повышение эффективности образования и науки»; Приказ Минобрнауки России от 14.09.1999 №286 (ред. от 08.10.2002) «Об утверждении макетов государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования и требований (федерального компонента) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки выпускников» (вместе с «Требованиями (федеральный компонент) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки бакалавра и дипломированного специалиста по циклу «Общие гуманитарные и социально-экономические дисциплины», «Требованиями (федеральный компонент) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки бакалавра и дипломированного специалиста по циклу «Общие математические и естественнонаучные дисциплины»); Постановление правительства Российской Федерации от 23.05.2015 г. № 497 «О Федеральной целевой программы развития образования на 2016–2020 гг».

Начало идущих преобразований было положено еще в 90-е гг. прошлого века, закрепленных федеральными стандартами образования [12]. Авторы сумели сделать «революционный» шаг: они заменили (подменили) понятия «образование» и «воспитание» понятием «компетенция». Ключевым стало слово «услуга» [13].

Целостный педагогический процесс взаимодействия «педагог – обучаемый» заменили на утилитарное (потребительское) взаимодействие «продавец – покупатель». Только полностью поменяв образовательную идеологию, можно организовать такое взаимодействие.

В этой парадигме ни о каком моральном, патриотическом, разностороннем развитии речи нет – бизнес не будет за это платить. А с помощью формирования «клипового мышления» для общества потребления создаётся «человек одной кнопки» [14].

В конечном итоге человечество в этой схеме разделится на контролируемых и контролирующих. Вместо традиционного классического понятия гуманизма, который Запад фактически забыл, во всех документах внедряется понятие «биоэтика», меняющаяся с развитием технологий [14].

Смысл внедряемых конвергентных технологий – изменение сознания человека, который перестаёт себя ощущать личностью, добровольно становится частью нейромра. Мы готовы стать другими – послушными исполнителями? А ведь это гарантия сытой «западной жизни» для всех, принявших это мироустройство. Но приемлема ли эта концепция для России?

Для нас – нет! Это становится особенно понятно с позиций «зеленой» экономики, которой соответствует другая модель человека, живущего в контакте с природой. Для его развития нужна и другая – природосообразная технология обучения. Наше видение противоречит идущей модернизации образования, но нам представляется наиболее верным.

Система эффективно работает только в том случае, если есть понимание цели системы, что должно быть на входе и выходе из нее, а нижние иерархические уровни максимально свободны. В России такого понимания нет. Только один пример вузовской реальности: в активно развивающейся магистратуре нет единого университетского обоснованного понимания модели ее выпускника.

Качество подготовки выпускников вузов падает, а это объективный критерий того, что в системе работает что-то не так. И продвижение наших федеральных (национальных, исследовательских) и других успешных вузов в рейтингах общей картины не спасает [15]. В результате работодатели, не видя перспектив в улучшении ситуации, организуют собственную подготовку кадров, развивая внутрифирменную систему подготовки, открывая корпоративные университеты и другие обучающие структуры, думая даже и об открытии аспирантуры.

Возникли две конкурирующие образовательные структуры: стационарная и внутрифирменная. С позиций методологии у обеих – вузовской и производственной – систем разных понятийный аппарат, разные законы функционирования.

Но у них есть два объединяющих начала: единая общегосударственная идея (видение и миссия) наверху (дедуктивное осмысление проблемы) и рабочее место внизу, в основании (индуктивный подход). С нашей точки зрения, их встречное движение объединит (обеспечит взаимопроникновение) две подсистемы в одну, где каждому ее участнику будет комфортно строить прогнозы на свою жизнь от школьной скамьи до выхода на заслуженный отдых.

Такая стратегия должна создаваться на базе интегративного подхода, на междисциплинарной основе, в соответствии с последними достижениями экономики и психологии в их взаимопроникающем единстве.

Реформа управления образованием, воссоздание Министерства науки и высшей школы, объединение образования и науки – шаг вперед в этом направлении. Правда, за бортом осталась система профессионального образования в компании школ и детских садов. А до этого было разрушена система начального профессионального образования. Трудности воссоздания (реанимации) российской системы формирования и развития человеческого капитала налицо.

Методологически формирование человеческого капитала для «зеленой» экономики России решается просто. Разрабатывается понимание новых экономических категорий («зеленая» и «циркулярная» экономики) в их существенных признаках. Их четкая формулировка влечет за собой создание инструментария и шкал оценки этих признаков, формирование на их основе вызовов системе образования и воспитания по формированию этих признаков.

Сформулированные вызовы – это сигналы для системы профессионального образования и воспитания по формированию соответствующих профессиональных компетенций и стандартов, усвоение которых обеспечивает формирование человеческого капитала для «зеленой» экономики как нового миропонимания органической практически родственной связи человека и природы.

Однако результаты научных исследований перекрываются административными документами, активно используемыми в аккредитационных процедурах, но не в реальном учебном процессе. В них нет информации об авторстве, нет обоснованной базы их формулировок.

Наши авторские разработки позволяют устранить этот пробел. Возможно, есть и лучшие варианты движения мысли от вызовов экономики к реалиям подготовки востребованных «зеленой» экономикой кадров, но нам они неизвестны*.

Мы рассматриваем нашу проблему как профессионально-педагогическую, опирающуюся на экономику, решение которой обеспечит методологически осмысленную формулировку федеральных государственных образовательных стандартов, отраслевых профессиональных стандартов, соответствующей учебно-программной документации для современной обучающей технологии, обеспечивающей эффективное формирование и развитие человеческого капитала.

Наши исследования имеют методологическую основу, позволяющую далее реализовать их в инструментальном выражении на уровнях общего, особенного и частного, используя мультидисциплинарные и трансдисциплинарные методы исследования.

Такой подход объединяет дедуктивный и индуктивный подходы в исследованиях, дает исследователям универсальный инструментальный решенный проблем «зеленой» экономики**.

В качестве объекта исследования выступает «зеленая» экономика в единстве ее существенных характеристик на региональном уровне, предмет исследования – человеческие ресурсы (человеческий капитал) для «зеленой» экономики.

Разработка теоретико-методологических положений (законов, принципов) по формированию нового качества человеческого капитала, отвечающего требованиям развития «зеленой» и далее циркулярной экономики, предполагает решение следующих задач:

* Еще раз уточним, что наша статья ставит своей целью обоснование необходимости и актуальности создания концепции формирования и развития человеческого капитала для «зеленой» экономики России. В ней нет конечных результатов. Они будут через один-два года. Мы хотим проверить правильность выбранного пути или, по крайней мере, найти сторонников нашей идеи.

** Предлагаемый подход оригинален и будет испытан в ходе выполнения гранта по программе УРО РАН «Научно-технологическое развитие регионов на принципах «зеленой» экономики», подраздел «Механизмы формирования нового качества человеческого капитала в контексте развития «зеленой» экономики».

- формулировка категории «зеленая экономика», определение ее места среди других экономик в системе родовидовых отношений и существенных признаков;

- конкретизация понятия «человеческие ресурсы (капитал) для «зеленой» экономики, формулировка существенных признаков понятия;

- формулировка (коррекция) федеральных государственных образовательных стандартов, отраслевых профессиональных стандартов, соответствующей учебно-программной документации (учебно-методические комплексы) для формирования и развития человеческих ресурсов, способных эффективно работать в условиях «зеленой» экономики;

- разработка теоретико-методологических и методических основ системного формирования и развития человеческого капитала в целесообразно организованной пространственно временной среде;

- создание документации, способной обеспечить формирование и развитие человеческого капитала;

- оценка стоимости формируемого человеческого капитала для «зеленой» экономики;

- разработка теоретико-методических основ подготовки качественного профессорско-преподавательского состава, способного обеспечить формирование и развитие человеческого капитала для «зеленой» экономики;

- определение факторов, формирующих новое качество (компетенции, образование, здоровье, ценности, мотивация, потребности, потенциал времени, межпоколенное взаимодействие и т.п.) и определить степень их влияния на экономическое развитие;

- разработка механизмов формирования нового качества человеческого капитала и направления их функционирования.

А это значит, что исследовательская мысль должна двигаться от экологического просвещения к экологическому поведению; от экологизации производства к экологизации всей жизнедеятельности человека; от устойчивого природопользования к разворачиванию «зеленой» экономики.

Технологические направления решения экологических проблем должны учесть необходимость перехода от подготовки специалистов с производственно-прибыльным мышлением к экологически ориентированному мышлению на базе переосмысления модели современного работника; от традиционных источников энергии к возобновляемым; от традиционного проектирования поселений к экологическому дизайну (междисциплинарный подход).

В Стратегии «Инновационная Россия-2020» [16], указаны пять ключевых задач*. Для их решения необходимы мощные междисциплинарные исследования, логика движения мысли в которых приведена ниже. Конечно, как один из возможных вариантов.

