



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)
№ 1 (61), 2024 год

Главный редактор
Дмитрий Станиславович Завалишчин
Зам. главного редактора
Василий Федорович Лапшин
Научный редактор
Василий Михайлович Сай

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

Изготовлено в ИБК УрГУПС
620034, Екатеринбург,
ул. Колмогорова, 66.

Подписано в печать 08.04.2024
Дата выхода в свет 10.04.2024.
Цена 540,71 руб.

Тираж 300 экз. 1-й з-д: 1–40.
Формат 70×100/16. Заказ 20

Уральский государственный
университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС), 2024 ©

Scientific journal «Herald of the
Ural State University
of Railway Transport»
(Herald of the USURT)
№ 1 (61), 2024

Editor-in-chief
Dmitry S. Zavalishchin
Deputy Editor-in-Chief
Vasily F. Lapshin
Science editor
Vasily M. Say

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

The Mass Media Registration Certificate
by the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media (Roskomnadzor)
PI No. FS77-38188
of November 30, 2009

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

Manufactured in the publishing
and library complex USURT
66 Kolmogorov Street,
620034, Ekaterinburg.

Passed for printing 08.04.2024
Data of issue 10.04.2024.
The price 540,71 rub.

Circulation 300. The 1st pr.: 1–40.
Format 70×100/16. Order 20

The Ural State University
of Railway Transport
(FGBOU VO USURT), 2024 ©

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Владимир Викторович 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, г. Щецин, Польша

Дорел Гузун, д-р техн. наук, профессор, Институт нанотехнологий и инженерии, Университет Арканзаса, США

Александр Леонидович Казаков, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт динамики систем и теории управления имени В. М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

Вячеслав Семенович Шварцфельд, д-р техн. наук, профессор, Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия

Михаил Ростиславович Якимов, д-р техн. наук, директор Института транспортного планирования Российской академии транспорта, Москва, Россия

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

Александр Петрович Буйнатов, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург

Игорь Игоревич Гаврилин, канд. биол. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

Дмитрий Станиславович Завалищин, канд. физ.-мат. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург

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

Валерий Максимович Курганов, д-р техн. наук, профессор, ТвГУ, Тверь

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

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

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

Константин Владимирович Щурин, д-р техн. наук, профессор Московского государственного областного технологического университета, г. Королёв

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Vladimir Viktorovich Tsyganov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Sergey German-Galkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Maritime University, Institute of Marine Electrical Engineering and Vessel Automation, Szczecin, Poland

Dorel Guzun, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute for Nanoscience and Engineering, University of Arkansas, USA

Alexander Leonidovich Kazakov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Vyacheslav Semyonovich Schwarzfeld, Doctor of Technical Sciences, Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

Mikhail Rostislavovich Yakimov, Doctor of Technical Sciences, Director of Institute of Transport Planning of Russian Transport Academy, Moscow, Russia

Vasilii Mikhailovich Say, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

EDITORIAL BOARD

Evgeniy Samuilovich Ashpiz, Doctor of Technical Sciences, Professor, RUT (MIIT), Moscow

Vladimir Grigoryevich Bulaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg
Alexander Petrovich Buynosov, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Igor Igorevich Gavrilin, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, USURT, Yekaterinburg

Dmitry Stanislavovich Zavalishchin, PhD, associate professor, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg

Sergey Nikolaevich Kornilov, Doctor of Technical Sciences, Magnitogorsk State Technical University, Professor, Magnitogorsk

Valeriy Maksimovich Kurganov, Doctor of Technical Sciences, Professor, TSU, Tver

Vasilii Fedorovich Lapshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Valeriy Vladimirovich Sapozhnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, PSTU, St. Petersburg

Galina Adolfova Timofeeva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, USURT, Yekaterinburg

Konstantin Vladimirovich Shchurin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Region University of Technology, Korolev city

Содержание

Математические модели

технологических процессов

4 Н. П. Чуев. Исследование динамики свободной поверхности, ограничивающей конечную массу самогравитирующего газа

21 А. В. Мартыненко, Д. Ж. Сайфутдинов. Оценка моментов прибытия городского общественного транспорта на остановочные пункты

Организация производства

33 Д. Ю. Горелова, С. Р. Рогожина. Методика оценки запаздывания влияния факторов на сетевые организационные структуры

42 И. Д. Громов, А. Д. Хазимуллин. Перспективы внедрения транспортного маркетплейса для грузоотправителей железнодорожного транспорта

Управление в технических системах

53 Н. Ф. Сирина, П. Е. Раевская. Выбор оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов

62 М. А. Шрайбер. Термические напряжения в изоляции тяговых электродвигателей локомотивов

69 А. В. Смольянинов, Д. В. Дуванов, К. М. Колясов. Выбор и проверка метода схематизации случайного процесса нагружения пружин буксового подвешивания

Организация и логистика

80 В. С. Паршина. Технология создания тура по железной дороге

Аспирантская тетрадь

91 А. Т. Шаратов. Повышение ресурса тяговой зубчатой передачи грузового электровоза изменением геометро-кинематических параметров в зацеплении

101 В. В. Орехов. Оценка трансмиссионных масел, применяемых при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов

110 Ю. С. Меркурьев. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме

120 М. А. Попова. Участие профессиональных сообществ в подготовке новых кадров железнодорожной отрасли в России

Contents

Mathematic models

of technological processes

4 N. P. Chuev. The research of the dynamics of a free surface limiting the final weight of a self-gravitating gas

21 A. V. Martynenko, D. Zh. Sajfutdinov. Estimation of urban public transport arrival moments to stopping points

Production organization

33 D. Yu. Gorelova, S. R. Rogozhina. Methodology for assessing the delayed the influence of factors on network organizational structures

42 I. D. Gromov, A. D. Khazimullin. Prospects for the implementation of the transport marketplace for shippers of railway transport

Control in engineering systems

53 N. F. Sirina, P. E. Raevskaya. The choice of the best option of the connected trains formation and regulation

62 M. A. Shreiber. Thermal stresses in insulation of locomotives traction electric motors

69 A. V. Smolyaninov, D. V. Duvanov, K. M. Kolyasov. Selection and verification of the method of schematization in the random process of loading springs for axle box suspension

Organization and logistics

80 V. S. Parshina. The technology of creating a railway tour

Research of young scientists

91 A. T. Sharapov. Increase of the resource of a traction gear transmission of an electric freight locomotive changing geometric-kinematical parameters within an engagement

101 V. V. Orekhov. Evaluation of transmission oils, used in the operation of hydro mechanical bus gearboxes

110 Yu. S. Merkuryev. Modelling of a seismic impact on a roadbed with a damping layer. Dynamic calculations according to an accelerogram

120 M. A. Popova. Participation of professional communities in the training of new personnel in the railway industry in Russia

Математические модели технологических процессов

УДК 517.958+533.1

Н. П. Чуев

Исследование динамики свободной поверхности, ограничивающей конечную массу самогравитирующего газа

UDK517.958+533.1

N. P. Chuev

The research of the dynamics of a free surface limiting the final weight of a self-gravitating gas

Аннотация

В работе исследуется эволюция свободной поверхности, которая ограничивает движущуюся в вакууме изолированную массу политропного, изэнтропического и самогравитирующего идеального газа. Течения газа описываются математической моделью газовой динамики, построенной с помощью системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений, записанной в эйлеровых координатах. Преобразование данной системы к лагранжевым координатам позволяет свести ее к эквивалентной системе, состоящей из интегральных уравнений типа Вольтерра и уравнения

неразрывности в лагранжевой форме, а также позволяет избавиться от неизвестной границы. Свободная граница определяется как множество точек решения системы интегральных уравнений, получаемой при отображении граничных точек начальной области в точку границы движущейся области. Для этой системы доказана теорема существования и единственности решения задачи Коши в пространстве бесконечно дифференцируемых функций.

В работе применены методы качественного исследования системы газовой динамики для изучения эволюции свободной поверхности.

Ключевые слова: самогравитирующий газ, эйлеровы и лагранжевы координаты, система нелинейных интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра, задача Коши, метод последовательных приближений, закон эволюции свободной границы

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-4-20

Abstract

The work researches the evolution of the free surface which limits the polytropic, isentropic and self-gravitating ideal gas moving in vacuum. Gas currents are described with the mathematical model of gas dynamics, constructed

Статья рекомендована к публикации Г. В. Демиденко, д-ром физ.-мат. наук, главным научным сотрудником ИМ СО РАН, E-mail: demidenk@math.nsc.ru.

Николай Павлович Чуев, канд. физ.-мат. наук, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: n_chuev44@mail.ru. ORCID 0000-0003-1549-3533.

© Н. П. Чуев, 2024

The article is recommended for publication by G. V. Demidenko, Doctor of physics and mathematics, chief scientific officer of IM SB RAS, E-mail: demidenk@math.nsc.ru.

Nikolay Pavlovich Chuev, PhD in physics and mathematics, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia, E-mail: n_chuev44@mail.ru.

ORCID 0000-0003-1549-3533.

© N. P. Chuev, 2024

due to the system of nonlinear integro-differential equations, expressed in Euler coordinate system. The transformation of the given system to the Lagrangian coordinates lets reduce it to the equivalent system consisting of integral Voltaire's equations and the equation of continuity in the Lagrangian form, and also it lets break down the unknown boundaries. Free boundary is determined as a great number

of points of the system of integral equations solution achieved when depicting the boundary points of the initial area within the point of the moving area. For the system there is the proved theorem of the existence and uniqueness of the solution of the Cauchy problem in the space of the infinitely differentiated functions. Methods of qualitative research of the system of gas dynamics were applied in the

work for the research of the evolution of the free surface.

Key words: self-gravitating gas, Euler and Lagrangian coordinates, the system of Voltaire's nonlinear integro-differential equations, Cauchy problem, method of successive approximations, law of evolution of free boundary.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-4-20

1. Введение

Исследования гравитирующей жидкости проводились на протяжении более трех столетий. Теории фигур равновесия гравитирующей жидкости посвящены труды И. Ньютона, А. К. Клеро и К. Маклорена. Дифференциальное уравнение, которое связывает гравитационный потенциал во внутренней точке тела с плотностью в ней, впервые вывел Симеон Дени Пуассон (1829 г.). Оно стало обязательной составной частью теории самогравитирующих тел. Теории вращающихся жидких масс посвящены труды Мейера, Ж. Лиувилля, Дирихле, Дедекинда, Римана, Дарвина и Джинса. Затем эта теория получила развитие в работах выдающихся ученых А. Пуанкаре, А. М. Ляпунова, Л. Лихтенштейна и др. [1–4]. Движение гравитирующего газового шара рассматривалось как модель звезд в работах и монографиях К. П. Станюковича [5], Л. И. Седова [6]. В монографии О. И. Богоявленского [7] опубликованы результаты исследований динамики адиабатических движений гравитирующего газовых эллипсоидов.

Результаты исследований С. Л. Дерябина, Н. П. Чуева по эволюции конечной массы самогравитирующего газа приведены в статьях [8–11]. Теория математического моделирования динамики самогравитирующих газовых сред интенсивно развивается. Применяя разработанный автором статьи

метод интегральных уравнений Вольтерра [10–11] в исследовании динамики самогравитирующего газа, в работе [12] рассмотрена свободная поверхность вращающегося газового шара вокруг неподвижной оси ортогональной системы координат с угловой скоростью ω как твердого тела. В работе [13] рассматривается частный случай, когда изолированная масса самогравитирующего газа в прямоугольной системе координат заполняет область Ω_t в момент времени t , причем эйлеровы координаты частиц газа являются линейными функциями лагранжевых координат. В статье приведены результаты аналитических и численных исследований динамики свободной границы.

Основатель качественной теории исследования дифференциальных уравнений – А. Пуанкаре [14], с 1880-х гг. разрабатывавший качественные методы, исследуя проблемы небесной механики, изучая решение при неограниченном возрастании времени. По данной теме за прошедшие годы накоплен огромный опыт исследований. Дифференциальные уравнения второго порядка в общем виде как автономные (динамические) системы ранее рассматривались в работах [15–18]; в монографии О. И. Богоявленского [7] проводится детальное исследование однородных космологических моделей движений самогравитирующего газа и движений газа с однородной деформацией на основе

методов качественной теории многомерных динамических систем.

Основные результаты решения задачи о движении газа со свободными границами получены М. А. Лаврентьевым, Л. В. Овсянниковым, В. И. Налимовым, В. В. Пухначевым, В. К. Андреевым и др. [19–22].

2. Математическая модель самогравитирующего газового облака

Пусть в момент $t = 0$ в пространстве R^3 задана ограниченная область Ω_0 с достаточно гладкой границей Γ_0 гомеоморфной сфере, идеальным, политропным и изэнтропическим газом, частицы которого притягиваются друг к другу по закону Ньютона.

Задача о движении газа в силовом поле сводится к определению области Ω_t , занимаемой газом в момент t , а также закона движения свободной поверхности, вектора скорости $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, давления $p(\mathbf{x}, t)$ и плотности $\rho(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих в области $\mathbf{x} \in \Omega_t$, $t \in (0, T)$ системе уравнений газовой динамики в форме Л. Эйлера [5]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)}{dt} + \frac{1}{\rho(\mathbf{x}, t)} \nabla p(\mathbf{x}, t) &= \nabla \Phi(\mathbf{x}, t), \\ \frac{d\rho(\mathbf{x}, t)}{dt} + \rho(\mathbf{x}, t) \operatorname{div} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Здесь оператор $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \nabla)$ имеет смысл оператора дифференцирования по времени вдоль траектории частицы (или его называют оператором полного дифференцирования по t); ∇ – оператор градиента; div – оператор дивергенции. Условия: при $t = 0$ в каждой точке $\mathbf{x} = \{x, y, z\}$ области Ω_0 известны распределения $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$ – вектора скорости частиц газа, $p_0(\mathbf{x})$ – давления, $\rho_0(\mathbf{x})$ – плотности газа. Функции $\mathbf{u}_0(\mathbf{x})$, $p_0(\mathbf{x})$ и замкнутая граница области Γ_0 задаются в пространстве $C^\infty(\bar{\Omega}_0)$ бесконечно дифференцируемых функций в области $\bar{\Omega}_0$.