Развитие понятийно-категориального аппарата проблемы исследования человеческого капитала для «зеленой» экономики на междисциплинарной основе.

1.1. Основополагающие понятия теории человеческого капитала.

1.2. Междисциплинарные понятия «человеческого капитала».

1.3. Диалектика развития понятий экологический менеджмент – «зеленая» экономика – циклическая экономика и того, что за ними кроется для будущего России.

Анализ вызовов «зеленой» экономики системе формирования и развития человеческого капитала.

2.1. Ситуация в экономике. Вызовы реальной экономики системе профессионального образования.

* И первая задача среди них – изменить людей, повысить восприимчивость к инновациям, расширить класс инновационных предпринимателей, создать атмосферу терпимости к риску. Для инновационной экономики нужен инновационный человек, ориентированный на создание и внедрение инноваций во всех сферах общественной жизни.

2.2. Вызовы «зеленой» экономики работнику как реальному носителю человеческого капитала.

2.3. Формирование модели личности работника – носителя человеческого капитала для его реализации в условиях «зеленой» экономики.

2.4. Механизм развития инновационной восприимчивости человеческих ресурсов для «зеленой» экономики.

Разработка теоретико-методологических и организационно-методических основ формирования и развития человеческого капитала в целесообразно организованной пространственно-временной среде.

3.1. Теоретико-методологические основы развития человеческого капитала для «зеленой» экономики (современное видение).

3.2. Административно-правовое обеспечение системы формирования и развития человеческого капитала в аспекте основополагающих документов, в т.ч. Закона «Об образовании в РФ».

3.3. Организация и управление системой формирования человеческого капитала, таких как стационарное и внутрифирменное обучение – диалектика сочетания; развитие человеческого капитала взрослых (проблемы андрогеники); корпоративные университеты, НОЦы и другие варианты структур формирования человеческого капитала; отраслевые, исследовательские, опорные, базовые и другие университеты.

3.4. Современная технология формирования и развития человеческого капитала предусматривает пространственные характеристики ареала развития человеческого капитала, использование сетевых структур, архитектурно-планировочное обеспечение обучающих технологий, проблемы эргономики, временные характеристики обучающихся технологий: от Коменского к нашим дням, методологию, принципы и методы формирования системы знаний, направленной на опережающее развитие «зеленых» специалистов, формы и методы обучения, мониторинг развития и оценки качества человеческого

капитала, проблемы рейтингования образовательных учреждений, проблемы аккредитации, современные средства и способы развития человеческого капитала, информационно-коммуникативные технологии, движущий механизм развития человеческого капитала как диалектическое сочетание потребности личности в образовании и потребности организации в формировании внутрифирменной экономики знаний, разработку системы подготовки качественного профессорско-преподавательского состава, способного обеспечить формирование и развитие человеческого капитала для «зеленой» экономики, инвариантное ядро профессионально значимых качеств ППС, каналы финансирования системы развития человеческого капитала, оценку эффективности процесса развития человеческого капитала, время адаптации на рабочем месте (важнейший критерий качества подготовленного специалиста).

4. Формирование государственных образовательных стандартов, отраслевых профессиональных стандартов, соответствующей учебно-программной документации (учебно-методические комплексы) для формирования и развития человеческих ресурсов.

5. Разработка методики инновационной восприимчивости личности работника – носителя человеческого капитала.

6. Системное обеспечение формирования и развития нового качества ЧК для «зеленой» экономики: элементы, связи, механизмы.

7. Апробация системы и ее авторское сопровождение.

Достоинство работы – интегративный характер и наличие творческого коллектива, способного ее выполнить. Она предусматривает единство как минимум трех наук: системной экономики, философии и педагогики профессионального образования. Они возьмут на себя ответственность за формулировку видения модели специалиста, востребованного «зеленой» экономикой и ту технологию (механизм), которая позволит

сформировать такую модель в аспекте конкретного «зеленого рабочего места».

Встречное движение сверху от методологии науки к конкретной экономике и от рабочего места вверх по иерархии организационной структуры даст синергетический эффект и сэкономит время создания современной концепции

подготовки человеческого капитала для «зеленой» экономики, одновременно реализуя авторское сопровождение по внедрению результатов работ на базе любого образовательного учреждения, если там есть восприимчивый к новациям коллектив. ■

Литература

1. Антропов В. А., Бочко В. С., Книсс М. Ю. Развитие «зеленой» экономики России // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 68–84. ISSN 2079-0392.
2. Антропов В. А. Проблемы модернизации и инноваций в российском профессиональном образовании. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2013. 104 с. ISBN 978-5-94646-420-8.
3. О системе прогнозирования социально-экономического развития в Свердловской области. URL: <http://economy.midural.ru/content/prognoz> (дата обращения: 27.03.2019).
4. Клейнер Г. Б. Системная парадигма и экономическая политика // Общественные науки и современность. 2007. № 3. С. 99–114. ISSN 0869-0499.
5. Попов Е. В. Институты. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2015. 712 с. ISBN 978-5-94646-515-1.
6. Водолазский А. А. Эконофизика и законы здоровой экономики. Очерки о производительности труда и модернизации экономики. Новочеркасск : «НОК», 2012. 86 с. ISBN 978-5-8431-0245-6.
7. Корнейчук Б. В. Информационная экономика : учебное пособие. СПб : Питер, 2006. 400 с.
8. Кудряков С. А., Остапченко Ю. Б., Шаповалов Е. Н., Романцев В. В. Транспрофессиональная подготовка современных специалистов: миф и реальная необходимость // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 94–98.
9. Зеленый свет «зеленой» экономике: Россия на пути к устойчивому развитию. URL: <https://tass.ru/obschestvo/3977766> (дата обращения: 27.03.2019).
10. Лукша П. В ожидании «девятого вала»: компетенции и модели образования для 21 века. URL: <http://www.slideshare.net/edu2035/gefmoscov-edcrunch-preparing-for-the-tide>. – 2015. (дата обращения: 17.03.2019).
11. Еврезов Д. В., Майер Б. О. «Образование 2030» – вызов системе образования // Вестник НгПУ. 2014. № 2 (18). С. 133–149. ISSN 2226-3365
12. Приказ Минобрнауки России от 14.09.1999 №286 (ред. от 08.10.2002) «Об утверждении макетов государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования и требований (федерального компонента) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки выпускников» (вместе с «Требованиями (федеральный компонент) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки бакалавра и дипломированного специалиста по циклу «Общие гуманитарные и социально-экономические дисциплины», «Требованиями (федеральный компонент) к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки бакалавра и дипломированного специалиста по циклу «Общие математические и естественно-научные дисциплины»). URL: <https://www.lawmix.ru/expertlaw/159576> (дата обращения: 27.03.2019).
13. Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ (ред. от 02.03.2016). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201212300007.pdf> (дата обращения: 26.03.2019).
14. Демонтаж суверенитета. URL: <http://argumenti.ru/society/n523/432461> (дата обращения: 26.03.2019).
15. Антропов В. А. Транспортный университет в российских и международных рейтингах. // М-лы IV Всеросс. симпозиума по региональной экономике. – Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2017. 292 с.
16. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года. URL: <https://giod.consultant.ru/documents/1593085?items=1&page=5> (дата обращения: 25.03.2019).