На границе Γ_t области Ω_t выполняется условие:

$$\rho(\mathbf{x}, t) = 0 \text{ для } \mathbf{x} \in \Gamma_t \text{ при } t \geq 0. \quad (2.2)$$

Сила ньютоновского притяжения в правой части векторного уравнения системы равна $\mathbf{F}(\mathbf{x}, t) = \nabla \Phi(\mathbf{x}, t)$, где $\nabla \Phi$ – градиент ньютоновского потенциала, который задается тройным интегралом:

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = G \iiint_{\Omega_t} \frac{\rho(\mathbf{x}', t)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} d\mathbf{x}', \quad (2.3)$$

где G – гравитационная постоянная; $|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ – расстояние между точками области.

Гравитационный потенциал удовлетворяет уравнению Пуассона [23–24]:

$$\operatorname{div} \mathbf{F}(\mathbf{x}, t) = \Delta \Phi(\mathbf{x}, t) = -4\pi G \rho(\mathbf{x}, t),$$

где Δ – оператор Лапласа; оператор div – оператор дивергенции.

Функции \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{F} , \mathbf{P} , \mathbf{x} , \mathbf{x}' , ξ , η всюду в тексте являются векторными величинами.

Рассматривая модель изэнтропического движения политропного газа, уравнение состояния политропного газа принимаем в виде [25]

$$p(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{\gamma} \rho^\gamma(\mathbf{x}, t), \quad (2.4)$$

где $\gamma > 1$ – показатель политропы.

При произвольном γ и условии (2.2) в системе (2.1) в окрестности свободной границы Γ_t , $t \geq 0$, возникает сингулярность. Поэтому будем изучать движение газа при $\gamma = 1 + \frac{l}{m}$, где (l, m) принадлежит множеству N натуральных чисел, $l \geq 2$.

Введем новую неизвестную функцию:

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sigma^m(\mathbf{x}, t), \quad (2.5)$$

после подстановки которой в систему (2.1) получим систему газовой динамики

с градиентным членом, не имеющим сингулярности:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}(\mathbf{x},t)}{dt} + m\sigma(\mathbf{x},t)^{l-1}\nabla\sigma(\mathbf{x},t) &= \mathbf{F}(\mathbf{x},t), \\ \frac{d\sigma(\mathbf{x},t)}{dt} + \frac{1}{m}\sigma(\mathbf{x},t)\operatorname{div}\mathbf{u}(\mathbf{x},t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

На границе Γ_t области Ω_t сохраняется условие

$$\sigma(\mathbf{x},t) = 0 \text{ для } \mathbf{x} \in \Gamma_t, \text{ при } t \geq 0, \quad (2.7)$$

а вместо функций плотности $\rho(\mathbf{x},t)$, $\rho_0(\mathbf{x})$ в исследованиях используются равнозначные функции плотности $\sigma(\mathbf{x},t)$ и $\sigma_0(\mathbf{x}) = \sigma(\mathbf{x},0) \in C^\infty(\bar{\Omega}_0)$.

Движение газа рассматриваем при условии, что свободная граница во все моменты состоит из одних и тех же частиц, т.е. исключается возможность переноса массы через свободную поверхность. Это обстоятельство делает удобным преобразование системы (2.6) от эйлеровых координат (\mathbf{x},t) к лагранжевым координатам (ξ,t) , для которых область определения решения задачи о движении конечной массы газа будет заранее фиксированной. При переходе к этим координатам область становится заданной цилиндрической областью $Q_T = \bar{\Omega}_0 \times [0, T]$.

Пусть система газовой динамики (2.6) имеет решение $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$, $\sigma(\mathbf{x},t)$ и, соответственно, система (2.1) имеет решение $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$, $\rho(\mathbf{x},t)$. При известном векторе скорости $\mathbf{u}(\mathbf{x},t)$ описание движения частиц газа определяется решением системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{x},t) \quad (2.8)$$

с начальным условием в момент $t = 0$

$$\mathbf{x} = \xi. \quad (2.9)$$

Решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (2.8) с начальными условиями (2.9) будет иметь вид

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi,t). \quad (2.10)$$

Непрерывное взаимно однозначное отображение $\mathbf{x}(\xi,t)$ обладает достаточной

гладкостью, существованием дифференцируемого обратного преобразования, которое выполнимо при условии, что якобиан отображения

$$J(\xi,t) = \frac{\partial(x,y,z)}{\partial(\xi,\eta,\zeta)} = \det\left(\frac{\partial\mathbf{x}}{\partial\xi}\right) \neq 0 \quad (2.11)$$

отличен от нуля и обладает свойствами

$$J(\xi,0) = 1 \text{ и } J(\xi,t) > 0 \text{ при } t \geq 0. \quad (2.12)$$

Введем лагранжевы переменные $\xi = \{\xi, \eta, \zeta\}$ как значения координат частиц газа в начальный момент в области Ω_0 . Если рассматривать $\mathbf{x} = \{x,y,z\}$ как функции независимых переменных ξ, η, ζ, t , то в момент t скорость частицы будет

$$\frac{\partial\mathbf{x}(\xi,t)}{\partial t} = \mathbf{u}(\mathbf{x}(\xi,t),t) = \mathbf{v}(\xi,t). \quad (2.13)$$

Используем для функций при переходе от эйлеровых к лагранжевым переменным $f(\mathbf{x},t) = f(\mathbf{x}(\xi,t),t) = g(\xi,t)$ дифференциальное равенство

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial g}{\partial t}. \quad (2.14)$$

Тогда ускорение можно записать следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial\mathbf{x}}{\partial t}\right) = \frac{\partial^2\mathbf{x}}{\partial t^2}. \quad (2.15)$$

Уравнение неразрывности и переменных Лагранжа имеет вид [2, 5]

$$\rho(\mathbf{x}(\xi,t),t)J(\xi,t) = \rho_0(\xi). \quad (2.16)$$

Здесь $\rho_0(\xi)$ означает первоначальную плотность газа в точке Ω_0 .

Запишем уравнение неразрывности с заменой функции (2.5):

$$\sigma^m(\mathbf{x}(\xi,t),t)J(\xi,t) = \sigma_0^m(\xi). \quad (2.17)$$

Перейдем в векторном уравнении системы (2.6) к лагранжевым координатам, предварительно продифференцировав потенциал $\Phi(\xi,t)$. Тогда для силовой функции $\mathbf{F}(\mathbf{x},t) = \nabla\Phi(\mathbf{x},t)$ после вычисления градиента и подстановки $\mathbf{x}(\xi,t)$ получим формулу

$$F(x(\xi, t), t) = G \iiint_{\Omega_0} \rho(x', t) \frac{x' - x(\xi, t)}{|x(\xi, t) - x'|^3} dx'.$$

Применяя теорему о замене переменной в кратном интеграле и заменяя $x' = x(\eta, t)$ в предыдущем равенстве, получим

$$F(x(\xi, t), t) = G \iiint_{\Omega_0} \rho(x(\eta, t)) \frac{x(\eta, t) - x(\xi, t)}{|x(\xi, t) - x(\eta, t)|^3} J(\eta, t) d\eta, \quad (2.18)$$

где $J(\eta, t) = \frac{\partial(x', y', z')}{\partial(\xi', \eta', \zeta')}$ – якобиан преобразования (2.11) для $\eta = \{\xi', \eta', \zeta'\} \in \Omega_0$.

На основании (2.16) равенство (2.18) в форме Лагранжа примет вид

$$F(x(\xi, t), t) = G \iiint_{\Omega_0} \rho_0(\eta) \frac{x(\eta, t) - x(\xi, t)}{|x(\xi, t) - x(\eta, t)|^3} d\eta. \quad (2.19)$$

Введем вектор-функцию:

$$-P(x, t) = \{p(x, t), q(x, t), r(x, t)\} = m\sigma(x, t)^{l-1} \nabla \sigma(x, t). \quad (2.20)$$

На основании формул преобразования градиента при переходе от эйлеровой к лагранжевой форме [13–15] вектор-функция преобразуется следующим образом:

$$P(x(\xi, t), t) = -\frac{m}{l} M^*(\xi, t)^{-1} \nabla_{\xi} \sigma^l(x(\xi, t), t),$$

где M^* – транспонированная матрица

$$\text{Якоби } \frac{\partial x(\xi, t)}{\partial \xi}.$$

Тогда система (2.6) с учетом (2.19), (2.20) в лагранжевых координатах примет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 x(\xi, t)}{\partial t^2} = P(x(\xi, t), t) + F(x(\xi, t), t), \quad (2.21)$$

$$\sigma^m(x(\xi, t), t) J(\xi, t) = \sigma_0^m(\xi).$$

По характеру физической задачи на границе Γ_t области Ω_t и для того, чтобы сделать решение задачи определенным,

заданы начально-краевые условия при замене $\sigma(x(\xi, t), t) = \tilde{\sigma}(x(\xi, t))$:

$$x(\xi, 0) = \xi, \left. \frac{\partial x(\xi, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = u_0(\xi),$$

$$J(\xi, 0) = 1, \tilde{\sigma}(\xi, 0) = \sigma_0(\xi) \quad (2.22)$$

$$\ddot{\alpha} \ddot{\epsilon} \ddot{\gamma} \forall \xi \in \Omega_0, \tilde{\sigma}(\xi, t) = 0$$

$$\ddot{\alpha} \ddot{\delta} \ddot{\epsilon} \xi \in \Gamma_0 \text{ è } t \geq 0.$$

Решение задачи Коши для интегродифференциальной системы уравнений (2.21)–(2.22) равносильно решению системы интегральных векторных уравнений типа Вольтерра для искомой векторной функции $x = x(\xi, t)$ и уравнения неразрывности.

Таким образом, система (2.21) эквивалентна следующей системе:

$$x(\xi, t) = \xi + u_0(\xi)t + \int_0^t (t - \tau)(F(x(\xi, \tau), \tau) + P(x(\xi, \tau), \tau)) d\tau, \quad (2.23)$$

$$\tilde{\sigma}(\xi, t) J^{\frac{1}{m}}(\xi, t) = \sigma_0(\xi).$$

Для системы сохраняются начально-краевые условия (2.22).

Эквивалентность систем уравнений (2.21) и (2.23) легко проверяется дифференцированием и двукратным интегрированием.

Для системы интегральных уравнений типа Вольтерра (2.23) с начально-краевыми условиями (2.22) в работе [10] и особенно достаточно подробно в работе [11], применяя метод последовательных приближений [26–27], нестандартных оценок для функций, доказана теорема существования и единственности решения задачи Коши, определенного на конечном интервале времени $[0, t_0]$. Доказано, что найденное решение принадлежит пространству $C_2^{\alpha}(\mathcal{Q}_T)$ в области $\mathcal{Q}_T = \bar{\Omega}_0 \times [0, T]$, где $C_2^{\alpha}(\mathcal{Q}_T)$ – пространство бесконечно дифференцируемых функций в области Ω_0 по переменным $\xi = \{\xi, \eta, \zeta\}$ и дважды непрерывно дифференцируемых по t . Вектор-функция $x = x(\xi, t)$ описывает траекторию частицы газа, находящейся в точке $\xi \in \Omega_0$

в момент $t = 0$, а также задает отображение замкнутой Ω_0 в область Ω_t при фиксированном t . Непрерывное взаимно однозначное отображение $\mathbf{x}(\xi, t)$ обладает достаточной гладкостью, а также свойством единственности при продолжении решения по $t \in [0, T]$.

Данное решение задачи определяет закон движения в вакууме изолированной массы самогравитирующего идеального газа с переменной областью течения.

3. Метод качественного исследования динамики свободной поверхности, ограничивающей конечную массу самогравитирующего газа

Опираясь на теоремы, доказанные в работах [10–11], из которых следует эквивалентность четырех систем газовой динамики:

– системы (2.1) при показателе поли-

тропы $\gamma = 1 + \frac{l}{m}$, где $l \in N$, $l \geq 2$, $m \in N$

и N есть множество натуральных чисел;

– системы (2.6) при $\rho(\mathbf{x}, t) = \sigma^m(\mathbf{x}, t)$;
– систем (2.21) и (2.23).

Применяя качественные методы, исследуем закономерности движения свободной поверхности, ограничивающей в вакууме конечную массу идеального, политропного, изэнтропического самогравитирующего газа, заполняющую область $\Omega_t \in R^3$, $\mathbf{x} \in \Omega_t$, $t \in (0, T)$.

Будем предполагать, что центр тяжести газового тела в начальный момент совпадает с началом координат.

Свободная граница является образом точек решения системы интегральных уравнений $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi, t)$ при отображении $\xi \in \Gamma_0$ в точке $\mathbf{x} \in \Gamma_t$. Тем самым задача по определению закона движения свободной границы представляет собой также задачу об отыскании отображения $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi, t)$. Пусть каждая точка $\xi \in \Gamma_0$, где Γ_0 – граница Ω_0 , а $\bar{\Omega}_0 = \Omega_0 \cup \bar{\Omega}_0$ с помощью функции $\mathbf{x}(\xi, t)$ отображается для фиксированного момента t в некоторую точку $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi, t)$. Это отображение

перемещает каждую частицу газа, находящуюся на поверхности тела, из ее положения в момент времени $t = 0$ в ее положение в момент времени t .

Из утверждения, известного как теорема Лагранжа [28], следует, что свободная поверхность все время состоит из одних и тех же частиц газа при $t \geq 0$.

При принадлежности $\xi \in \Gamma_0$, то для всех $t \geq 0$ вектор-функция

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x}(\xi, t), t) &= \\ &= m\sigma(\mathbf{x}(\xi, t), t)^{l-1} \nabla \sigma(\mathbf{x}(\xi, t), t) = 0. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Уравнение неразрывности систем (2.21) и (2.23) в этом случае на основании краевых условий (2.2), (2.7) и (2.22) выполняется тождественно при всех $t \geq 0$. Тогда свободная поверхность Γ_t для всех $t \geq 0$ удовлетворяет эквивалентным системам уравнений:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{x}(\xi, t)}{\partial t^2} = \tilde{F}(\xi, t), \quad (3.2)$$

$$\mathbf{x}(\xi, t) = \xi + \mathbf{u}_0(\xi)t + \int_0^t (t - \tau) \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau, \quad (3.3)$$

где $\tilde{F}(\xi, t) = F(\mathbf{x}(\xi, t), t)$.