Literature

1. Antropov V. A., Bochkov V. S., Kniss M. Yu. Development of «green» economy in Russia [Razvitie «zelenoj» ekonomiki Rossii] // Herald of USURT [Vestnik UrGUPS]. 2018. № 3 (39). P. 68–84. ISSN 2079-0392.
2. Antropov V. A. Problems of modernization and innovation in Russian professional education. Yekaterinburg [Problemy modernizacii i innovacij v rossijskom professional'nom obrazovanii. Yekaterinburg]: Institute of economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences, 2013. 104 c. ISBN 978-5-94646-420-8.
3. On the system of prediction of social and economic development in Sverdlovsk region [O sisteme prognozirovaniya social'no-ekonomicheskogo razvitiya v Sverdlovskoj oblasti] URL: <http://economy.midural.ru/content/prognoz> (reference date: 27.03.2019).
4. Kleyner G. B. Systemic paradigm and economic policy // Social sciences and modernity [Sistemnaya paradigma i ekonomicheskaya politika // Obshchestvennye nauki i sovremennost']. 2007 № 3. pp. 99–114. ISSN 0869-0499.
5. Popov E. V. Institutes. Yekaterinburg [Instituty. Yekaterinburg]: Institute of economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences, 2015. 712 p. ISBN 978-5-94646-515-1.
6. Vodolazskiy A. A. Econophysics and laws of a healthy economy. Outlines on labour productivity and modernization of economy. [Ekonofizika i zakony zdorovoj ekonomiki. Ocherki o proizvoditel'nosti truda i modernizacii ekonomiki.] Novocherkassk: «NOK», 2012. 86 p. ISBN 978-5-8431-0245-6.
7. Kornejchuk B. V. Information economy [Informacionnaya ekonomika]: teaching aid. Saint-Petersburg : Piter, 2006. 400 p.
8. Kudryakov S. A., Ostapchenko Yu. B., Shapovalov E. N., Romancev V. V. Transprofessional training of modern specialists: myth and real need // News-bulletin Saint-Petersburg electrotechnical university “LETI” [Transprofessional'naya podgotovka sovremennykh specialistov: mif i real'naya neobhodimost' // Izvestiya SPbGETU «LETI»]. 2014. № 8. p. 94–98. ISSN 2071-8985.
9. A free-pass for a «green» economy: Russia on the way to steadfast development. [Zelenyj svet «zelenoj» ekonomike: Rossiya na puti k ustojchivomu razvitiyu] URL: <https://tass.ru/obschestvo/3977766> (reference date: 27.03.2019).
10. Luksha P. V. In expectation of the «ninth wave»: competences and models of education for the 21st century. [V ozhidanii devyatogo vala: kompetencii i modeli obrazovaniya dlya 21 veka.] URL: <http://www.slideshare.net/edu2035/gefmoscov-edcrunch-preparing-for-the-tide>. (reference date: 17.03.2019).
11. Evrezov D. V., Mayer B. O. «Education 2030» – a challenge against the system of education // Herald of NSPU. [«Obrazovanie 2030» – vyzov sisteme obrazovaniya // Vestnik NgPU] 2014. № 2 (18). P. 133–149. ISSN 2226-3365.
12. Decree of Russia's Ministry of Education of 14.09.1999 № 286 (edited on 08.10.2002) «On approval of patterns of state educational standards for higher professional education and requirements (of a federal component) for compulsory minimum of content and level of training of graduates» (including «Requirements (a federal component) for compulsory minimum of content and level of training for a bachelor's degree, certified specialist on curriculum cycle of «Allhumanities, social and economic disciplines», «Requirements (a federal component) for compulsory minimum of content and level of training of a bachelor's degree, certified specialist on curriculum cycle of «Allmathematics and natural science disciplines»») [Prikaz Minobrazovaniya Rossii ot 14.09.1999 № 286 (red. ot 08.10.2002) «Ob utverzhdenii maketov gosudarstvennykh obrazovatel'nykh standartov vysshego professional'nogo obrazovaniya i trebovanij (federal'nogo komponenta) k obyazatel'nomu minimumu soderzhaniya i urovnyu podgotovki vypusknikov» (vmeste s «Trebovaniyami (federal'nyj komponent) k obyazatel'nomu minimumu soderzhaniya i urovnyu podgotovki bakalavra i diplomirovannogo specialista po ciklu «Obshhie gumanitarnye i social'no-ekonomicheskie discipliny», «Trebovaniyami (federal'nyj komponent) k obyazatel'nomu minimumu soderzhaniya i urovnyu podgotovki bakalavra i diplomirovannogo specialista po ciklu «Obshhie matematicheskie i estestvenno-nauchnye discipliny»)] URL: <https://www.lawmix.ru/expertlaw/159576> (reference date: 27.03.2019).
13. On education in the Russian Federation: Federal law of 29.12.2012 № 273-FL [Ob obrazovanii v Rossijskoj Federacii: Federal'nyj zakon ot 29.12.2012 № 273-FZ] (edited

- on 02.03.2016). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201212300007.pdf> (reference date: 26.03.2019).
14. Dismantling of sovereignty [Demontazh suvereniteta] URL: <http://argumenti.ru/society/n523/432461> (reference date: 26.03.2019).
 15. Antropov V. A. Transport university according to Russian and international rating. // Contributions of IV All-Russia simposium on regional economy. [Transportnyj universitet v rossijskikh i mezhdunarodnyh rejtingah. // M-ly IV Vseross. simpoziuma po regional'noj ekonomike.] – Yekaterinburg: Institute of economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences, 2017. 292 p.
 16. The Russian Federation's Strategy of innovational development for the period up to 2020. [Strategiya innovacionnogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda.] URL: <https://giod.consultant.ru/documents/1593085?items=1&page=5> (reference date: 25.03.2019).

Статья сдана в редакцию 29 апреля 2019 года

0,93 а. л.

Безопасность деятельности человека

УДК 628.5

А. Р. Закирова

Концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц

UDC 628.5

A. R. Zakirova

Evaluation concept of additive effect of electric and magnetic fields up to 1 kHz on personnel

Аннотация

Статья посвящена теоретическому развитию концепции оценки аддитивного воздействия на персонал железнодорожного транспорта электрических и магнитных полей до 1 кГц. Поднята проблема по совершенствованию нормативной базы в области оценки, контроля и нормирования низкочастотного ЭМП в производственных условиях. Из-за отсутствия на законодательном уровне оценки и контроля ЭП и МП до 1 кГц (кроме 50 Гц) работники по этому фактору не направляются на профилактический медицинский осмотр, тем самым не представляется возможным на ранних стадиях предупредить профессиональную заболеваемость у персонала.

Решение вышеуказанной проблемы повлечет за собой снижение проблем в области профессиональной заболеваемости (включение данного фактора в перечень профессиональных заболеваний по электрическим и магнитным полям в низкочастотном диапазоне, возможность своевременного направления работников на профилактические медицинские осмотры с целью предупреждения еще на ранних стадиях возможной профессиональной заболеваемости). Представлена практика нормирования низкочастотных электрических и магнитных полей в странах ЕС. Показано, что в России существует потребность в разработке ПДУ электрических и магнитных полей до 1 кГц для персонала, обслуживающего электроустановки тягового электроснабжения.

Предложена концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц, которая позволяет разработать методику оценки и нормирования электрических и магнитных полей низкочастотного диапазона в производственных условиях, тем самым заполнить пробел в области нормирования ЭМП в России.

Ключевые слова: магнитное поле, электрическое поле, электротехнический персонал, аддитивное воздействие.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-87-93

Annotation

The article focuses on theoretical development of evaluation concept of additive effect of electric and magnetic fields up to 1 kHz on railway personnel. The problem of improvement of normative base in evaluation, control and normalization of low-frequency EMF under factory conditions is put forward. Due to the lack of evaluation and control of EF and MF up to 1 kHz (apart from 50 Hz) on the low level, workers are not sent to prophylactic medical examination, therefore it is impossible to prevent occupational morbidity in the staff at early stages. The solution will result in reduction of problems in occupational morbidity (inclusion of this factor into the list of occupational diseases caused by electric and magnetic fields within low-frequency range, opportunity of timely direction of workers to prophylactic medical inspections for prevention of probable occupational morbidity at early stages).

The article presents practices of normalization of low-frequency electric and magnetic fields in EU countries. It shows that in Russia there exists the necessity in elaboration of maximum acceptable level for electric and magnetic fields up to 1 kHz for personnel, attending traction power supply units.

The evaluation concept of additive effect of electric and magnetic fields up to 1 kHz on the personnel is proposed which makes it possible to elaborate methods of evaluation and normalization of low frequency electric and magnetic fields under factory conditions, filling in a gap in EMF normalization in Russia in this way.

Keywords: magnetic field, electric field, electro technical personnel, additive effect.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-87-93

Статья рекомендована к публикации К.Б. Кузнецовым, д-ром техн. наук, профессором; кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: kobokuz@gmail.com.

Альфия Резавановна Закирова, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: AZakirova@usurt.ru.

The article is recommended for publishing by K.B. Kuznetsov, Doctor of technical science, Professor; Department of Technosphere Safety, Ural state university of railway transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: kobokuz@gmail.com.

Alpha Rezavanovna Zakirova, Candidate of technical science, Associate Professor; Department of Technosphere Safety, Ural state university of railway transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: AZakirova@usurt.ru.