Для исследования движения газа и динамики свободной поверхности Γ_t для всех $t \geq 0$ будем использовать векторные уравнения систем (3.2) и (3.3), а также систему, полученную после интегрирования системы (3.2):

$$\mathbf{v}(\xi, t) = \mathbf{u}_0(\xi) + \int_0^t \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau. \quad (3.4)$$

Если произвольно выбранное значение $\xi \in \Gamma_0$ будем рассматривать как фиксированный параметр, тогда система (3.2) исследуется как система обыкновенных дифференциальных уравнений с искомой функцией $\mathbf{x}(\xi, t)$ и независимой переменной $t \geq 0$:

$$\frac{d\mathbf{x}(\xi, t)}{dt} = F(\mathbf{x}(\xi, t), t). \quad (3.5)$$

Для нелинейной системы интегродифференциальных уравнений (3.2), систем интегральных уравнений типа Вольтерра (3.3) и (3.4) заданы следующие начально-краевые условия:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\xi, 0) &= \xi, \quad \left. \frac{\partial \mathbf{x}(\xi, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = \mathbf{u}_0(\xi), \\ \mathbf{v}(\xi, 0) &= \mathbf{u}_0(\xi) \text{ для } \xi \in \Gamma_0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

В дальнейшем будем опираться на основополагающие условия теории астрофизики, эволюции звезд, результаты исследования космогонических проблем [4–6, 29–30]:

- определяющим условием движения конечных газовых масс в вакууме идеального самогравитирующего газа, ограниченных свободной поверхностью, являются начальные скорости частиц газа и размер газового облака;

- при достаточно крупном облаке газа существует критическое значение $R_{\text{крит}}$, при котором гравитационные силы начинают превалировать над газовым давлением, и облако подвергается сжатию, что вызывает уплотнение газа;

- гравитационная сила, создаваемая газовым телом, заполняющим область $\bar{\Omega}_i$ достаточно крупных размеров, удовлетворяет для $\mathbf{x}(\xi, t) \in \bar{\Omega}_i$ неравенствам [19]:

$$\begin{aligned} 4\pi \min \rho_0(\xi) \min |\mathbf{x}(\xi, t)| &\leq |\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)| \leq \\ &\leq 4\pi \max \rho_0(\xi) \max |\mathbf{x}(\xi, t)|; \end{aligned}$$

- при размерах облака меньше $R_{\text{крит}}$ силы градиента давления превышают силы гравитации, и облако расширяется. Такой вывод становится очевидным при сравнении давления (2.4) и гравитационной силы.

Если взять для шара радиуса r ,

$P = K\rho^{1+\frac{l}{m}}$ и $|\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)| = L\rho r$, где K и L – некоторые постоянные числа, то

$$\left| \frac{P}{\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)} \right| = \frac{K}{L} \cdot \frac{\rho^{\frac{l}{m}}}{r} = K_1 \cdot \frac{(M_0)^{\frac{l}{m}}}{r^{1+\frac{3l}{m}}},$$

где $K_1 = \text{const}$.

Полученные формулы показывают, что при $r \rightarrow 0$ давление неограниченно растет в сравнении с гравитационной силой.

Для реализации цели настоящей работы по исследованию газодинами-

ческой модели движения в вакууме газового облака и построению эволюционных конфигураций свободной поверхности, ограничивающей конечную массу самогравитирующего газа, используем методы качественного исследования нелинейной системы интегро-дифференциальных уравнений (3.2) и систем интегральных уравнений типа Вольтерра (3.3) и (3.4). Основные результаты будут следовать из следующей теоремы.

Теорема

Нелинейная система интегро-дифференциальных уравнений (3.2) и нелинейные системы интегральных уравнений типа Вольтерра (3.3) и (3.4), удовлетворяющие начально-краевым условиям (3.6), имеют единственные квазипериодические решения, зависящие от начальной скорости $\mathbf{u}_0(\xi)$ и силовой функции $\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(\xi, t), t)$, описывающие эволюционные конфигурации свободной поверхности, ограничивающей конечную массу самогравитирующего газа.

Доказательство

Пусть задано векторное поле скоростей частиц газа $\mathbf{u}_0(\xi)$ для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ в начальный момент $t = 0$. Исследуем эволюционные конфигурации свободной поверхности самогравитирующего газа в зависимости от начальной скорости, исключая случай вращения газового облака как твердого тела:

- случай 1, когда каждый вектор поля $\mathbf{u}_0(\xi)$ в точках $\xi \in \bar{\Omega}_0$ будет направлен от центра газового тела во внешнюю часть пространства так, что между векторами $\mathbf{u}_0(\xi)$ и ξ при $t = 0$ будет

угол $\alpha \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right)$. Таким образом, для ска-

лярного произведения данных векторов справедливо неравенство $\mathbf{u}_0(\xi) \cdot \xi > 0$ для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ при $t = 0$. Выразим его, используя модуль одного вектора и проекции другого вектора на направление первого, получим

$$|\xi| \cdot \delta_{\xi} \mathbf{u}_0(\xi) > 0 \text{ для } \xi \in \bar{\Omega}_0 \text{ при } t = 0; \quad (3.7)$$

– случай 2, когда каждый вектор поля $\mathbf{u}_0(\xi)$ для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ направлен к центру газового тела. Тогда между векторами $\mathbf{u}_0(\xi)$ и ξ в точках $\xi \in \bar{\Omega}_0(\xi)$ будет угол $\beta \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi \right]$, аналогично для $\mathbf{u}_0(\xi)$ и ξ ;

в этом случае справедливы неравенства

$$\mathbf{u}_0(\xi) \cdot \xi < 0 \text{ или } |\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{u}_0(\xi) < 0 \quad (3.8)$$

для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ при $t = 0$;

– случай 3, когда $\mathbf{u}_0(\xi) = 0$, т. е. частицы газа в начальный момент будут в состоянии покоя;

– случай 4, когда $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} = 0$ – скалярное произведение скорости и единичного вектора внешней нормали в точках границы Γ_t для всех $t \geq 0$, а также $\mathbf{u}_0(\xi) \cdot \xi = 0$ при $|\xi| \neq 0$ не рассматривается.

Заметим, что в случае, когда $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} = 0$ в точках границы Γ_t , то по теореме Остроградского – Гаусса

$$\iiint_{\Omega_t} \operatorname{div} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) d\mathbf{x} = \iint_{\Lambda_t} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} d\sigma = 0,$$

а поскольку масса газа остается неизменной и в области нет ни источников, ни стоков, тогда следует, что в области $\mathbf{x} \in \Omega_t$, $t \in (0, T)$ при $t \geq 0$ по теореме Лиувилля газовое облако Ω_t сохраняет объем.

Рассмотрим для $\xi \in \Gamma_0$ при $t \geq 0$ скалярные произведения

$$\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t) \cdot \xi = |\xi| \dot{\delta}_\xi \tilde{\mathbf{F}}(\xi, t). \quad (3.9)$$

Учитывая, что вектор $\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)$ имеет направление к центру газового облака, то для скалярного произведения (3.9) справедливо неравенство

$$\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t) \cdot \xi < 0. \quad (3.10)$$

Рассмотрим первый случай.

Начальная скорость каждой точки для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ задает векторное поле $\mathbf{u}_0(\xi)$, каждый вектор которого направлен от центра газового тела во внешнюю часть пространства. Движение частиц газа для точек $\xi \in \Gamma_0$ при $t \geq 0$ управляется

системой уравнений (3.4); после умножения обеих частей (3.4) скалярно на вектор ξ получим

$$|\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{v}(\xi, t) = |\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{u}_0(\xi) + \int_0^t |\xi| \dot{\delta}_\xi \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau) d\tau. \quad (3.11)$$

При достаточно больших начальных скоростях каждой частицы газа $\mathbf{u}_0(\xi)$ для $\xi \in \Gamma_0$ слагаемое $|\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{u}_0(\xi)$ в равенстве (3.11) будет больше значения интеграла, т.е. получим неравенство

$$|\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{v}(\xi, t) = \mathbf{v}(\xi, t) \cdot \xi > 0,$$

из которого следует, что каждая точка ξ при $t > 0$ будет двигаться со скоростью $\mathbf{v}(\xi, t)$, направленной во внешнюю часть пространства.

В точках $\xi \in \Gamma_0$ вектор $\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)$ образует с вектором ξ (3.10) тупой угол β , что определяет

$$H(\xi, t) = \int_0^t |\xi| \dot{\delta}_\xi \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau) d\tau$$

как отрицательную величину.

Тогда по определению скалярного произведения подынтегрального произведения запишем $H(\xi, t)$ в виде

$$H(\xi, t) = - \int_0^t |\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)| \cdot |\xi| \cdot \cos(\pi - \beta) d\tau.$$

Выразим отсюда функцию $H_1(\xi, t)$:

$$H_1(\xi, t) = \int_0^t |\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)| \cdot |\xi| \cdot \cos(\pi - \beta) d\tau,$$

производная которой по переменной t будет положительной величиной и $H_1(\xi, t)$ будет возрастающей функцией по t при фиксированном значении переменной ξ . Из уравнения (3.4) с учетом (3.10) следует существование такого значения $t = t_1$, при котором

$$|\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{v}(\xi, t) = |\xi| \dot{\delta}_\xi \mathbf{u}_0(\xi) + \int_0^{t_1} |\xi| \dot{\delta}_\xi \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau) d\tau = 0,$$

или

$$\mathbf{v}(\xi, t_1) = \mathbf{u}_0(\xi) + \int_0^{t_1} \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau) d\tau = 0. \quad (3.12)$$

Таким образом, скорости частиц газа ξ , принадлежащих свободной поверхности Γ_t , при $t = t_1 = T$ равны нулю, т.е. $\mathbf{v}(\xi, t_1) = 0$.

Все частицы газа прекратят движение в одно и то же время $t = t_1$. Действительно, отложим на нормалях в точках поверхности Γ_t отрезки сколь угодно малой длины d , направив их внутрь Γ_t . Геометрическое место концов этих отрезков образует замкнутую поверхность Γ_d , которая не пересекает сама себя, лежит внутри области $\bar{\Omega}_t$ и имеет непрерывно изменяющуюся касательную плоскость. В точках пересечения нормалью поверхностей Γ_t и Γ_d касательной плоскости параллельны. Возьмем на нормали к поверхности Γ_t две точки $\mathbf{x}(\xi, t) \in \Gamma_t$ и $\mathbf{x}(\eta, t) \in \Gamma_d$ так, что длина вектора $\mathbf{x}(\xi, t) - \mathbf{x}(\eta, t)$ будет достаточно малой величиной d .

Дифференцируя по t равенство

$$(\mathbf{x}(\xi, t) - \mathbf{x}(\eta, t))^2 = d^2,$$

получим

$$(\mathbf{x}(\xi, t) - \mathbf{x}(\eta, t)) \cdot (\mathbf{v}(\xi, t) - \mathbf{v}(\eta, t)) = 0.$$

Отсюда при $t = t_1$, $\mathbf{v}(\xi, t) = 0$, учитывая выполнение четвертого случая и условий непрерывности $\mathbf{x}(\xi, t)$ и $\mathbf{v}(\xi, t)$, следует $\mathbf{v}(\eta, t_1) = 0$. Перемещая в глубь области аналогичное построение замкнутых поверхностей Γ_d , делаем вывод, что частицы газа прекратят движение в одно и то же время $t = t_1$.

После использования теоремы о среднем для интеграла [31] равенство (3.12) примет вид

$$\mathbf{u}_0(\xi) + \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \theta)t_1 = 0, \quad (3.13)$$

а векторы $\mathbf{u}_0(\xi)$ и $\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \theta)t_1$ будут противоположными.

Отсюда получим, что в момент времени

$$t_1 = \frac{|\mathbf{u}_0(\xi)|}{|\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \theta)|}, \quad (3.14)$$

где θ – некоторое значение из промежутка $[0, t]$, скорость движения свободной границы равна нулю. При значении

$t = t_1$ $\mathbf{x}(\xi, t_1)$ принимает максимальное значение:

$$\mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1) = \xi + \mathbf{u}_0(\xi)t_1 + \int_0^{t_1} (t_1 - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau.$$

При этом значении $t = t_1$ на частицы газа с координатами $\mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1)$ действует только сила $\tilde{\mathbf{F}}(\xi, t)$, определяющая вектор ускорения (3.2), который совпадает с направлением вектора гравитационной силы и направлен внутрь области Ω_t . Данное ускорение сообщит точке поверхности Γ_t при $t > t_1$ скорость, которая направлена внутрь тела, к центру газового тела.

Для анализа процесса сжатия поставим новую задачу Коши с отчетом времени $t' = t - t_1 \geq 0$ для систем интегральных уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\xi, t') &= \mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1) + \\ &+ \int_0^{t'} (t' - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau, \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{v}(\xi, t') = \int_0^{t'} \tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau. \quad (3.16)$$

Задачу Коши для нелинейных интегральных уравнений (3.15) и (3.16) будем изучать при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\xi, t')|_{t'=0} &= \mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1), \mathbf{v}(\xi, t')|_{t'=0} = \\ &= 0, \xi \in \bar{A}_0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Для исследования сжатия газового облака из состояния покоя рассмотрим уравнение (3.15) при значении t_1 (3.14) и после применения теоремы о среднем для интеграла с учетом равенства (3.13) определим значение вектор-функции $\mathbf{x}(\xi, t')$ при $t' = t_1$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(\xi, t) &= \mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1) + \int_0^{t_1} (t_1 - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau = \\ &= \xi + \mathbf{u}_0(\xi)t_1 + \int_0^{t_1} (t_1 - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau + \\ &+ \int_0^{t_1} (t_1 - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau = \\ &= \xi + \mathbf{u}_0(\xi)t_1 + 2\int_0^{t_1} (t_1 - \tau)\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \tau)d\tau = \\ &= \xi + \mathbf{u}_0(\xi)t_1 + 2\tilde{\mathbf{F}}(\xi, \theta)\frac{t_1^2}{2} = \xi. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Аналогично из уравнения (3.16), равенства (3.12) и значения t_1 (3.14) определим скорость частиц газа при $t' = t_1$:

$$\mathbf{v}(\xi, t_1) = \int_0^{t_1} \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau = -\mathbf{u}_0(\xi). \quad (3.19)$$

Таким образом, под действием гравитационной силы с момента $t' \geq 0$ за период $t \in \left[0, 2 \frac{|\mathbf{u}_0(\xi)|}{|\tilde{F}(\xi, \theta)|} \right]$ частицы газа свободной поверхности Γ_t возвратятся к начальной границе $\xi \in \Gamma_0$.

В результате сжатия газового облака при воздействии только одного фактора – силы притяжения – наблюдается гравитационный коллапс, которому сопутствуют следующие процессы:

– при $t \geq 0$ газовое тело будет подвергаться сжатию, плотность газа будет возрастать:

$$\rho_{\text{поверхности}} = \lim_{V_t \rightarrow 0} \frac{M_0}{V_t} \rightarrow \infty, \quad (3.20)$$

где M_0 – масса газа; V_t – объем газового тела в момент времени t , заполняющего область Ω_t ;

– гравитационная сила взаимного притяжения частиц газа, функция $|\mathbf{F}(\mathbf{x}(\xi, t), t)|$ в силу неравенств [18]:

$$\begin{aligned} \frac{GM_0}{\max |\mathbf{x}(\xi, t)|^2} &\leq |\mathbf{F}(\mathbf{x}(\xi, t), t)| \leq \\ &\leq \frac{GM_0}{\min |\mathbf{x}(\xi, t)|^2} \end{aligned} \quad (3.21)$$

будет возрастать при $t \geq 0$ и $|\mathbf{x}(\xi, t)| \rightarrow 0$;

– давление в силу политропности газа (2.4) и (3.20) при $V_t \rightarrow 0$ растет неограниченно.

Компоненты вектора $\mathbf{x}(\xi, t)$ будут убывать и в некоторый момент сформируют тело сколь угодно малого радиуса. Таким образом, газ достигнет сверхсжатия до абстрактного понятия «частица газа», или «точка пространства», и в некоторый момент $t = t_2$ длина вектора $\mathbf{x}(\xi, t)$ будет удовлетворять

неравенству $|\mathbf{x}(\xi, t)| \ll \varepsilon = \frac{1}{N}$, где N –

достаточно большое натуральное число.

Абстрактное понятие частицы газа является математическим эквивалентом представления о том достаточно малом физическом объеме газа, с помощью которого можно определить значения скорости, плотности, давления и гравитационной силы.

Сжатие газа (коллапс) прекращается при некотором t_2 : неизбежна потеря равновесия, и сверхсжатый газ расширяется (взрывается) [4] с положительным (наружным) направлением движения своих частиц, в том числе для точек, расположенных на поверхности тела. Движение будет управляться уравнениями (3.3)–(3.4), но, возможно, с начальной скоростью \mathbf{u}_1 . Затем при $t = t_3$ скорость точек будет равна нулю. т.е. $\mathbf{v}(\xi, t) = 0$, и для $t \geq t_3$ начнется процесс сжатия газа.

Вычислим значение t_2 , используя уравнение (3.15):

$$\mathbf{x}(\xi, t') = \mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1) + \int_0^{t'} (t' - \tau) \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau = 0$$

при $t' = t_2$.

Отсюда, после применения теоремы о среднем для интеграла [26] равенство примет вид

$$\mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1) + \tilde{F}(\xi, \theta_1) \frac{t_2^2}{2} = 0,$$

и время прекращения движения внутри шара радиусом $r < \varepsilon$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 |\mathbf{x}_{\max}(\xi, t_1)|}{|\tilde{F}(\xi, \theta_1)|}}. \quad (3.22)$$

Из неравенства (3.21), при фиксированном ξ и t_1 существует постоянное число $\lambda > 0$, что

$$\frac{\lambda GM_0}{\max |\mathbf{x}(\xi, t)|^2} = |\mathbf{F}(\mathbf{x}(\xi, t), t)|,$$

и (3.22) с учетом последнего равенства может быть выражено следующим образом:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2|x_{\max}|^3}{\lambda GM_0}}. \quad (3.23)$$

Формула (3.23) имеет близкое значение к известной в астрофизике [24] формуле времени свободного падения частицы газа с поверхности звезды до достижения центра в период гравитационного коллапса звезд:

$$t_2 = \tau \sqrt{\frac{R^3}{GM}},$$

где M – масса звезды; R – ее радиус; τ – безразмерный коэффициент.

Рассмотрим второй случай.

Пусть каждый вектор поля $u_0(\xi)$ для $\xi \in \bar{\Omega}_0$ направлен к центру газового тела. В этом случае движение частиц газа, расположенных на свободной поверхности, будет направлено внутрь газового тела. Движение точки подчиняется уравнениям (3.2)–(3.4), из которых следует, что компоненты вектора $x(\xi, t)$ будут убывать и в некоторый момент $t = t_4$:

$$\begin{aligned} x(\xi, t_4) &= \xi + u_0(\xi)t_4 + \\ &+ \int_0^{t_4} (t_4 - \tau)\tilde{F}(\xi, \tau)d\tau = 0. \end{aligned}$$

После умножения обеих частей этого уравнения на вектор ξ получим

$$\begin{aligned} |\xi|^2 + |\xi|\dot{\imath} \delta_\xi u_0(\xi)t_4 + \\ + \int_0^{t_4} (t_4 - \tau)|\xi|\dot{\imath} \delta_\xi \tilde{F}(\xi, \tau)d\tau = 0. \end{aligned}$$

Подчеркнем, что векторы $u_0(\xi)$ и $\tilde{F}(\xi, \tau)$ имеют с вектором ξ тупые углы, т. е. проекции $\dot{\imath} \delta_\xi u_0(\xi)$ и $\dot{\imath} \delta_\xi \tilde{F}(\xi, \tau)$ являются отрицательными величинами. Применяя теорему о среднем для интеграла, получим для t_4 уравнение

$$|\xi| + \dot{\imath} \delta_\xi u_0(\xi)t_4 + \dot{\imath} \delta_\xi \tilde{F}(\xi, \theta_2) \frac{t_4^2}{2} = 0.$$

Откуда

$$t_4 = \frac{-2\dot{\imath} \delta_\xi u_0(\xi) - \sqrt{(2\dot{\imath} \delta_\xi u_0(\xi))^2 - 8|\xi|\dot{\imath} \delta_\xi \tilde{F}(\xi, \tau)}}{2\dot{\imath} \delta_\xi \tilde{F}(\xi, \tau)}.$$

Таким образом, в момент $t = t_4$ координаты частиц газа $x(\xi, t) = 0$; наблюда-

ется схлопывание конечной массы самогравитирующего газа, т. е. вся масса газа сжимается (коллапсирует) в одну точку. В результате при коллапсе газа наблюдаются процессы, описанные в первом случае (3.20)–(3.21).

Затем сжатие газа (коллапс) прекращается в это же время t_4 , и сверхсжатый газ расширяется. Движение будет управляться уравнениями (3.3)–(3.4), но, возможно, с начальной скоростью u_2 .

Затем при $t = t_5$ скорость точек становится равна нулю, $v(\xi, t) = 0$, и для $t \geq t_5$ начинается процесс сжатия газа.

Рассмотрим третий случай:

$u_0(\xi) = 0$. В начальный момент газовое тело будет в состоянии покоя. Движение поверхности возможно, так как вектор ускорения совпадает с направлением вектора $F(x, t)$ и направлен внутрь области Ω_i . Таким образом, наблюдается движение точек поверхности, описываемое уравнениями:

$$\begin{aligned} x(\xi, t) &= \xi + \int_0^t (t - \tau)\tilde{F}(\xi, \tau)d\tau, \\ v(\xi, t) &= \int_0^t \tilde{F}(\xi, \tau)d\tau. \end{aligned}$$

Сжатие газа (коллапс) прекращается при некотором t_6 : сверхсжатый газ расширяется (взрывается) с направлением движения частиц газа от центра тела. Движение будет управляться уравнениями (3.2)–(3.4), но, возможно, с начальной скоростью u_3 . Затем при $t = t_7$ скорость точек равняется нулю $v(\xi, t) = 0$, и для $t \geq t_7$ начинается процесс сжатия газа.

Анализ описанных выше движений свободной поверхности позволяет выдвинуть предположение, что единственное решение систем (2.1), (2.6), (2.21), (2.26), (3.2), (3.3), (3.4), (3.15) и (3.16), существование которых доказано изложенными в работах [10–11] теоремами, является квазипериодическим. Доказательство существования периодических решений основывается на анализе фазовых картин на плоскости специально выбранных переменных.

Для этого приведем систему (3.2) к скалярному виду. Кроме того, подчеркнем, что будем изучать движение частиц газа после первого полного завершения сжатия. Предполагается, как было уже сказано, что последующие движения могут начинаться при движении газа с начальной скоростью $u_i(\xi)$, $i \in N$. Скорость можно определить, если использовать системы уравнений газовой динамики (2.21) и (2.26) с учетом давления. Начальная скорость в этом случае будет функцией $u_i(\xi) = u_i(\xi, P, F, \rho, \gamma, t_i)$, $i \in N$. Здесь t_i , $i \in N$ – время окончания $i - 1$ цикла и начала нового i -го цикла. Расчет начальной скорости цикла потребует достаточно объемного изложения, поэтому в данной статье опускается.

Рассмотрим уравнение (3.2) при фиксированном $\xi \in \Gamma_0$, умножив его скалярно

на $\frac{dx(\xi, t)}{dt}$, и после интегрирования в пределах от 0 до t получим

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(\xi, t)}{dt^2} \cdot \frac{dx(\xi, t)}{dt} &= F(x(\xi, t), t) \frac{dx(\xi, t)}{d\tau} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} \left(\left| \frac{dx(\xi, t)}{dt} \right|^2 \right) = F(x(\xi, t), t) \frac{dx(\xi, t)}{d\tau}. \end{aligned}$$

Произведение в правой части последнего равенства есть отрицательная величина, так как угол между векторами тупой, поэтому после интегрирования последнего равенства получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left| \frac{dx(\xi, t)}{dt} \right|^2 &= \frac{1}{2} u_i^2(\xi) - \\ - \int_0^t [F(x(\xi, \tau), \tau) \left(- \frac{dx(\xi, t)}{d\tau} \right)] d\tau \end{aligned}$$

или

$$\frac{1}{2} v^2 + Z(\xi, t) = \frac{1}{2} u_i^2(\xi), \quad (3.24)$$

где

$$Z(\xi, t) = \int_0^t [F(x(\xi, \tau) \left(- \frac{dx(\xi, t)}{d\tau} \right)] d\tau \geq 0,$$

$$v(\xi, t) = |v(\xi, t)|.$$

Уравнение (3.2) при фиксированном $\xi \in \Gamma_0$ есть уравнение движения частицы, тогда в равенстве (3.24) первый член представляет собой кинетическую энергию, интеграл может быть назван потенциальной энергией, и (3.24) выражает закон сохранения энергии для этой частицы.

Будем изучать фазовые картины уравнения (3.24) в vz -плоскости, где Ov – горизонтальная, Oz – вертикальная ось после первого сжатия, которые представляют собой семейство траекторий, причем каждая кривая уравнения (3.24) зависит от $u_i(\xi)$ при фиксированном значении ξ .

Из уравнения (3.24) получим уравнение, которое описывает процессы разлета частиц газа:

$$v(\xi, t) = \sqrt{u_i^2(\xi) - 2 \cdot Z(\xi, t)}$$

и изображает траекторию частицы в виде дуги ABC в первой четверти vz -плоскости при $t \geq 0$ с координатами

$$A(0, 0), \quad B\left(\frac{u_i}{\sqrt{2}}, \frac{1}{4} u_i^2\right) \quad \text{и} \quad C\left(0, \frac{1}{2} u_i^2\right).$$

Используя для изучения процесса сжатия уравнения (3.15) и (3.16) с учетом начальных условий (3.17), при $t' = t - t_1 \geq 0$ и убывания компонентов вектора $x(\xi, t)$, получим уравнение:

$$v(\xi, t') = -\sqrt{2 \cdot Z(\xi, t')}, \quad (3.25)$$

которое изображает траекторию частицы дугой CDA во второй четверти vz -плоскости, где

$$Z(\xi, t') = \int_0^{t'} [F(x(\xi, \tau), \tau) \frac{dx(\xi, t)}{d\tau}] d\tau \geq 0,$$

так как векторы F и $\frac{dx(\xi, t)}{dt'}$ образуют между собой острый угол. При

$Z(\xi, t') = \frac{1}{4} u_i^2$ получим $v(\xi, t') = -\frac{u_i}{\sqrt{2}}$, то есть координаты точки $D\left(-\frac{u_i}{\sqrt{2}}, \frac{1}{4} u_i^2\right)$, симметричной точке B . Для дальнейшего

изучения движения частицы газа, описываемого уравнением (3.25), преобразуем функцию $Z(\xi, t')$, применяя теорему о среднем [26], с учетом того, что $x(\xi, 0) = 0$, так как в начальный момент движение начиналось из точки $A(0, 0)$ фазовой плоскости:

$$\begin{aligned} Z(\xi, t') &= \int_0^{t'} \tilde{F}(\xi, \tau) \frac{dx(\xi, \tau)}{d\tau} d\tau = \\ &= \tilde{F}(\xi, \theta_2) x(\xi, t'). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Используя (3.26), при $x(\xi, t') \rightarrow 0$ получим в силу ограниченности $\tilde{F}(\xi, \theta_2)$, что $Z(\xi, t') \rightarrow 0$ и $v(\xi, t') \rightarrow 0$.

Таким образом, конечная дуга ABC непрерывно продолжена дугой CDA , изображает замкнутый овал; приходим к выводу, что для каждого параметра множества $\{u_i(\xi)\}$ при фиксированном значении ξ получим семейство замкнутых траекторий.