На рабочих местах электротехнического персонала, обслуживающего электроустановки РУ-3,3 кВ, имеются электрические (ЭП) и магнитные поля (МП) со спектром высших гармонических составляющих до 1кГц [1]. В России оцениваются и нормируются только ЭП и МП частотой 50 Гц и 10 кГц (а там еще есть 100, 200, 300 и т.д. до 10000 Гц), поэтому необходимо совершенствовать нормативную базу по оценке, нормированию и контролю электрических и магнитных полей до 10 кГц. В других странах имеется практика нормирования электрических и магнитных полей частотного диапазона до 1кГц. Еще в 1995 г. Европейский комитет электротехнической стандартизации CENELEC утвердил стандарт CENELEC ENV 50166 [2]. В 2013 г. Европейский парламент и Совет Европейского Союза пересмотрели Директиву 2004/40/ЕС и ввели в действие Директиву 2013/35/ЕС [3]. Но в России указанные нормативные документы в области нормирования электромагнитных полей не применяются. Например, национальный стандарт РФ ГОСТ Р 54148—2010 (ЕН 50366:2003) «Воздействие на человека электромагнитных полей от бытовых аналогичных электрических приборов. Методы оценки и измерений» [4] является модифицированным по отношению к европейскому стандарту ЕН 50366:2003 «Бытовые и аналогичные электрические приборы. Электромагнитные поля. Методы оценки и из-

мерений» (ЕН 50366:2003 «Household and similar electrical appliances – Electromagnetic fields – Methods for evaluation and measurement»). По [4] можно оценивать и контролировать ЭМП низкочастотного диапазона только от бытовых и аналогичных электрических приборов, в производственных условиях этот документ не применяется.

Безопасные уровни электрических и магнитных полей низкочастотного диапазона, разработанные Европейским комитетом электротехнической стандартизации CENELEC, представлены в таблице 1 [2].

Из таблицы 1 видно, что нормирование для ЭП и МП осуществляется в зависимости от частоты и времени воздействия фактора (только для ЭП до 1500 Гц и МП до 1 Гц) на персонал. В России нормирование ПДУ для МП и ЭП 50 Гц осуществляется для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействий и дифференцировано в зависимости от времени пребывания персонала в электромагнитном поле.

Представляется возможным сравнить ПДУ ЭП и МП 50 Гц в России [6] для общего воздействия на персонал и странах ЕС (таблица 2).

Из таблицы 2 понятно, что по ПДУ электрической составляющей ЭМП (10,72 кВ/м) для 2,66-часового воздействия в России ниже, чем в странах ЕС в 2,8 раз. ПДУ магнитного поля 50 Гц в России при одночасовом воздействии

Таблица 1

Безопасные уровни электрических и магнитных полей до 1500 Гц

Частота	E , кВ/м	Время пребывания, но не более	H , мТл
0–0,1 Гц	42	112/ E	200
0,1–50 Гц	30	80/ E	
50–150 Гц	1500/ f^*		
150–1500 Гц	1500/ f		
1500–10000 Гц	1	–	0,053
0,1–0,23 Гц		8 ч	140
0,23–1 Гц		8 ч	320/ f
1–4 Гц			
4–1500 Гц			
			80/ f

f^* – частота, Гц.

Таблица 2

ПДУ переменного магнитного и электрического полей частотой 50 Гц

В России			В странах ЕС по [2]		
Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, В [мТл]	Допустимые уровни ЭП, Е [кВ/м]	Время воздействия, не более	Допустимые уровни МП, [мТл]	Допустимые уровни ЭП, [кВ/м]
≤1	2,0	16,67		1,60 (время воздействия не регламентируется)	
2	1,0	12,50	2,66		30
4	0,5	8,33			
8	0,1	5,00			

выше, а для 2-, 4- и 8-часового воздействия ниже в 1,6, 3,2 и 16 раз, чем в ЕС.

Нормирование ПДУ для МП и ЭП в низкочастотном диапазоне осуществляется для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействий [3]. При этом используются следующие понятия:

величины предельно допустимых воздействий (ELVs) – величины, установленные на основании рассмотрения биофизических и биологических факторов, в частности, на основании научно установленных краткосрочных и резких прямых эффектов, то есть термальных эффектов и электрической стимуляции мышц;

для электрических полей низкие ALs – уровни, которые соответствуют профилактическим мерам, указанным в Директиве;

для магнитных полей низкие ALs – уровни, которые соответствуют ELVs для образования сенсорных эффектов.

Кроме этих понятий, в Директиве еще применяется термин «высокие ALs» [4], в статье они не рассмотрены.

В таблице 3 приведены ПДУ для ЭМП низкочастотного диапазона, утвержденные Европейским парламентом и Советом Европейского Союза [3].

Как видно из таблиц 1 и 3, уровни нормируемых параметров ЭМП различны для одного и того же частотного диапазона, но, несмотря на это, электротехнический персонал на законодательном уровне защищен от вредного воздействия ЭП и МП до 1кГц, чего нет в России. На обслуживающий персонал выпрямительных установок тягового электроснабжения одновременно действует ЭМП всего спектра вышних гармонических составляющих, при этом оценка, нормирование и контроль ЭП и МП до 1 кГц при аддитивном и вредном их воздействии на персонал не осуществляется ни в России, ни за рубежом.

Таблица 3

Низкие ALs уровни электрических и магнитных полей до 3 кГц

Частота	Низкие ALs (E) (В/м) для напряженности электрического поля (среднеквадратичные значения)	Низкие ALs (B) для плотности магнитного потока (μТ) (среднеквадратичные значения)
$1 \leq f < 25$ Гц	$2,0 \cdot 10^4$	
$25 \leq f < 50$ Гц	$5,0 \cdot 10^5 / f^*$	
$50 \text{ Гц} \leq f < 1,64$ кГц	$5,0 \cdot 10^5 / f^*$	
$1 \leq f < 8$ Гц		$2,0 \cdot 10^5 / f^2$
$8 \leq f < 25$ Гц		$2,5 \cdot 10^4 / f$
$25 \text{ Гц} \leq f < 300$ Гц		$1,0 \cdot 10^3$
$300 \text{ Гц} \leq f < 3$ кГц		$3,0 \cdot 10^5 / f$

f^* – частота, Гц.

Возникающие в этой области вопросы требуют решения, в том числе и на уровне научного исследования, и насколько быстро они будут решены, а результаты представлены в законодательные органы, будет зависеть здоровье людей, профессионально подверженных воздействию низкочастотного ЭМП.

Для оценки электромагнитной обстановки со спектром высших гармонических составляющих под шинным мостом в РУ-3,3 кВ на тяговой подстанции проведены экспериментальные исследования ЭМП (таблицы 4, 5) [7].

Итак, определенной величине тока и частоте соответствует свое значение напряженности МП (таблица 4). Для точек 4–6 уровни напряженности МП 50 Гц составляют 125 А/м, что

превышает значения ПДУ МП (для 8-часового воздействия) в 1,5 раза. Значения напряженностей МП для этих точек опасны для здоровья электротехнического персонала. Для сохранения здоровья необходимо разработать и внедрить организационно-технические мероприятия. Уровни напряженностей магнитных полей с частотами: 100, 200, 250, 350, 400, 500, 550 Гц как при их аддитивном воздействии на персонал, так и при воздействии каждой отдельной напряженности МП не нормируются, не контролируются и не оцениваются. Необходимо гармонизировать ПДУ напряженностей МП частотой до 1 кГц из нормативных документов [2, 3] с учетом требований отечественного законодательства.

Таблица 4

Уровни напряженностей магнитных полей под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

№ точки f_k , Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$H_{\text{норм}}$, А/м
50	8	6	12	125*	125*	125*	15	8,5	6,5	80
100	6	5	5	8	10	9	6	5	4	Не норм.
200	2	1	1	5	7	7	3	2	2	Не норм.
250	5	4	0	18	18	18	15	4	4	Не норм.
350	3	2	2	10	10	5	11	3	3	Не норм.
400	0,5	0,5	0,7	2	2	2	1	0,5	0,8	Не норм.
500	0,5	0,5	0,7	0,2	0,1	0,2	0,5	0,5	0,8	Не норм.
550	0,5	0,5	0,7	7	6	8	7	0,5	0,8	Не норм.
I_{dk} , А	400	300	600	1000	1000	1000	750	420	350	

*Выделенные значения превышают ПДУ

Таблица 5

Уровни напряженностей ЭП под шинным мостом в РУ-3,3 кВ

$U_{\text{раб}} = 3,3 \text{ кВ}$										
№ точки f_k , Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$E_{\text{норм}}$, В/м
25	12	8	12	28	12	12	17	53	12	Не норм.
50	9	9,8	10	17	10	42	42	14	10	5000
100	2	2	2	4	2	3	3	4	2	Не норм.
150	5	7,5	5	8	7	7	8	8	7	Не норм.
200	1	0,7	0,6	1	0,8	0,9	1	1	1	Не норм.
300	2	3	2	4	3	4	3	3	3	Не норм.
400	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	Не норм.
500	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Не норм.
600	1	2,1	1	3	2	0,3	3	3	2	Не норм.

Также возможен вероятностный принцип нормирования электрического и магнитного полей при аддитивном воздействии его на персонал с учетом теоремы Умова – Пойтинга. Обоснованные критерии определения вероятности превышения экспозиции ЭМП при возникновении профессионально обусловленного заболевания приводятся в [8].