Это доказывает, что в каждом из рассмотренных случаев движения описываемое решением уравнения (3.2) представляются счетным числом циклов квазипериодических процессов. Время каждого колебания T , или пробега каждого цикла, не является постоянным числом, а является функцией $T = T(u_i) = T_i$, где $i \in N$ – множеству натуральных чисел. Причем для каждого цикла справедливо равенство

$$x(\xi, t_i + T_i) = x(\xi, t_i),$$

где t_i – время завершения предыдущего и начало последующего циклов, при этом для $t \in [0, T_i]$

$$x(\xi, t + T_i) \neq x(\xi, t).$$

Если предположить, что при изучении движений идеального газа сжатие происходит на одну и ту же величину $|x(\xi, t)| \ll \varepsilon$, сверхсжатый газ расширяется с одинаковой скоростью $u_i(\xi) = u_1(\xi)$ при всех $i \in N$, то период T колебания на основании (3.14) и (3.22) будет постоянным для фиксированной точки $\xi \ll \varepsilon$:

$$T = t_1 + t_2 = \frac{|u_1(\xi)|}{|\tilde{F}(\xi, \theta)|} + \sqrt{\frac{2|x_{\max}(\xi, t_1)|}{|\tilde{F}(\xi, \theta_1)|}}.$$

В этом случае, если $x = x(\xi, t)$, решение системы (3.2) есть периодическая функция по переменной t с периодом $T_i = T = \text{const}$, т. е. $x(\xi, t + T) = x(\xi, t)$, тогда вектор-функция гравитационной силы

$$F(x(\xi, t), t) = G \iiint_{\Omega_0} \rho_0(\eta) \frac{x(\eta, t) - x(\xi, t)}{|x(\xi, t) - x(\eta, t)|^3} d\eta$$

будет периодической функцией переменной t с периодом T . Из периодичности вектор-функций $x(\xi, t)$ следует периодичность ее производных с тем же периодом. Периодическая вектор-функция $x(\xi, t)$ удовлетворяет системе (3.2), системе

$$\begin{cases} v(\xi, t) = u_i(\xi) + \int_0^t \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau, \\ v(\xi, t) = \int_0^t \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau, \end{cases} \quad (3.27)$$

которая описывает один цикл движения, а также системе

$$x(\xi, t) = \xi + \int_0^t v(\xi, \tau) d\tau.$$

В указанных системах выполняется очевидное условие равенства нулю интегралов

$$\int_t^{t+T} \tilde{F}(\xi, \tau) d\tau = 0, \int_t^{t+T} v(\xi, \tau) d\tau = 0,$$

гарантирующих периодичность интегралов.

Таким образом, в силу данного предположения об исследовании идеального политропного и изэнтропического газа, отсутствия источников энергии, температурных, внутриядерных и других физико-химических процессов приходим к выводу, что решениями нелинейной системы интегро-дифференциальных уравнений (3.2) и систем интегральных уравнений типа Вольтерра (3.3) и (3.4), удовлетворяющих начальным-краевым условиям (3.6), являются периодическими функциями.

Теорема доказана.

Исследование эволюции конечной массы самогравитирующего газа

привело к важному результату: выявлено, что движение частиц газа свободной поверхности осуществляется в общем случае как квазипериодическое и в частном случае как периодическое, которое, согласно определению Л. В. Овсянникова [32], можно назвать «газовым маятником» – по аналогии с обычными колебаниями физического маятника.

4. Заключение

В статье рассмотрена система газовой динамики в форме Эйлера. Преобразование данной системы к лагранжевым координатам позволило свести ее к эквивалентной системе, состоящей из интегральных уравнений типа Вольтерра и из уравнения неразрывности в лагранжевой форме. Существование и единственность решения системы газовой динамики, выполненное автором в работе [11], определяет отображение области Ω_0 в область движущегося газа $\Omega_t \in R^4(x, t)$ в момент t . В работе [11] построено решение, которое является вектор-функцией $\mathbf{x}(\xi, t)$ и $\sigma(\xi, t)$, принадлежащих пространству $C_2^\infty(Q_T)$ в области Q_T , где $Q_T = \bar{\Omega}_0 \times [0, T]$.

Поверхность, ограничивающая конечную массу самогравитирующего газа, является образом точек решения системы интегральных уравнений $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\xi, t)$

при отображении $\xi \in \Gamma_0$ в точки $\mathbf{x} \in \Gamma_t$. При использовании найденного решения с помощью методов качественного исследования систем (3.2)–(3.4) получены результаты динамики свободной границы, которая ограничивает движущийся в вакууме изолированный объем политропного, изэнтропического, самогравитирующего идеального газа, и доказано, что движение частиц газа свободной поверхности является квазипериодической или периодической функцией переменного t .

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что предлагаемый алгоритм последовательного эквивалентного преобразования интегро-дифференциальной системы газовой динамики от эйлеровых к лагранжевым координатам, затем к системе интегральных уравнений типа Вольтерра позволяет найти решение этой системы методом последовательных приближений.

Результаты исследований решений дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений качественными методами создают теоретические перспективы для дальнейшего изучения закономерностей движения конечных масс газа, движения сплошных сред в поле тяжести, исследования задач, возникающих в астрофизике и космогонии. ■

Литература

1. Чандрасекар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия / Пер. с англ. ; под ред. В. В. Румянцева. М. : Мир, 1973. 288 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика / Пер. с англ. ; под ред. Н. А. Слезкина. М. ; Л. : ОГИЗ, 1947. 929 с.
3. Лихтенштейн Л. Фигуры равновесия вращающейся жидкости. М. : Наука, 1965. 252 с.
4. Тассуль Ж.-Л., Теория вращающихся звезд / Пер. с англ. М. : Мир, 1982. 472 с.
5. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М. : Наука, 1971. 875 с.
6. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М. : Наука, 1987. 432 с.
7. Богоявленский О. И. Методы качественной теории динамических систем в астрофизике и газовой динамике. М. : Наука, 1980. 319 с.
8. Дерябин С. Л., Чуев Н. П. Сферически-симметричное истечение самогравитирующего газа в вакуум // ПММ. 1994. № 58. Вып. 2. С. 77–84.
9. Чуев Н. П. Аналитический метод исследования пространственных задач динамики самогравитирующего газа // Вычислительные технологии. 1998. Т. 3. № 1. С. 79–89.
10. Чуев Н. П. О существовании и единственности решения задачи Коши для системы интегральных уравнений, описывающей движение разреженной массы самогравитирующего газа // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 4. С. 676–686.

11. Чуев Н. П. Метод интегральных уравнений Вольтерра в исследовании динамики самотравитирующего газа, ограниченного свободной поверхностью // Вестник УрГУПС. 2022. № 2 (54). С. 4–23. ISSN 2079-0392.
12. N. P. Chuev On the Dynamics of a Free Surface that Limits the Final Mass of a Self-Gravitating Gas. © Springer Nature Switzerland AG 2020, G. V. Demidenko et al. (eds.), Continuum Mechanics, Applied Mathematics and Scientific Computing: Godunov's Legacy. ISBN 978-3-030-38869-0 ; ISBN 978-3-030-38870-6 (eBook).
13. Казаков А. Л., Спевак Л. Ф., Чуев Н. П. Аналитическое и численное исследование динамики свободной границы изолированной массы самотравитирующего газа // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2022, № 4. С. 61–80. ISSN 2410-9908.
14. Пуанкаре А. О кривых, определяемых дифференциальными уравнениями. М. – Л. : ОГИЗ. 1947. 385 с.
15. Немыцкий В. В., Степанов В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений. М. : URSS. 2017 ISBN 978-5-9710-4563-2.
16. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. М. : КомКнига, 2006. 472 с. ISBN 5-484-00459-4.
17. Лефшец С. Геометрическая теория дифференциальных уравнений. М. : Иностранная литература, 1961. 388 с.
18. Рейссиг Р., Сансоне Г., Конти Р. Качественная теория нелинейных дифференциальных уравнений. М. : Наука, 1974. 320 с.
19. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М. : Наука, 1973. 416 с.
20. Овсянников Л. В. Общие уравнения и примеры. Задача о неустановившемся движении жидкости со свободной границей. Новосибирск : Наука, 1967. С. 5–75.
21. Налимов В. И., Пухначев В. В. Неустановившиеся движения идеальной жидкости со свободной границей. Новосибирск : НГУ, 1975. 174 с.
22. Андреев В. К. Устойчивость неустановившихся движений жидкости со свободной границей. Новосибирск : Наука, 1992. 136 с. ISBN 02-029967-7.
23. Антонов В. А., Тимошкова Е. И., Холшевников К. В. Введение в теорию ньютоновского потенциала. М. : Наука, 1988. 272 с. ISBN 5-02-0-3859-2.
24. Гюнтер Н. М. Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики. М. : Гостехиздат, 1953. 415 с.
25. Овсянников Л. В. Лекции по основам газовой динамики. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 336 с. ISBN 5-93972-201-6.
26. Васильева А. Б., Тихонов Н. А. Интегральные уравнения. М. : Физматлит, 2002. 160 с. ISBN 5-9221-0277-X.
27. Смирнов Н. С. Введение в теорию нелинейных интегральных уравнений. М. ; Л., 1936. 125 с.
28. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 256 с. ISBN 5-93972-091-9.
29. Засов А. В., Постнов К. А. Общая астрофизика. Фрязино, 2006. 496 с. ISBN 5-85099-169-7.
30. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция вселенной. М. : Наука, 1975. 735 с.
31. Никольский С. М. Курс математического анализа. Т. II. М. : Наука, 1983. 448 с.
32. Овсянников Л. В. Газовый маятник // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 5. С. 115–119.

References

1. Chandrasekhar S. Ellipsoidal Equilibrium Figures [Ellipsoidal'nye figury ravnovesiya] / Translated from English; edited by V. V. Rumyantsev. M. Mir, 1973. 288 p.
2. Lamb G. Hydrodynamics [Gidrodinamika] / Translated from English; edited by N. A. Selezkin. M. ; L. : ASBMP, 1947. 929 p.
3. Liechtenstein L. Equilibrium Figures of Rotating Liquids. [Figury ravnovesiya vrashchayushchejsya zhidkosti]. M. : Nauka, 1965. 252 p.
4. Tassul Zh.-L. Theory of Rotating Stars [Teoriya vrashchayushchikhsya zvezd] / Translated from English. M. : Mir, 1982, 472 p.
5. Stanyukovich K. P. Unspecified Movements of Continuum. [Neustanovivshiesya dvizheniya sploshnoj sredy]. M. : Nauka, 1971. 875 p.

6. Sedov L. I. *Methods of Similarity and Dimension in Mechanics*. [Metody podobiya i razmernosti v mekhanike]. M. : Nauka, 1987. 432 p.
7. Bogoyavltnsky O. I. *Methods of Qualitative Theory of Dynamic System in Astrophysics and Gas Dynamics*. [Metody kachestvennoj teorii dinamicheskikh sistem v astrofizike i gazovoj dinamike]. M. : Nauka, 1980. 319 p.
8. Deryabin S. L., Chuev N. P. *Spherically Symmetric Flow of Self-Gravitating Gas into Vacuum* [Sfericheski-simmetrichnoe istechenie samogravitiruyushchego gaza v vacuum] // JAMM. 1994. № 58. Vol. 2. P. 77-84.
9. Chuev N. P. *Analytical Research Method of Spatial Problems of the Dynamics of Self-Gravitating Gas* [Analiticheskiy metod issledovaniya prostranstvennykh zadach dinamiki samogravitiruyushchego gaza] // Computing Technologies. 1998. Vol. 3. № 1. P. 79–89.
10. Chuev N. P. *On Existence and Uniqueness of the Solution of the Cauchy Problem for Integral Equation System Describing the Movement of the Self-Gravitating Gas Rarefied Mass* [O sushchestvovanii i edinstvennosti resheniya zadachi Koshi dlya sistemy integral'nykh uravnenij, opisyyvayushchej dvizhenie razrezhennoj massy samogravitiruyushchego gaza] // Journal of Computing Mathematics and Mathematical Physics. 2020. Vol. 60, № 4. P. 676–686.
11. Chuev N. P. *Voltair's Integral Equations Method in the Research of the Dynamics of Self-Gravitating Gas Limited by Free Surface* [Metod integral'nykh uravnenij Vol'terra v issledovanii dinamiki samogravitiruyushchego gaza, ogranichenogo svobodnoj poverkhnost'yu] // Vestnik USURT. 2022. № 2 (54). P. 4–23. ISSN 2079-0392.
12. N. P. Chuev *On the Dynamics of a Free Surface that Limits the Final Mass of a Self-Gravitating Gas*. © Springer Nature Switzerland AG 2020, G. V. Demidenko et al. (eds.), *Continuum Mechanics, Applied Mathematics and Scientific Computing: Godunov's Legacy*. ISBN 978-3-030-38869-0 ; ISBN 978-3-030-38870-6 (eBook).
13. Kazakov A. L., Spevak L. F., Chuev N. P. *Analytical and Numerical Research of Dynamics of the Free Boundary of Isolated Mass of Self-Gravitating Gas* [Analiticheskoe i chislennoe issledovanie dinamiki svobodnoj granicy izolirovannoj massy samogravitiruyushchego gaza] // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2022, № 4. C. 61–80. ISSN 2410-9908.
14. Poincare H. *On Curves Defined by Differential Equations*. [O krivykh, opredelyaemykh differencial'nymi uravneniyami]. M. – L. : ASBMP. 1947. 385 p.
15. Nemytsky V. V., Stepanov V. V. *Qualitative Theory of Differential Equations*. [Kachestvennaya teoriya differencial'nykh uravnenij]. M. : URSS. 2017 ISBN 978-5-9710-4563-2.
16. Stepanov V. V. *Differential Equations Course*. [Kurs differencial'nykh uravnenij]. M. : KomKniga, 2006. 472 p. ISBN 5-484-00459-4.
17. Lefschets S. *Geometrical Theory of Differential Equations*. [Geometricheskaya teoriya differencial'nykh uravnenij]. M. : Foreign Literature, 1961. 388 p.
18. Reissig R., Sansone G, Conti R. *Qualitative Theory of Nonlinear Differential Equations*. [Kachestvennaya teoriya nelinejnykh differencial'nykh uravnenij]. M. : Nauka, 1974. 320 p.
19. Lavrentyev M. A., Shabat B. V. *Hydrodynamics Problems and Their Mathematical Models*. [Problemy gidrodinamiki i ikh matematicheskie modeli]. M. : Nauka, 1973. 416 p.
20. Ovsyannikov L. V. *General Equations and Examples. The Problem of Unspecified Liquid Movement with Free Boundary*. [Obshchie uravneniya i primery. Zadacha o neustanovivshemsya dvizhenii zhidkosti so svobodnoj granicej]. Novosibirsk : Nauka, 1967. P. 5–75.
21. Nalimov V. I., Puhnachev V. V. *Unspecified Movement of an Ideal Liquid with Free Boundary*. [Neustanovivshiesya dvizheniya ideal'noj zhidkosti so svobodnoj granicej]. Novosibirsk : NSU, 1975. 174 p.
22. Andreev V. K. *Stability of Unspecified Movements of Liquids with Free Boundary*. [Ustojchivost' neustanovivshikhsya dvizhenij zhidkosti so svobodnoj granicej]. Novosibirsk : Nauka, 1992. 136 p. ISBN 02-029967-7.
23. Antonov V. A., Timoshkova E. I., Holshevnikov K. V. *Introduction to Newtonian Potential Theory*. [Vvedenie v teoriyu n'yutonovskogo potenciala]. M. : Nauka, 1988. 272 p. ISBN 5-02-0-3859-2.
24. Gunter N. M. *Theory of Potential and Its Implementation to the Principal Problems of Mathematical Physics*. [Teoriya potenciala i ee primenenie k osnovnym zadacham matematicheskoy fiziki]. M. : Gostekhizdat, 1953. 415 p.