Чтобы оценить аддитивность воздействия всего спектра частот МП на электротехнический персонал, необходимо привести полученные величины напряженностей магнитной составляющей ЭМП к ее ПДУ с учетом суммы частотных составляющих по среднеквадратичным значениям:

$$\sqrt{\left(\frac{H_f}{H_{\text{ПДУ}(f)}}\right)^2} < 1, \quad (1)$$

где H_f – напряженность магнитного поля (измеренная или расчетная) на частоте f ; $H_{\text{ПДУ}(f)}$ – ПДУ напряженности магнитного поля на частоте f .

При нарушении условия (1) работодателю необходимо разработать технические мероприятия по минимизации фактических уровней напряженностей H .

В нашем случае на рабочем месте электротехнического персонала присутствуют и магнитное, и электрическое поля со спектром высших гармонических составляющих. Поэтому необходимо оценить воздействие на персонал ЭП со спектром высших гармонических составляющих (таблица 5).

Из таблицы 5 видно, что уровни напряженностей ЭП под шинным мостом (от ВП до ячеек РУ-3,3 кВ) невысокие, что обусловлено тем, что точки измерения находились над металлическими ячейками, где силовые линии напряженности ЭП от шин, проходящих над ячейками, замыкаются на них. Для уровней напряженностей ЭП характерны неизменные значения величин напряженности, так как напряжение

электроустановок практически остается неизменным.

Для оценки воздействия на электротехнический персонал ЭП спектра высших гармонических составляющих при аддитивном их воздействии необходимо привести полученные величины напряженностей ЭП составляющей ЭМП к ее ПДУ с учетом суммы частотных составляющих по среднеквадратичным значениям:

$$\sqrt{\left(\frac{E_f}{E_{\text{ПДУ}(f)}}\right)^2} < 1, \quad (2)$$

где E_f – напряженность электрического поля (измеренная или расчетная) на частоте f ; $E_{\text{ПДУ}(f)}$ – ПДУ напряженности электрического поля на частоте f .

В случае невыполнения условия (2) необходимо разработать технические решения по минимизации фактических уровней напряженностей E .

Так как на рабочем месте электротехнического персонала электрические и магнитные поля спектра высших гармонических составляющих присутствуют одновременно, то необходимо учесть аддитивность этих факторов производственной среды следующим образом:

$$\sqrt{\left(\frac{H_f}{H_{\text{ПДУ}(f)}}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{E_f}{E_{\text{ПДУ}(f)}}\right)^2} < 1. \quad (3)$$

Если условие (3) не выполняется то, необходимо разработать такое техническое решение, которое позволит снизить фактические уровни напряженностей E и H до выполнения условия (3) и позволит сохранить здоровье персоналу, обслуживающему электроустановки в РУ-3,3 кВ.

На сегодня из-за отсутствия на законодательном уровне оценки и контроля ЭП и МП до 1 кГц (кроме 50 Гц) работники по этому фактору не направляются на профилактический медицинский осмотр, значит, предупредить профессиональную заболеваемость на ранних

стадиях у персонала нельзя. Устранение этого пробела решает целый ряд проблем в области охраны труда.

В результате исследования электромагнитной обстановки в РУ-3,3 кВ показано, что на рабочих местах электро-технического персонала присутствуют ЭП и МП спектром высших гармонических составляющих, которые в России даже не нормируются.

Разработана концепция оценки аддитивного воздействия на персонал электрических и магнитных полей до 1 кГц, которая позволяет:

– разработать методику оценки и нормирования электрических и магнитных полей низкочастотного диапа-

зона в производственных условиях, заполняя пробел в области нормирования ЭМП в России для низкочастотного диапазона до 1 кГц;

– провести анализ электромагнитной обстановки до 1 кГц на рабочих местах персонала, обслуживающего электроустановки, и осуществить синтез электромагнитной обстановки в виде методов нормирования и средств защиты;

– расширить перечень профессиональных заболеваний по электрическим и магнитным полям в низкочастотном диапазоне, включив в качестве вредного фактора аддитивное воздействие ЭМП низкочастотного диапазона до 1 кГц. ■

Литература

1. Кузнецов К. Б. Основы электробезопасности в электроустановках : учеб. пособие. – М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. 495 с. ISBN 978-5-89035-966-7.
2. CENELEC ENV 50166. Human Exposure to Electromagnetic Fields. Low frequency (0 Hz to kHz), 1995. – 17 p.
3. Directive 2013/35/EU of the European parliament and of the council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20-th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). N L 179, 29.06.2013.
4. ГОСТ Р 54148–2010 (ЕН 50366:2003) Воздействие на человека электромагнитных полей от бытовых и аналогичных электрических бытовых приборов. М. : Стандартинформ, 2011. 31 с.
5. СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – М. : Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2016. 75 с.
6. Закирова А. Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей : монография / А. Р. Закирова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – 171, [1] с. ISBN 978-5-94614-428-5.
7. Закирова А. Р. Защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Екатеринбург : УрГУПС, 2013. 160 с. Защищена: 23.05.2013.
8. Закирова А. Р., Кузнецов К. Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания // Вестник УрГУПС. 2014. № 4 (24). С. 82–89. ISSN 2079-0392.

Literature

1. Kuznetsov K.B. Fundamentals of electric safety in power units: teaching aid. – М. : FSBI APE «Resource centre on Railway education» [Osnovy elektrobezopasnosti v elektroustanovkah : ucheb. posobie. – М. : FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»], 2017. 495 p. ISBN 978-5-89035-966-7.
2. CENELEC ENV 50166. Human Exposure to Electromagnetic Fields. Low frequency (0 Hz to kHz), 1995. – 17 p.
3. Directive 2013/35/EU of the European parliament and of the council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20-th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). N L 179, 29.06.2013.

4. GOST P 54148–2010 (EH 50366:2003) Influence of electromagnetic fields from home and analogous electric home appliances on a human being. [GOST R 54148–2010 (EN 50366:2003) Vozdejstvie na cheloveka elektro-magnitnyh polej ot bytovyh i analogichnyh elektricheskikh bytovyh priborov] M. : Standardinform, 2011. 31 p.
5. Sanitary rules and regulations 2.2.4.3359–16. Sanitary and epidemiological requirements to physical factors at work stations. [SanPiN 2.2.4.3359–16. Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochih mestah] – M. : Federal centre of Russia's Health Ministry state sanitary and epidemiological surveillance agency, 2016. 75 p.
6. Zakirova A. R. Protection of electrotechnical personnel from hazardous effect of electrical fields : monograph [Zashhita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdejstviya elektromagnitnyh polej] / A. R. Zakirova. – Ekaterinburg: USURT, 2018. – 171, [1] p. ISBN 978-5-94614-428-5.
7. Zakirova A. R. Protection of traction power supply electrotechnical personnel from hazardous effect of electric fields [Zashhita elektrotekhnicheskogo personala tyagovogo elektroosnabzheniya ot vrednogo vozdejstviya elektromagnitnyh polej]: dissert... for a degree of cand.of tech.science. – Ekaterinburg : USURT, 2013. 160 p. Defended: 23.05.2013.
8. Zakirova A. R., Kuznetsov K. B. Evaluation of electromagnetic surroundings and probability of an occupational illness // Herald of USURT. [Ocenka elektromagnitnoj obstanovki i veroyatnosti vzniknoveniya professional'no obuslovlennogo zabolevaniya // Vestnik UrGUPS] 2014. № 4 (24). P. 82–89. ISSN 2079-0392.

Статья сдана в редакцию 15 апреля 2019 года

1,03 а. л.

УДК 628.5

К. Б. Кузнецов, Г. А. Полунин, А. Р. Закирова

Развитие теории оценки магнитного поля вблизи контактной сети постоянного тока

UDC 628.5

K. B. Kuznecov, G. A. Polunin, A. P. Zakirova

Development of theory of magnetic field assessment nearby a direct current catenary

Аннотация

На стадии проектирования контактной сети необходимо иметь точный математический аппарат для оценки магнитных полей вблизи контактной сети – это связано с возможным вредным воздействием данного фактора на электротехнический персонал, обслуживающий этот объект. Работодатель должен обеспечить персоналу безопасные условия труда по всем факторам производственной среды, в том числе и по постоянному магнитному полю.

В настоящей статье показано, что общая напряженность магнитного поля при учете реального двухрельсового пути достигнет 319 А/м в зависимости от величины тока в контактной сети и расстояния от источника до рассматриваемой точки. Представленное теоретическое решение расчета магнитных полей вблизи контактной сети постоянного тока позволяет в соответствии с контуром «тяговая подстанция – контактная сеть – электропоезд – рельсы – тяговая подстанция» максимально точно представить как поле трех параллельно бесконечных длинных проводов. Проведенные теоретические исследования показали, что предложенная модель расчета постоянного магнитного поля вблизи контактной сети скорректировала полученные уровни в предыдущих вариантах расчетов в 1,56 раза, что важно для точной оценки этого фактора.