25. Ovsyannikov L. V. Lectures on the Bases of Gas Dynamics. [Lekcii po osnovam gazovoj dinamiki]. M. ; Izhevsk : Institute of Computer Science, 2003. 336 p. ISBN 5-93972-201-6.
26. Vasilyeva A. B., Tihonov N. A. Integral Equations. [Integral'nye uravneniya]. M. : Fizmatlit, 2002. 160 p. ISBN 5-9221-0277-X.
27. Smirnov N. S. Introduction to the Theory of nonlinear Integral Equations. [Vvedenie v teoriyu nelinejnykh integral'nykh uravnenij]. M. ; L. , 1936. 125 p.
28. Serrin G. Mathematical Bases of Classical Mechanics of Liquids. [Matematicheskie osnovy klassicheskoj mekhaniki zhidkosti]. Izhevsk : SIC «Regular and Chaotic Dynamics», 2001, 256 p. ISBN 5-93972-091-9.
29. Zasov A. V., Postnov K. A. General Astrophysics. [Obshchaya astrofizika]. Fryazino, 2006. 496 p. ISBN 5-85099-169-7.
30. Zeldovich Y. B., Novikov I. D. Universe Structure and Evolution. [Stroenie i ehvoljuciya vselennoj]. M. : Nauka, 1975. 735 p.
31. Nikolsky S. M. Course of Mathematical Analyses. Vol. II. [Kurs matematicheskogo analiza. T. II]. M. : Nauka, 1983. 448 p.
32. Ovsyannikov L. V. Gas Pendulum [Gazovyj mayatnik] // PMTF. 2000. Vol. 41. № 5. P. 115–119.

Статья сдана в редакцию 25 января 2024 года

А. В. Мартыненко, Д. Ж. Сайфутдинов

Оценка моментов прибытия городского общественного транспорта на остановочные пункты

A. V. Martynenko, D. Zh. Sajfutdinov

Estimation of urban public transport arrival moments to stopping points

Аннотация

Рассмотрена проблема определения моментов прибытия транспортных средств (ТС) на остановочные пункты (ОП) на основе навигационных данных о положении и скорости движения. Точное определение этих моментов является ключевым для получения актуальной матрицы межостановочных корреспонденций, которая необходима для планирования развития городской транспортной инфраструктуры.

Проанализированы разработки алгоритмов по определению времени прибытия ТС на ОП в реальном времени. Описан основной недостаток представленных алгоритмов во время сбоя работы навигационных систем.

Разработан метод оценивания моментов прибытия ТС на ОП по историческим навигационным данным и актуальным данным о положении и скорости транспортного средства как до, так и после прибытия. Метод учитывает возможные сбои в передаче данных, приводящие к тому, что между двумя известными последовательными положениями ТС может находиться несколько ОП.

Приведено строгое теоретико-вероятностное обоснование разработанного метода и рассматриваются его преимущества и ограничения. В частности, подробно обсуждается вопрос об особенностях его валидации и калибровки. Результаты

работы могут быть полезны для управления и планирования развития транспортной системы.

Ключевые слова: городской общественный транспорт, пассажиропотоки, цифровизация транспорта.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-21-32

Abstract

The problem of determining the arrival moments of vehicles (V) at stopping points (SP) based on navigation data on the position and speed of movement has been considered. The precise definition of these points is key to obtaining an up-to-date matrix of inter-stop correspondence, which is necessary for planning the

Статья рекомендована к публикации Г. А. Тимофеевой, д-ром физ.-мат. наук, профессором; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Александр Валерьевич Мартыненко, канд. физ.-мат. наук, доцент, руководитель НИЛ «Транспортное моделирование» Уральского государственного университета путей сообщения; с.н.с. Института экономики УрО РАН; Екатеринбург, Россия. E-mail: AMartynenko@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4701-6398.

Денис Жавдатович Сайфутдинов, аспирант кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: densssov@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1684-0015.

© А. В. Мартыненко, Д. Ж. Сайфутдинов, 2024

Статья подготовлена в соответствии с планом НИР УрГУПС.

The article is recommended for publication by G. A. Timofeeva, Doctor of Physics and Mathematics sciences, professor; Ural State University of Railways. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Alexander Valeryevich Martynenko, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the SRL «Transport Modeling», Ural State University of Railway Transport; Senior Researcher at the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Ekaterinburg, Russia. E-mail: AMartynenko@usurt.ru. ORCID 0000-0002-4701-6398.

Denis Zhavdatovich Sajfutdinov, postgraduate student, Department «Natural Sciences», Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia. E-mail: densssov@yandex.ru. ORCID 0000-0003-1684-0015.

© A. V. Martynenko, D. Zh. Sajfutdinov, 2024

The article has been prepared in accordance with the USURT research plan.

development of urban transport infrastructure.

The development of algorithms for determining the time of arrival of T at the SP in real time has been analyzed. The authors have described the main drawback of the presented algorithms during failures of navigation systems.

A method has been developed for estimating the arrival moments of T at the SP based on historical navigation

data and up-to-date data on the position and speed of the vehicle both before and after arrival. The method takes into account possible failures in data transmission: it leads to the fact that there may be several SP between two known sequential positions of T. A rigorous theoretical and probabilistic justification of the developed method has been given and its advantages and limitations have been

considered. In particular, the issue of the specifics of its validation and calibration has been discussed in detail. The results of the work can be useful for the management and planning of the development of the transport system.

Keywords: urban public transport, passenger traffic, transport digitalization.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-21-32

Планирование развития городской транспортной инфраструктуры должно опираться на прогнозное моделирование распределения транспортных потоков. Создание и калибровка таких моделей требуют как можно более точных данных о существующем распределении пассажиропотоков на личном и общественном транспорте. В частности, для общественного транспорта необходимо знать матрицу межостановочных корреспонденций. Для получения такой информации все чаще используются данные навигационных систем в совокупности с данными платежных систем, датчиков входа и выхода пассажиров, систем видеонаблюдения в салоне ТС и т.п.

Данные навигационных спутниковых систем (в настоящий момент таими система оборудован весь подвижной состав транспорта общего пользования [1]) представляют собой информацию о координатах, скорости и направлении движения ТС, которая должна передаваться не реже чем один раз в 30 с. Для того чтобы получить актуальную матрицу межостановочных корреспонденций по навигационным данным и, например, по платежным данным, необходимо как можно более точно определить моменты прибытия ТС на ОП. Это связано с тем, что используемые на транспорте автоматизированные системы оплаты проезда, как правило, не содержат координаты транзакции (оплаты за проезд), а только время

и идентификатор ТС. Поэтому ОП посадки пассажира необходимо определить по моменту его оплаты за проезд и моменту прибытия ТС на ОП. Для этого используются разные подходы (см. [2, 3] и цитируемую там литературу), но в любом случае точность определения момента прибытия ТС очень важна. Например, если ОП посадки пассажира определяется как ближайшее предшествующее моменту оплаты, то недостаточная точность определения моментов прибытия ТС приведет к значительным ошибкам. Если оценка момент прибытия ТС на ОП завышена, то пассажиры, оплачивающие проезд сразу после посадки (в течение времени, равном величине ошибки), будут идентифицироваться как совершившие посадку на предыдущем ОП. Аналогично и для заниженной оценки.

Вопросам определения времени прибытия ТС на ОП посвящено большое количество исследований; например, в работах [4–6] используются рекуррентные нейронные сети глубокого обучения. Но использование градиентной оптимизации может вызывать трудности из-за вырождения или сингулярности градиента. Статьи [7, 8] также посвящены применению нейронных сетей. В частности, в [7] рассматривались вейвлет-нейронные сети с улучшенной оптимизацией частиц, которая эффективно заменяет использование метода градиентного спуска. Примеры использования других методов машинного обучения

можно найти в [9, 10]. Отметим, что для применения подобных методов необходима большая обучающая выборка, содержащая точные моменты прибытия ТС на ОП, которые, по большому счету, можно получить только в результате натуральных наблюдений.

В работах [11–13] для прогнозирования движения общественного транспорта используются марковские цепи. При таком подходе предполагается, что вероятностное распределение скорости движения ТС на участке маршрута зависит только от скорости его движения на предыдущем участке, и переходные вероятности рассчитываются на основании исторических данных о движении.

Наряду с перечисленными подходами используются регрессионные и статистические методы [14, 16], а также прогнозирование на основе шаблонов движения ТС, сформированных по историческим данным [17–19]. Например, в работе [19] авторы берут во внимание циклические изменения и моделируют данные с использованием двухсезонного экспоненциального сглаживания Холта – Винтера, учитывающего как долгосрочные, так и краткосрочные сезонные колебания данных.

Поскольку у каждого из используемых методов есть преимущества и недостатки, то в некоторых исследованиях комбинируют разные методы. Так, в [20] предложен метод прогнозирования, основанный на адаптивной композиции элементарных алгоритмов прогнозирования (под адаптивностью подразумевают зависимость параметров конструируемой композиции от ряда управляющих параметров модели: погода, пробки, динамика движения и т.п.).

Кроме этого, существуют работы по прогнозированию времени отправления ТС. Например, в [21] рассматривается задача оценки интервала времени между двумя последовательными отправлениями автобусов одного маршрута от начального ОП.

Перечисленные работы посвящены в основном разработке алгоритмов, необходимых для работы сервисов

информирования пассажиров, диспетчеров и других участников перевозочного процесса (примеры таких сервисов для пассажиров: Яндекс Транспорт, 2ГИС и т.п.). Поэтому описанные методы используют исторические данные и прогнозируют момент прибытия на основе поступающих в режиме реального времени данных о положении и скорости ТС в моменты, предшествующие прибытию на ОП. Но в перечисленных работах практически не рассматривается ситуация, когда в силу технических сбояв навигационные данные не поступают на протяжении более-менее длительного времени, за которое ТС успевает проехать несколько перегонов.

Навигационные данные для одного ТС представляют собой последовательность моментов, в каждый из которых известно положение ТС, его скорость и направление движения.

Рассмотрим некоторый маршрут движения ТС и пусть S – множество ОП этого маршрута. Для любой точки x трассы маршрута обозначим через $L(x)$ расстояние от начала маршрута до точки x . Тем самым будет задана одномерная система координат для всех точек трассы маршрута, в частности, для всех ОП. Для каждой остановки $s \in S$ будем рассматривать зону ОП радиуса δ – интервал $[L(s) - \delta, L(s) + \delta]$. Значение δ выбирается так, чтобы посадка и высадка пассажиров происходили в зоне остановки (естественно, при этом нужно учитывать погрешность в навигационных данных). Моментом прибытия ТС на ОП будем считать момент, в который ТС находилось в точке $L(s) - \delta$, а моментом отправления – момент, в который ТС находилось в точке $L(s) + \delta$.

Участок трассы маршрута между зонами двух соседних ОП $s_1, s_2 \in S$ разобьем на отрезки длиной Δl . Величину Δl выбираем так, чтобы скорость ТС на отрезке можно было считать постоянной. Получаем разбиение (см. рис. 1):

$$l^0 = L(s_1) + \delta, l^1 = l^0 + \Delta l, \dots, l^{N-1} = l^0 + (N_1 - 1)\Delta l, l^N = L(s_2) - \delta.$$

Скорость движения ТС на каждом таком отрезке будем рассматривать как случайную величину (при таком подходе скорость конкретного ТС при конкретном перемещении по отрезку является некоторой реализацией этой случайной величины). Эта величина зависит от времени суток и даты, поскольку интенсивность (и, соответственно, скорость) движения на одном и том же участке УДС меняется в течение суток и зависит от дня недели, сезона и т. п. Далее дату будем обозначать через d .

Рассмотрим промежуток времени $[t^b, t^e]$. При небольшом значении величины $t^e - t^b$ можно считать скорость ТС постоянной (но случайной) величиной на любом отрезке $[l^i, l^{i+1}]$ в течение всего промежутка времени $[t^b, t^e]$. Максимальное значение $t^e - t^b$, при котором такое предположение допустимо, обозначим через Δt . Скорость движения ТС в день d по отрезку $[l^i, l^{i+1}]$ в любой момент времени $t \in [t^b, t^e]$ обозначим через \tilde{V}_i^d . Введем случайную величину* \tilde{T}_i^d

$$\tilde{T}_i^d = \frac{\Delta l}{\tilde{V}_i^d},$$

которая представляет собой время, затрачиваемое ТС на перемещение по отрезку $[l^i, l^{i+1}]$, если это перемещение начинается в момент $t \in [t^b, t^e]$.

Необходимо отметить, что если время t достаточно близко ко времени t^e , то есть если $t^e - t < \tilde{T}_i^d$, то определение \tilde{T}_i^d становится некорректным, поскольку в этом случае скорость движения ТС на отрезке $[l^i, l^{i+1}]$ нельзя считать постоянной (когда наступает момент t^e , ТС еще не достигло точки l^i, l^{i+1} и движение продолжается, но скорость уже становится другой). Это не является сколько-нибудь существенной проблемой, учитывая, что $t^e - t^b$ превышает \tilde{T}_i^d на несколько порядков и, следовательно, можно подобрать такое $\varepsilon > 0$, что оно будет значительно меньше, чем

$t^e - t^b$, но при этом будет выполняться $\Pr ob\{\Delta l / \tilde{V}_i^d > t^e - \varepsilon\} = 0$. Поэтому далее величину \tilde{T}_i^d будем рассматривать только для $t \in [t^b, t^e - \varepsilon]$.

Относительно зависимости величин \tilde{T}_i^d и \tilde{V}_i^d от параметра d можно сделать различные предположения. Например, можно считать, что они зависят только от того, является ли d будним днем или выходным. Или же можно использовать более дифференцированный подход, предполагая, что \tilde{T}_i^d и \tilde{V}_i^d зависят от того, каким днем недели является d . Также можно сформулировать предположения, которые будут учитывать сезонность, погоду, праздничные дни и т.п. Далее для определенности будем считать, что распределение рассматриваемых величин зависит только от дня недели. Тогда по имеющимся навигационным данным о скорости движения ТС по маршрутам, содержащим отрезок $[l^i, l^{i+1}]$, можно получить оценки математического ожидания величин \tilde{T}_i^d и \tilde{V}_i^d статистическими методами (в качестве оценки математического ожидания использовать выборочное среднее значение).

В самом деле, для каждого ТС навигационные данные содержат дату, время суток, положение ТС (геокоординаты) и скорость. Будем рассматривать все такие значения скорости, для которых дата приходится на заданный день недели d , время суток лежит в интервале $[t^b, t^e]$, а ТС находится на отрезке $[l^i, l^{i+1}]$. Все такие значения скорости всех ТС (со всех маршрутов) по всем датам, приходящимся на тот же день недели, что и d , обозначим через $\{V_k^{d,i}\}_{k=1}^{N_{d,i}}$. Математическое ожидание для \tilde{T}_i^d может быть оценено следующим образом:

$$M^*[\tilde{T}_i^d] = \frac{1}{N_{d,i}} \sum_{k=1}^{N_{d,i}} \frac{\Delta l}{V_k^{d,i}}. \quad (1)$$

Подчеркнем, что таким образом оценку математического ожидания величины \tilde{T}_i^d можно получить для любого

* Здесь и далее в обозначении случайных величин будем использовать тильду «~».

интервала $[t^b, t^e]$, который удовлетворяет условию $t^e - t^b < \Delta t$.

На основе формулы (1) получим оценку времени, затрачиваемого ТС на перемещение по любому участку трассы маршрута, что позволит оценить моменты прибытия и отправления ТС. Введем обозначения для затрат времени на перемещение (естественно, такие затраты являются случайными величинами):

1) $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ – время, за которое ТС в день d преодолевает промежуток между двумя точками $l_1 \leq l_2$ трассы маршрута при условии, что в момент τ ТС находилось в точке l_1 ;

2) $\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2)$ – время, за которое ТС в день с датой d преодолевает промежуток между двумя точками $l_1 \leq l_2$ трассы маршрута при условии, что в момент τ ТС находилось в точке l_2 .

Для того чтобы оценить математические ожидания величин $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ и $\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2)$ для произвольных l_1 и l_2 , рассмотрим сначала три специальных случая, к которым будут сводиться все остальные допустимые значения l_1 и l_2 .

Случай 1. Точки l_1 и l_2 лежат между зонами соседних ОП s_1 и s_2 , то есть $l^0 \leq l_1 \leq l_2 \leq l^N$ (рис. 1).

Пусть $l_1 \in [l^{i_1}, l^{i_1+1}]$, $l_2 \in [l^{i_2}, l^{i_2+1}]$ и положим $t^b = \tau - \Delta t/2$, $t^e = \tau + \Delta t/2$ (то есть будем рассматривать величины \tilde{T}_i^d и \tilde{V}_i^d именно для такого промежутка $[t^b, t^e]$). Далее будем предполагать, что

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{\tilde{\Theta}_d^{arr} \in [t^e, t^b]\} &= \\ &= \text{Prob}\{\tilde{\Theta}_d^{dep} \in [t^e, t^b]\} = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

тогда

$$\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2) = \tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2) = \sum_{i=i_1}^{i_2} \tilde{T}_i^d \quad (3)$$

и, соответственно,

$$\begin{aligned} M[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] &= M[\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2)] = \\ &= \sum_{i=i_1}^{i_2} M[\tilde{T}_i^d]. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (1) получаем оценку для математического ожидания:

$$\begin{aligned} M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] &= M^*[\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2)] = \\ &= \sum_{i=i_1}^{i_2} \frac{1}{N_{d,i}} \sum_{k=1}^{N_{d,i}} \frac{\Delta l}{V_k^{d,i}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Отметим, что предположение (2) является естественным, оно будет выполняться практически во всех случаях, поскольку Δt значительно превосходит время, необходимое для перемещения ТС между двумя соседними ОП.

Случай 2. Точки l_1 и l_2 совпадают с левым и правым концами зоны ОП, то есть для ОП $s \in S$ (рис. 2):

$$l_1 = L(s) - \delta, l_2 = L(s) + \delta.$$

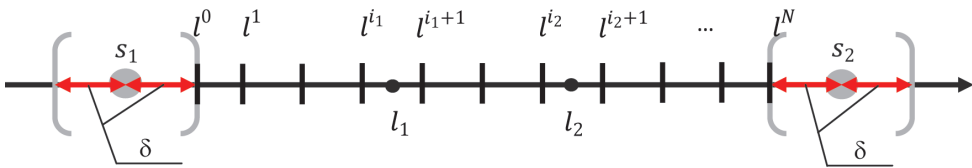


Рис. 1. Случай 1

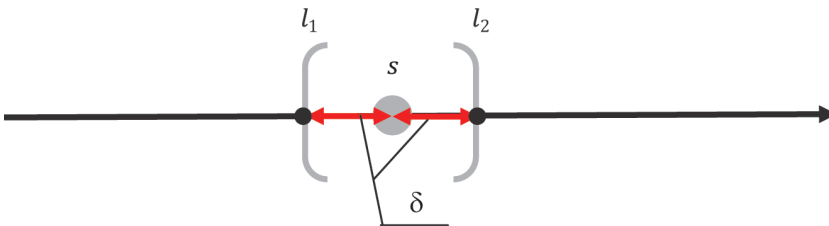


Рис. 2. Случай 2

С учетом того, как мы определили для ОП моменты прибытия и отправления ТС, то в этом случае фактически оценивается продолжительность пребывания ТС на ОП.

Пусть s_1, s, s_2 – три последовательные остановки из S и l', l'' – точки трассы маршрута, для которых

$$\begin{aligned} L(s_1) < l' < L(s) - \delta < \\ < L(s) + \delta < l'' < L(s_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_1 &= \tau - \tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l', L(s) - \delta), \\ \tilde{\tau}_2 &= \tilde{\tau}_1 + \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau_1, l', l''), \end{aligned}$$

тогда будет справедливо равенство

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2) &= \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tilde{\tau}_1, l', l'') - \\ &- \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tilde{\tau}_1, l', l_1) - \tilde{\Theta}_d^{dep}(\tilde{\tau}_2, l_2, l''). \end{aligned} \quad (7)$$

Это равенство будет использовано для оценки математического ожидания величины $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ на основе выборочных характеристик.

Пусть для некоторого ТС, обслуживающего рассматриваемый маршрут, l', l'' – два последовательных момента, для которых известны навигационные данные и

$$\tau - \Delta t / 2 < t' < \tau < t'' < \tau + \Delta t / 2, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} L(s_1) < L(x') < L(s) - \delta < \\ < L(s) + \delta < L(x'') < L(s_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где x', x'' – точки на трассе маршрута, в которых находилось ТС в моменты t', t'' . Рассмотрим множество $\{(t'_{d,k}, t''_{d,k})\}_{k=1}^{N_d}$ всех таких последовательных моментов времени для всех ТС по всем датам, приходящимся на день недели d , и пусть $l'_{d,k}, l''_{d,k}$ – точки на трассе маршрута, в которых находилось ТС в моменты $l'_{d,k}, l''_{d,k}$. Для любого k значения $l'_{d,k}, l''_{d,k}$ представляют собой конкретные реализации случайных величин $\tilde{\tau}_1$ и $\tilde{\tau}_2$, поэтому для k -го наблюдения равенство (7) можно записать в виде

$$\begin{aligned} (\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2))_k &= (\tilde{\Theta}_d^{arr}(t'_{d,k}, l'_{d,k}, l''_{d,k}))_k - \\ &- (\tilde{\Theta}_d^{arr}(t'_{d,k}, l'_{d,k}, l_1))_k - (\tilde{\Theta}_d^{dep}(t''_{d,k}, l_2, l''_{d,k}))_k. \end{aligned} \quad (10)$$

Поскольку

$$(\tilde{\Theta}_d^{arr}(t'_{d,k}, l'_{d,k}, l''_{d,k}))_k = t''_{d,k} - t'_{d,k},$$

то математическое ожидание величины $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ можно оценить следующим образом:

$$\begin{aligned} M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] &= \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2))_k = \\ &= \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (t''_{d,k} - t'_{d,k}) - \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (\tilde{\Theta}_d^{arr}(t'_{d,k}, l'_{d,k}, l_1))_k - \\ &- \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (\tilde{\Theta}_d^{dep}(t''_{d,k}, l_2, l''_{d,k}))_k. \end{aligned}$$

Последние два члена оценим через математические ожидания соответствующих случайных величин (это не приведет к существенному отклонению для суммы, поскольку суммирование по k взаимно компенсирует отклонения величин $\tilde{\Theta}_d^{arr}, \tilde{\Theta}_d^{dep}$ от математического ожидания). В итоге получим

$$\begin{aligned} M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] &= \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} (t''_{d,k} - t'_{d,k}) - \\ &- \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} M^*[\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(t'_{d,k}, l'_{d,k}, l_1)] - \\ &- \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} M^*[\tilde{\Theta}_d^{dep}(t''_{d,k}, l_2, l''_{d,k})]. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом очевидно, что

$$M^*[\tilde{\Theta}_d^{dep}(t''_{d,k}, l_2, l''_{d,k})] = M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)].$$

Оценки математических ожиданий в двух последних членах (11) могут быть получены по формуле (5).

Случай 3. Точки l_1, l_2 лежат в зоне одного ОП (рис. 3). Пусть $s \in S$ и для точек l_1, l_2 выполнено одно из условий:

$$\begin{aligned} L(s) - \delta &\leq l_1 < l_2 < L(s) + \delta, \\ L(s) - \delta &< l_1 < l_2 \leq L(s) + \delta. \end{aligned}$$

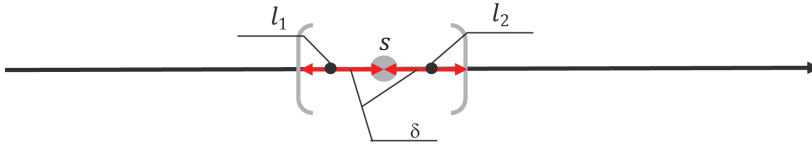


Рис. 3. Случай 3

Далее нам понадобится оценка только для случая, когда одна из точек l_1, l_2 совпадает с концом зоны остановки. Причем при оценке момента прибытия необходимость в рассмотрении именно такой ситуации возникает достаточно часто. Например, в тех случаях, когда первая из двух последовательных записей с навигационными данными получена в момент, когда ТС находится в движении на значительном удалении от ОП, а вторая – в момент, когда ТС уже находится на ОП и производит высадку и посадку пассажиров. В этом случае для оценки момента прибытия и нужна соответствующая рассматриваемому случаю продолжительность времени от момента прибытия на ОП до момента получения данных.

Понятно, что в этом случае $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ не зависит от расстояния между l_1 и l_2 или скорости движения ТС. Поэтому будем исходить из того, что если ТС находится внутри зоны ОП, то с равной вероятностью это может быть любой момент времени от момента прибытия до момента отправления, следовательно

$$\begin{aligned} M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] &= M^*[\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, l_1, l_2)] = \\ &= \frac{1}{2} M^*[\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, L(s) - \delta, L(s) + \delta)] = \\ &= \frac{1}{2} M^*[\tilde{\Theta}_d^{dep}(\tau, L(s) - \delta, L(s) + \delta)]. \end{aligned}$$

Рассмотренные случаи 1–3 охватывают все возможные ситуации, когда

между l_1 и l_2 нет концов зон ОП. И в каждой из этих ситуаций получены формулы для оценок математических ожиданий величин $\tilde{\Theta}_d^{arr}, \tilde{\Theta}_d^{dep}$. Теперь рассмотрим общий случай, когда точки l_1 и l_2 могут находиться где угодно на трассе маршрута. В частности, между ними может находиться несколько концов зон ОП (рис. 4).

Рассмотрим сначала простую ситуацию, когда между точками l_1 и l_2 находится ровно один конец зоны некоторого ОП (совершенно не важно, левый или правый). Обозначим такой конец окрестности через L^δ . В этом случае будет справедливо равенство

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2) &= \\ &= \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, L^\delta) + \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tilde{\tau}_1, L^\delta, l_2), \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\tilde{\tau}_1 = \tau + \tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, L^\delta).$$

Если мы будем считать, что

$$\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tilde{\tau}_1, L^\delta, l_2) = \tilde{\Theta}_d^{arr}(M[\tilde{\tau}_1], L^\delta, l_2),$$

то это не приведет к сколь-нибудь существенному снижению точности. В самом деле, вероятность отклонения $\tilde{\tau}_1$ от $M[\tilde{\tau}_1]$ более чем на несколько минут крайне мала, а за несколько минут интенсивность движения практически не меняется (напомним, что параметр τ в $\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)$ отвечает за изменения, обусловленные суточными колебаниями транспортных процессов). Поэтому из формулы (12) получаем

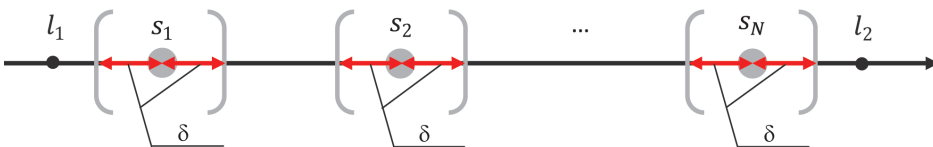


Рис. 4. Случай произвольных l_1 и l_2

$$M^* [\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, l_2)] = M^* [\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, L^\delta)] + M^* [\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau_1^*, L^\delta, l_2)], \quad (13)$$

где

$$\tau_1^* = \tau + M^* [\tilde{\Theta}_d^{arr}(\tau, l_1, L^\delta)].$$

Рассуждая аналогично, можно получить формулу

$$M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, l_1, l_2)] = M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau_1^*, l_1, L^\delta)] + M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, L^\delta, l_2)], \quad (14)$$

где

$$\tau_1^* = \tau - M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, L^\delta, l_2)].$$

Отметим, что члены в правой части выражений (13) и (14) можно вычислить по формулам (5), (11), (12).