Ключевые слова: постоянное магнитное поле, электротехнический персонал, вредный производственный фактор, контактная сеть.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-94-99

Annotation

It is necessary to have an accurate mathematical tool for magnetic field assessment near a catenary at the design stage, this is due to possible detrimental effect of this particular factor on electro-technical personnel who are in charge of the facility. An employer is to provide the staff with safe working conditions in every component of working environment including a constant magnetic field factor.

This article illustrates that the total magnetic field intensity taking into consideration a real duorail track will reach 319 A/m depending on a current strength in the given catenary and distance from the current source to a selected point. The theoretical solution of magnetic fields calculation near a direct current catenary proposed in the present article allows in accordance with the pattern «traction substation – catenary – electric locomotive – rails – traction substation» to submit as a field of three parallel infinitely-long wires. The theoretical research conducted in this work indicated that the proposed model of a constant magnetic field close to a catenary corrected the obtained levels in the previous calculation variants by 1.56 times which is crucial for an accurate assessment of this factor.

Key words: constant magnetic field, electro-technical personnel, harmful occupational factor, catenary.

DOI: 10.20291/2079-0392-2019-2-94-99

Статья рекомендована к публикации В.М. Сай, д-ром техн. наук, профессором. E-mail: vsay@usurt.ru.

Константин Борисович Кузнецов, д-р техн. наук, профессор; кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: kobokuz@gmail.com.

Георгий Александрович Полунин, канд. техн. наук; кафедра «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет); Челябинск, Россия. E-mail: poluninga@mail.ru.

Альфия Резавановна Закирова, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Техносферная безопасность» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: AZakirova@usurt.ru.

This article is recommended for publishing V.M. Say, Doctor of technical sciences, Professor. E-mail: vsay@usurt.ru.

Konstantin Borisovich Kuznecov, Doctor of technical sciences, Professor; «Technospheric safety» Department, the Ural state university of railway transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: kobokuz@gmail.com.

Georgij Aleksandrovich Polunin, Candidate of technical sciences; «Safety of vital activity», the South-Ural state university (National research institute); Chelyabinsk, Russia. E-mail: poluninga@mail.ru.

Al'fiya Rezavanovna Zakirova, Candidate of technical sciences, Associate professor; «Technospheric safety» Department, the Ural state university of railway transport; Yekaterinburg, Russia. E-mail: AZakirova@usurt.ru.

Электротехнический персонал, обслуживающий контактную сеть постоянного тока, подвергается мощному, ничем не компенсированному влиянию магнитного поля [1–2]. Физиологические исследования, проведенные отечественными и зарубежными специалистами, доказали, что электромагнитные поля вызывают у человека заболевания следующих систем: сердечно-сосудистой, нервной, эндокринной, иммунной, провоцируют лейкемии, опухоли головного мозга [3].

Проведем теоретические исследования и определим, каким уровням напряженностей магнитных полей подвергается электротехнический персонал, обслуживающий контактную сеть постоянного тока 3,3 кВ.

В соответствии с моделью, показанной на рис. 1, выполним расчеты напряженностей магнитных полей вблизи контактной сети.

Несущий трос и контактный провод находятся под одним напряжением и по ним протекает суммарный ток; примем допущение, что контактная подвеска, выполняемая на практике в виде цепной подвески, состоящей из несущего троса и контактного провода, может быть заменена одним эквивалентным проводом. Аналогично обратный ток, протекающий по рельсовой сети (на однопутном участке два рельса), заменим

в качестве допущения одним эквивалентным рельсом. При движении электровоза по контактной сети образуется контур «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз – рельсы – тяговая подстанция». Примем допущение о равенстве токов в контактной сети и рельсовой сети и о длине проводов контактной сети, стремящихся к бесконечности ($L \rightarrow \infty$), так как все электромагнитные процессы прекращаются, как правило, в промежутке до тяговой подстанции.

При этих допущениях напряженность МП по оси x [1] может быть определена из соотношения:

$$H_x = \frac{I_k}{2\pi} \left[\frac{-z}{x^2 + z^2} + \frac{z-h}{x^2 + (h-z)^2} \right], \quad (1)$$

где I_k – величина тока в контактной сети, А; x, y, z – расстояния от головки рельса по соответствующим осям до расчетной точки M , м; h – высота подвеса контактной сети над уровнем головки рельса, м.

Напряженность МП по оси z может быть определена по формуле [1]:

$$H_z = \frac{I_k \cdot x}{2\pi} \left[\frac{I}{x^2 + z^2} - \frac{I}{x^2 + (h-z)^2} \right]. \quad (2)$$

Модуль абсолютной величины вектора напряженности магнитного поля в точке M может быть найден из

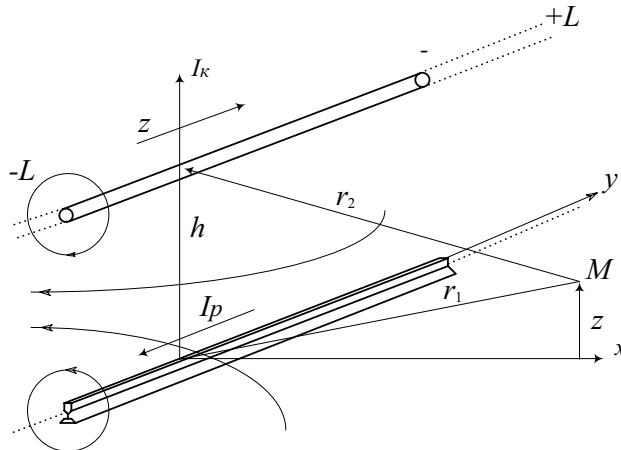


Рис. 1. Схема магнитного поля от источника из двух параллельных проводов с противоположно направленными токами ($L \rightarrow \infty$)

векторной суммы модулей H_z и H_x из выражения:

$$H_M = \sqrt{H_x^2 + H_z^2}. \quad (3)$$

Для расчета напряженности МП на однопутном участке КС примем следующие показатели тяговой сети: величина тока в контактной сети I_K изменяется до 2000 А, высота эквивалентного провода контактной сети $h = 6,2$ м, расстояние от эквивалентного рельса до точки M от 1 м до 5 м, высота на уровне головы роста человека $z = 1,8$ м. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Расчетные значения напряженностей магнитных полей вблизи КС на уровне человеческого роста

$I, \text{ А}$	$H, \text{ при } x, \text{ м}$		
	1	2	5
100	10,2	6,98	2,65
500	51	35	13
1000	102	70	26
1500	153	105	40
2000	204	140	53

Из таблицы 1 видно, что уровень напряженности магнитного поля H существенно снижается с увеличением расстояния от контура тяговой сети.

Величина напряженности магнитного поля имеет максимальные значения (204 А/м) при токе 2000 А и на расстоянии по горизонтали 1 м от уровня головки рельса.

Необходимость рассмотренных данных вызвана тем, что ток, потребляемый электровозом, никогда не бывает неизменным. Потребляемый ток в значительной мере зависит от характеристик профиля пути – крутизны, кривизны, протяженности и сочетания сложных элементов профиля, оказывающих сопротивление движению. Величина тока, потребляемого электровозом, являющегося источником магнитного поля контура тяговой сети, зависит от режима движения поезда (тяги, торможения, холостого хода), основных и дополнительных сил сопротивления движению подвижного состава и числа поездов. Эта величина изменяется в широких пределах, поэтому в таблице 1 приведены значения для величин токов электрической тяги с интервалом 500 А.

Рассчитаем напряженность МП вблизи контактной сети для моделей, когда рельс сдвинут от центра эквивалентного провода вправо (рис. 2) или влево на расстояние x_{p1} , равное половине ширины рельсовой колеи. Принимая, что ток в каждом рельсе равен половине тока в рельсовой и контактной сети,

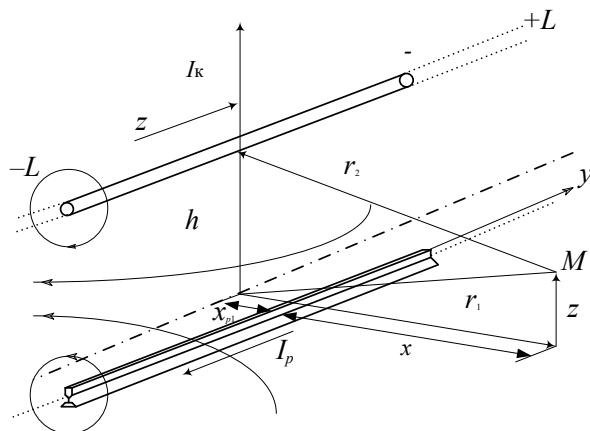


Рис. 2. Схема магнитного поля от источника из двух параллельных проводов с противоположно направленными токами ($L \rightarrow \infty$) при смещении рельса вправо от оси пути на расстояние x_{p1}

рассчитаем аналитически напряженность магнитного поля в первом и втором случае. В дальнейшем, суммируя обе задачи, получим решение о распространении ЭМП в контактной сети при наличии рельсовой колеи из двух рельсов. Соотношения, полученные из предыдущей модели, отличаются только геометрическими составляющими.

Напряженность МП для первого случая по оси x :

$$H'_{x1} = \frac{I_k}{4\pi} \left[\frac{-z}{(x + x_{p1})^2 + z^2} + \frac{z - h}{(x + x_{p1})^2 + (h - z)^2} \right], \quad (4)$$

где x_{p1} – расстояние от оси пути до уровня головки рельса по оси x , равное 0,76 м; h – высота подвеса контактной сети над головкой рельса, м.

Напряженность МП по оси z определяется по формуле:

$$H'_{z1} = \frac{I_k}{4\pi} (x + x_{p1}) \times \left[\frac{1}{(x + x_{p1})^2 + z^2} - \frac{1}{(x + x_{p1})^2 + (h - z)^2} \right]. \quad (5)$$

Модуль абсолютной величины вектора напряженности магнитного поля в точке M может быть найден из векторной суммы модулей H_{z1} и H_{x1} из выражения (3). Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Напряженности магнитного поля в точке M в модели при расположении рельса влево от оси пути можно получить аналогично:

$$H''_{x1} = \frac{I_k}{4\pi} \left[\frac{-z}{(x + 2x_{p1})^2 + z^2} + \frac{z - h}{(x + 2x_{p1})^2 + (h - z)^2} \right], \quad (6)$$

$$H''_{z1} = \frac{I_k}{4\pi} (x + 2x_{p1}) \times \left[\frac{1}{(x + 2x_{p1})^2 + z^2} - \frac{1}{(x + 2x_{p1})^2 + (h - z)^2} \right].$$

Таблица 2

Расчетные значения напряженностей магнитных полей вблизи КС на уровне человеческого роста при расположении рельса влево от оси пути

I, A	H , при x , м		
	1	2	5
100	5,75	4,09	1,80
500	29	20	9,01
1000	58	41	18
1500	86	61	27
2000	115	82	36

Полученные уровни напряженностей МП изменяются от 1,08 до 115 А/м в зависимости от величины тока в контактной сети и расстояния до рассматриваемой точки M , что ниже ПДУ постоянного магнитного поля (8 кА/м).

Суммарное МП при наличии двух рельсов можно определить в виде суммы:

$$H_M = H'_M + H''_M = \sqrt{(H'_{x1})^2 + (H'_{z1})^2} + \sqrt{(H''_{x1})^2 + (H''_{z1})^2}. \quad (7)$$

Соотношения, полученные из предыдущей модели, будут отличаться только геометрическими составляющими. Результаты расчетов напряженности магнитного поля при учете реального двухрельсового пути сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Расчетные значения напряженностей магнитных полей вблизи КС на уровне человеческого роста при учете реального двухрельсового пути

I, A	H , при x , м		
	1	2	5
100	15,95	11,07	4,45
500	80	55	22,01
1000	160	111	44
1500	239	166	67
2000	319	222	89

Общая напряженность магнитного поля при учете реального двухрельсового пути будет изменяться в зависимости

от величины тока в контактной сети и расстояния от источника до расчетной точки М от 4,45 до 319 А/м. При сравнении полученных данных с моделью с эквивалентным рельсом и при учете реального двухрельсового пути уровень напряженности МП увеличился в 1,56 раза.

Решение расчета магнитных полей вблизи контактной сети постоянного тока позволяет с точки зрения распространения МП тяговой сети в соответствии с контуром «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз –

рельсы – тяговая подстанция» наиболее точно представить как поле трех параллельно бесконечных длинных проводов. Проведенные теоретические исследования показали, что уточнение модели и отказ от принятых допущений повышают напряженность магнитного поля в 1,56 раза и играют существенную роль при анализе вредного воздействия МП. Вредное воздействие на персонал постоянной составляющей МП без учета гармоник переменного тока [4, 5] в соответствии с ПДУ постоянного МП (8 кА/м) не оказывается. ■

Литература

1. Кузнецов К. Б. Основы электробезопасности в электроустановках : учеб. пособие. М. : ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. 495 с. ISBN 978-5-89035-966-7.
2. Закирова А. Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей : монография / А. Р. Закирова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – 171, [1] с. ISBN 978-5-94614-428-5.
3. Бинги В. Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Милта, 2002. 592 с. ISBN 5-94505-033-4.
4. Закирова А. Р. Оценка аддитивного воздействия электрических и магнитных полей низкочастотного диапазона в производственных условиях // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 106–116. ISSN 2079-0392.
5. Кузнецов К. Б., Закирова А. Р. Оценка сочетанного воздействия на человека электрической и магнитной составляющих ЭМП // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 54–57. ISSN 1815-9400.
6. Закирова А. Р., Кузнецов К. Б. Оценка ЭМП на рабочих местах электротехнического персонала тягового электроснабжения // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 112–117. ISSN 1815-9400.

Literature

1. Kuznecov K. B. Basics in electrical safety in electricity-generating equipment: teaching aid. M.: Federal State Budget Institution of Supplementary Vocational Education «Training and methodology center for education in railway transport» [Osnovy elektrobezopasnosti v elektroustanovkah : ucheb. posobie. M.: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte»], 2017. 495 p. ISBN 978-5-89035-966-7.
2. Zakirova A. R. Protection of electrotechnical personnel against harmful effect of electromagnetic fields [Zashhita elektrotekhnicheskogo personala ot vrednogo vozdejstviya elektromagnitnyh polej]: monography / A.R. Zakirova. – Yekaterinburg: USURT, 2018. – 171, [1] p. ISBN 978-5-94614-428-5.
3. Bingi V. N. Magnetobiology: experiments and models. [Magnitobiologiya: eksperimenty i modeli] – 2nd edition, revised and expanded. – M. : Milta, 2002. 592 p. ISBN 5-94505-033-4.
4. Zakirova A. R. Assessment of the additive effect of low-frequency electric and magnetic fields in working conditions // Herald of USURT. [Ocenka additivnogo vozdejstviya elektricheskikh i magnitnyh polej nizkочастотного diapazona v proizvodstvennykh usloviyah // Vestnik UrGUPS] 2018. № 3 (39). pp. 106–116. ISSN 2079-0392.
5. Kuznecov K. B., Zakirova A. R., Assessment of the conjugate effect of electric and magnetic components of an EMF (electric and magnetic field) // Transport of the Urals. [Ocenka sochetannogo vozdejstviya na cheloveka elektricheskoy i magnitnoj sostavlyayushih EMP // Transport Urala] 2018. № 1 (56). pp. 54–57. ISSN 1815-9400.

6. Zakirova A. R., Kuznecov K. B. Assessment of the EMF (electric and magnetic field) at a workplace of electrotechnical personnel in traction power supply. // Transport of the Urals. [Ocenka EMP na rabochih mestah elektrotekhnicheskogo personala tyagovogo elektrosnabzheniya // Transport Urala.] 2013. № 3 (38). Pp. 112–117. ISSN 1815-9400.

Статья сдана в редакцию 20 апреля 2019 года

0,41 а. л.

РЕЦЕНЗИЯ

*на учебное пособие «Транспортные системы городов и регионов»
(Сафронов Э.А., Сафронов К.Э. Транспортные системы городов и регионов :
учеб. пособ. 3-е изд., доп. и перераб. – М. : Изд-во АСВ, 2019. – 408 с.*

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по специальности «Организация перевозок и управление на транспорте». Второе издание – лауреат конкурса РААСН на лучшую научную и творческую работу в области архитектуры, градостроительства и строительных наук за 2009 г. Третье рецензируемое издание приведено в соответствие с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки бакалавриата «Технология транспортных процессов».

Актуальность учебного пособия обоснована необходимостью решения масштабных задач, поставленных президентом РФ по развитию транспортной системы страны, созданию транспортной инфраструктуры на основе современных технологий, развитию новых видов транспорта, переходу на альтернативные источники энергии. Эти задачи необходимо решать, опираясь на накопленный опыт отечественных и зарубежных специалистов.

Авторы учебного пособия – доктора технических наук по транспортной специальности – преподают и занимаются научными исследованиями по совершенствованию маршрутных сетей, безопасности дорожного движения, развитию скоростных видов транспорта, доступности среды для маломобильных групп населения.

Книга построена в форме лекций, насыщена формулами, схемами, фотографиями, графиками и таблицами, в которых содержатся справочный материал, результаты исследований, проведенных авторами в разные годы в разных городах. Учебное пособие разделено на главы и разделы, каждая глава снабжена

контрольными вопросами, что неопределимо в ходе рейтинговой оценки знаний обучающихся.

Во введении отражено современное состояние транспортных систем в городах и регионах РФ. Приведены статистические данные официальных источников, которые характеризуют динамику основных транспортных показателей – численность населения, уровень автомобилизации, протяженность путей сообщения, объем перевозок пассажиров и грузов.

Первая глава посвящена теоретическим вопросам – понятию о транспортной системе как о научном направлении, рассмотрены вопросы о предмете, статусе, функциях и методах транспортных исследований. Представлены показатели, которые отражают функционирование системы общественного городского пассажирского транспорта (ГПТ), описывают их взаимодействие, закономерности развития и влияние на качество транспортного обслуживания.

Вторая глава посвящена обоснованию спроса и предложения на ГПТ. Развитие систем ГПТ должно базироваться на принципе динамического соответствия между спросом и предложением. Проблему совершенствования системы ГПТ авторы расчленили на две задачи: 1) изучение спроса на транспортные услуги со стороны производства и 2) изучение спроса населения и организация предложения. Общее снижение затрат времени на передвижение может быть достигнуто снижением накладных затрат времени и повышением скорости перемещения. Решение этих задач связано с совершенствованием многих факторов – градостроительных, транспортных, организационных, развитием новых видов транспорта.

Уровень развития систем ГПТ должен соответствовать транспортным потребностям населения и производства. Для определения перспективных транспортных потребностей авторами предложена методика прогнозирования. Она основана на введении на ГПТ системы навигации, электронной системы оплаты проезда, системы видеонаблюдения, анкетирования пассажиров и водителей. Повышение качества транспортного обслуживания – это путь к ускорению экономического развития страны.

Кроме экономического значения (по обслуживанию производственного процесса), транспорт имеет большое социально-экономическое значение, удовлетворяя личные и общественные потребности населения. Эффект развития транспортных систем заключается в экономии материальных и людских ресурсов, времени, физической и психической энергии человека, улучшении экологии. В свою очередь, этот эффект положительно влияет на производственный процесс, поскольку ГПТ участвует в воспроизводстве рабочей силы, т.е. в восстановлении сил и здоровья трудящихся, повышении их профессионального и культурного уровня.

В четвертой главе даются методы совершенствования систем ГПТ, маршрутных сетей городов и регионов. Говорится о логистических технологиях, реконструкции магистральных сетей городов, развитии новых видов пассажирского транспорта. Эти знания необходимы для решения задач в рамках приоритетных национальных проектов.

В пятой главе приводятся данные о развитии транспортных систем в РФ и других странах. Особое внимание уделено формированию доступной среды, в котором авторы принимают непосредственное участие. Адаптация среды осуществляется по многим направлениям – в квартирах инвалидов расширяются проемы, в подъездах устанавливаются пандусы. Реконструкция улиц включает оборудование пешеходных путей пандусными съездами,

поручнями, тактильной разметкой, звуковыми дублерами сигналов светофоров. Более 24 % муниципального транспорта в городе Омске – это низкопольные модели, куда по аппарели можно заехать с детской или инвалидной коляской. Разработана система балльной оценки доступности, базирующаяся на математическом аппарате нечеткой логики.

Транспортная инфраструктура является одним из наиболее фондоемких секторов национальной экономики и вторым по значимости после энергетики источником загрязнения окружающей среды и одним из главных потребителей невозпроизводимых природных ресурсов. Решения в области развития транспорта порождают комплексный мультипликативный эффект, а ошибочные решения в области развития транспорта могут привести к необратимым негативным последствиям, нарушить устойчивость социально-экономического развития. Особое значение в пособии уделено повышению БДД на основе новых подходов к этой проблеме и использованию альтернативных видов транспорта для городов с недостроенными метрополитенами.

Шестая глава направлена на совершенствование нормативно-правовой базы ГПТ. Города РФ имеют ряд общих проблем в развитии транспортной сети. В первую очередь это относится к транспортно-планировочным показателям – линейной, полосной и квадратичной плотности сети. Низкая линейная плотность сети является причиной повышения затрат времени населения на подход и отход относительно остановочных пунктов, низкая полосная плотность ограничивает пропускную способность магистралей. Еще одним фактором, влияющим на загрузку магистралей, является транзитное движение через центральные районы города. В Послании президента РФ Федеральному собранию в 2018 г. поставлены задачи за счет строительства обходов разгрузить города от транзитных автомобильных потоков, использовать

экологичные виды общественного транспорта и улучшить качество дорог.

В целом учебное пособие соответствует стандартам (ФГОС) третьего поколения.

Книга будет интересна не только студентам разных форм обучения, но и специалистам руководящего уровня.

*Рецензент: И.Н. Пугачев, профессор кафедры
«Автомобильные дороги», проректор Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Тихоокеанский государственный университет»,
д-р техн. наук.
E-mail: ipugachev64@mail.ru.*

Уважаемые коллеги!

Информирую вас о требованиях, предъявляемых к оформлению статей.

При наборе используйте Word-2003 или Word-2007; шрифт (по всему тексту, в том числе в рисунках и таблицах) – тип Times, размер шрифта – 14, межстрочное расстояние – 1,5, абзацный отступ – 1,25 (1,27) см, поля – 2 см; расстановка переносов по всему тексту – автоматическая.

Набор формул: простые формулы и сочетания символов ($x^2 < y^2$; $E = mc^2$; $a^2 + b^2 = c^2$; Q_{i-1} ; ψ_j) – только в текстовом режиме, сложные

$$(s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right]; \left(\frac{\sigma_a}{[n]} \right)$$

или S_i^m) – только в редакторе формул

Equation или в MathType.

Написание букв: русские (а, б, в, А, Б, В), греческие (Θ, Σ, Ω, Ψ, α, β, δ, ε, λ, π), а также цифры и аббревиатуры (1, 2, 3; I, II, III; max, lg, sin и т. п.) пишутся только прямо; латинские (a, b, n, A, B, N и т. д.) – только курсивом. Исключение – курсив во вспомогательном тексте (слова «Таблица» и «Рис.», примечания в рисунках и ссылки в тексте на эти примечания).

Оформление текста: левый верхний край – инициалы, фамилия; заголовков – все буквы ПРОПИСНЫЕ, жирные, расположение – по центру набора; таблиц и рисунков: в таблицах размер шрифта – на полтора-два размера меньше, чем в основном тексте (11,5–12), расположение текста в «шапке» таблицы – по центру, в столбцах – по ширине; межстрочное расстояние – 1; слово «Таблица» – курсивное начертание, в правый край таблицы; название таблицы – начертание нормальное (прямое), расположение – по центру таблицы. В рисунках (графиках, диаграммах): размер подрисуночной

подписи – 14, расположение – по центру набора, слово «Рис.» – курсив, название рисунка – нормальное начертание, описание рисунка (экспликация) – нормальное начертание, условные обозначения – курсивное начертание, их расшифровка – нормальное. Расположение таблиц и рисунков – строго после ссылки на них.

Кроме того, рисунки обязательно прилагаются к материалу (один рисунок – один файл; формат – *.jpg).

Ссылки на литературу в тексте пишутся в квадратных скобках ([1], [1, 2] или [3–5]); нумерация сквозная. Списки литературы/источников оформляются по ГОСТ 7.0.5–2008.

В конце статьи обязательно ставится дата отсылки материала в редакцию.

Объем статьи – не более 14-ти страниц.

Название файла: Фамилия. Первое слово заголовка. Подчеркивание. Последнее слово заголовка (Сидоров. Синтез_электроприводом).

К материалу (статье) обязательно прилагаются (отдельным файлом): УДК, сведения об авторе, аннотация, ключевые слова (название файла: УДК 000. Сидоров. Синтез_электроприводом).

Материалы для очередного номера журнала «Вестник УрГУПС» принимаются до 30 числа первого месяца квартала (до 30-го января, 30-го апреля, до 30-го июля, до 30-го октября). Материалы, поступившие в редакцию после 30-го числа, будут опубликованы только в следующем номере.

Успешной работы!

*Л. Барышникова,
литературный и выпускающий
редактор журнала «Вестник УрГУПС»*

Уважаемые читатели и авторы журнала «Вестник УрГУПС»!

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) 221-25-60

или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusknikov-urgups>

Извещение	<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> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>
Квитанция	<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> Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «____» _____ 2019 г.</p>

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)

Количество
комплектов:

на 2019 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

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)

Стои- мость	подписки	руб. коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	руб. коп.		

на 2019 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)