Рассмотрим теперь общий случай, когда между точками l_1 и l_2 находятся несколько последовательных концов окрестностей остановок $L_1^\delta, L_2^\delta, \dots, L_N^\delta$, т.е.

$$l_1 \leq L_1^\delta < L_2^\delta < \dots < L_N^\delta \leq l_2.$$

Рассуждая так же, как при выводе (14) и (15), можно получить

$$M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau, l_1, l_2)] = M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau, l_1, L_1^\delta)] + M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau_N^*, L_N^\delta, l_2)] + \sum_{k=1}^{N-1} M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau_k^*, L_k^\delta, L_{k+1}^\delta)], \quad (15)$$

где

$$\tau_k^* = \tau + \sum_{j=1}^{k-1} M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau_j^*, L_j^\delta, L_{j+1}^\delta)].$$

И аналогично:

$$M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, l_1, l_2)] = M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau_N^*, l_1, L_1^\delta)] + M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, L_N^\delta, l_2)] + \sum_{k=1}^{N-1} M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau_k^*, L_{N-k}^\delta, L_{N-k+1}^\delta)], \quad (16)$$

где

$$\tau_k^* = \tau - \sum_{j=1}^{k-1} M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau_j^*, L_{N-j}^\delta, L_{N-j+1}^\delta)].$$

Формулы (5), (11), (15) и (16) дают возможность получить оценки

$M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\tau, l_1, l_2)]$ и $M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\tau, l_1, l_2)]$ для любых значений l_1 и l_2 . Для этого используются исторические навигационные данные о скорости движения ТС и продолжительности времени между двумя последовательными моментами получения навигационных данных, если в эти моменты ТС находилось перед и после ОП. Поэтому, чтобы оценить момент прибытия ТС на ОП $s \in S$, необходимо в последовательности моментов, для которых известны навигационные данные, взять такой момент, в который ТС был ближе всего к левому концу зоны остановки s , т.е. к точке $L(s) - \delta$. Обозначим этот момент через \bar{l} , а расстояние от начала маршрута до ТС в этот момент через \bar{l} , тогда оценка момента прибытия ТС на остановку s будет равна

$$\bar{l} + M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{arr}(\bar{l}, \bar{l}, L(s) - \delta)],$$

если $\bar{l} < L(s) - \delta$,

$$\bar{l} - M^* [\tilde{\Theta}_{r,d}^{dep}(\bar{l}, \bar{l}, L(s) - \delta)],$$

если $\bar{l} < L(s) - \delta$.

Совершенно аналогично оценивается момент отправления ТС от ОП $s \in S$: в этом случае вместо левого конца $L(s) - \delta$ нужно взять правый конец $L(s) + \delta$, а все остальное будет без изменений.

Заключение

Изложенный метод сводит оценивание моментов прибытия и отправления ТС к оценке математического ожидания затрат времени, необходимого ТС, чтобы преодолеть промежуток трассы маршрута от точки, для которой известны навигационные данные до ОП. В свою очередь, математическое ожидание затрат времени оценивается через среднее выборочное значение таких затрат, рассчитанное по историческим данным о движении ТС. При этом оперирование с выборочными значениями требует строгого обоснования, поскольку распределение затрат времени для преодоления движущимся ТС

какого-либо участка трассы маршрута зависит от самого этого участка и времени (даты и времени суток), в который это происходит. Фактически мы имеем дело со случайной функцией, которая зависит от пространственной переменной и от времени.

Приведенное в работе обоснование является строгим, поскольку оно опирается на хорошо известные из теории вероятностей свойства случайных величин. Однако это не гарантирует, что практическое применение предлагаемого метода обеспечит приемлемую точность. Это связано с двумя обстоятельствами.

Во-первых, в рассуждениях непрерывная случайная функция аппроксимируется кусочно-постоянными функциями, т.е. предполагается, что можно выбрать достаточно малые участки трассы маршрута и промежутки времени, на которых скорость движения ТС можно считать постоянной (но, разумеется, случайной) величиной, а по историческим данным как раз и оценивается математическое ожидание времени, за которое ТС преодолевает такой участок. Проблема здесь заключается в том, что если взять этот участок и промежуток чересчур маленькими, то на них попадет мало выборочных данных, что, соответственно, снизит точность. А если их брать большими и тем самым обеспечивать достаточный объем выборки, то погрешность увеличится из-за того, что для таких больших участков и промежутков не будет верным предположение о постоянстве скорости ТС. Причем эту проблему нельзя решить увеличением объема выборки, поскольку для этого нужно рассматривать исторические данные за больший период. Возможно, при малых участках трассы и промежутках времени для

обеспечения достаточных объемов соответствующих им выборок понадобится брать данные за длительный период (за год или даже за несколько лет). Но такие выборки нельзя считать репрезентативными, поскольку за это время динамика потоков ТС на конкретном участке УДС может существенно измениться.

Во-вторых, даже при достаточно малых участках трассы и промежутках времени скорость потока (соответственно, и продолжительность движения по участку) может иметь значительную дисперсию просто из-за каких-то особенностей движения транспорта по рассматриваемому участку. Это, конечно же, приведет к тому, что во многих случаях моменты прибытия ТС на ОП будут значительно отличаться от получаемых оценок.

Поэтому для проверки точности метода необходима его валидация на эмпирических данных, содержащих точные значения моментов прибытия и отправления ТС. Такие данные могут быть собраны либо путем натуральных наблюдений, либо с помощью каких-то средств автоматизированного сбора данных. Например, такую информацию можно получить (с небольшой погрешностью) от датчиков входа и выхода пассажиров. Для обеспечения репрезентативности такие данные должны быть собраны с учетом разнообразия видов транспорта, маршрутов и ТС. Отметим также, что при наличии репрезентативных эмпирических данных о моментах отправления и прибытия можно выполнить калибровку метода в плане выбора оптимальных размеров участка трассы и промежутка времени, для которых скорость ТС можно считать постоянной (т.е. выбрать оптимальные значения параметров Δl и Δt). ■

Литература

1. Об утверждении методических рекомендаций по оптимизации систем транспортного обслуживания городских агломераций, а также внедрению цифровых технологий оплаты проезда и мониторинга транспортного обслуживания населения: приказ Министерства транспорта РФ от 30 декабря 2021 г. № 482. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403423478/> (дата обращения: 24.12.2023).

2. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Обследование пассажирских потоков путем анализа валидаций электронных проездных // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1 (77). – С. 52–71. ISSN 2071-7296.
3. Фадеев А. И., Алхуссейни С. Методика определения корреспонденций пассажиров общественного транспортом из операций валидаций электронных проездных билетов // Вестник СибАДИ. – 2022. – Т. 19, № 3 (85). – С. 370–397. ISSN 2071-7296.
4. Гладских Е. Ю., Озернова Н. А. Общественный транспорт как логистическая система в инфраструктуре мегаполисов // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2015. – С. 28–32. ISSN 2413-0257.
5. Iovino I., Flammini M., Nguyen P. T., Salle A. D., Gallo F. Unavailable Transit Feed Specification: Making It Available With Recurrent Neural Networks // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, № 4. – P. 2111–2122. ISSN 1558-0016.
6. Xie Z. Y., He Y. R., Chen C. C., Li Q. Q., Wu C. C. Multistep Prediction of Bus Arrival Time with the Recurrent Neural Network // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – P. 1–14. ISSN 1563-5147.
7. Agafonov A. A., Yumaganov A. S. Bus Arrival Time Prediction Using Recurrent Neural Network with LSTM Architecture // Optical Memory and Neural Networks. – Vol. 28, № 3. – 2019. – P. 222–230. ISSN 1934-7898.
8. Yuanwen L., Said E., Dazu S., Yian W. Bus Arrival Time Prediction Using Wavelet Neural Network Trained by Improved Particle Swarm Optimization // Journal of Advanced Transportation. – Vol. 2020. P. 1–9. ISSN 0197-6729.
9. Singh N., Kumar K. A Review of Bus Arrival Time Prediction Using Artificial Intelligence // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. – 2022. – P. 1–29. ISSN 1942-4795.
10. Агафонов А. А., Мясников В. В. Оценка и прогнозирование параметров транспортных потоков с использованием композиции методов машинного обучения и моделей прогнозирования временных рядов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 539–549. ISSN 2412-6179.
11. Jalaney J., Ganesh R. S. Accurate Bus Arrival Time from Linear and Non-Linear Route Parameters Using Hybrid Predictors // 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication, Trichy, India, 07-09 October 2021. – IEEE, 2019. – P. 633–638. ISBN 978-1-6654-3369-3.
12. Филишов Ф. В., Шульгин Ф. Э. Применение цепей Маркова для оптимизации движения общественного транспорта // Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей; Сборник лучших докладов, Санкт-Петербург, 05-07 декабря 2023. – СПбГУТ, 2023. – Т. 1. – С. 396–401. ISBN 978-5-89160-306-6.
13. Subbotin B. S., Solntsev A. A., Ershov V. S., Akulov A. A., Lukin K. S. Modeling Methods Comparison of Urban Public Transport Movement for ITS // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 16-18 March 2021. – IEEE, 2021. – P. 1–5. ISBN 978-1-6654-1548-4.
14. Тянь Ю., Рахмангулов А. Н., Муравьев Д. С., Ван С. Алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия городских пассажирских автобусов на основе Марковских цепей // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 29–37. ISSN 2222-9396.
15. Мухитдинов А. А., Кутлимуратов К., Сираджев Б. Метод временного моделирования автобусного поезда по маршруту // Транспорт шелкового пути. – 2019. – № 3-4. – С. 15–25. ISSN 2181-0710.
16. Dihua S., Hong L., Liping F., Weining L., Xiaoyong L., Min Z. Predicting Bus Arrival Time on the Basis of Global Positioning System Data // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – № 2034. – P. 62–72. ISSN 0361-1981.
17. Takumi N., Ismail A., Arata E., Masatoshi K., Kazutoshi F. Improving Bus Arrival Time Prediction Accuracy with Daily Periodic Based Transportation Data Imputation // 2023 IEEE International Conference on Smart Mobility, Thuwal, Saudi Arabia, 19-21 March 2023. – IEEE, 2023. – P. 126–131. ISBN 979-8-3503-1275-1.
18. Игумнов А. О., Соськин Д. М. Разработка методики построения прогноза времени прибытия с использованием статистических и фактических данных о движении

- транспортных средств по принципу подбора шаблонов. URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 26.02.2024).
19. Prakhar V., K. Ramachandra R. An Adaptive Long-Term Bus Arrival Time Prediction Model with Cyclic Variations // *Journal of Public Transportation*. – 2015. – Vol. 18, № 1. P. 1–18. ISSN 2375-0901.
 20. Агафонов А. А., Мясников В. В. Алгоритм оценки времени прибытия общественно-го транспорта с использованием адаптивной композиции элементарных прогнозов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 356–368. ISSN 0134-2452.
 21. Агафонов А. А. Алгоритм оценки времени отправления общественного транспорта с использованием стратегий управления движением // *IV Международн. конф. и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии»*, Самара, 24–27 апреля 2018 года. – Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева. – 2018. – С. 1214–1220.

References

1. On the approval of methodological recommendations for the optimization of transport service systems for urban agglomerations, as well as the introduction of digital technologies for fare payment and monitoring of public transport services: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 482 dated December 30, 2021. [Ob utverzhdenii metodicheskikh rekomendacij po optimizacii sistem transportnogo obsluzhivaniya gorodskih aglomeracij, a takzhe vnedreniyu cifrovyh tekhnologij oplaty proezda i monitoringa transportnogo obsluzhivaniya nase-leniya URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403423478> (date of access: 24.12.2023).
2. Fadeev A. I., Alkhuseini S. Examination of passenger flows by analyzing the validation of electronic travel cards [Obsledovanie passazhirskih potokov putem analiza validacij elektronnyh proezdnyh] // *Gerald of SibADI*. – 2021. – Vol. 18, № 1 (77). – Pp. 52–71. ISSN 2071-7296.
3. Fadeev A. I., Alkhuseini S. Methodology for determining correspondence of passengers by public transport from operations of validations of electronic travel tickets [Metodika opredeleniya korrespondencij passazhi-rov obshchestvennym transportom iz operacij validacij elektronnyh proezdnyh biletov] // *Gerald of SibADI*. – 2022. – Vol.19, № 3 (85). – Pp. 370–397. ISSN 2071-7296.
4. Gladskikh E. Yu., Ozerova N. A. Public transport as a logistics system in the infrastructure of megacities [Obshchestvennyj transport kak logisticheskaya sistema v infrastrukture megapolisov] // *Economics and Business: theory and practice*. – 2015. – Pp. 28–32. ISSN 2413-0257.
5. Iovino I., Flammini M., Nguyen P. T., Salle A. D., Gallo F. Unavailable Transit Feed Specification: Making It Available With Recurrent Neural Networks // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2021. – Vol. 22, № 4. – P. 2111–2122. ISSN 1558-0016.
6. Xie Z. Y., He Y. R., Chen C. C., Li Q. Q., Wu C. C. Multistep Prediction of Bus Arrival Time with the Recurrent Neural Network // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021. – P. 1–14. ISSN 1563-5147.
7. Agafonov A. A., Yumaganov A.S. Bus Arrival Time Prediction Using Recurrent Neural Network with LSTM Architecture // *Optical Memory and Neural Networks*. – Vol. 28, № 3. – 2019. – P. 222–230. ISSN 1934-7898.
8. Yuanwen L., Said E., Dazu S., Yian W. Bus Arrival Time Prediction Using Wavelet Neural Network Trained by Improved Particle Swarm Optimization // *Journal of Advanced Transportation*. – Vol. 2020. P. 1–9. ISSN 0197-6729.
9. Singh N., Kumar K. A Review of Bus Arrival Time Prediction Using Artificial Intelligence // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. – 2022. – P. 1–29. ISSN 1942-4795.
10. Agafonov A. A., Myasnikov V. V. Estimation and forecasting of traffic flow parameters using the composition of machine learning methods and time series forecasting models [Ocenka i prognozirovanie parametrov transportnyh potokov s ispol'zovaniem kompozicii metodov mashinnogo obucheniya i modelej prognozirovaniya vremennyh ryadov] // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38. № 3. – Pp. 539–549. ISSN 2412-6179.
11. Jalaney J., Ganesh R. S. Accurate Bus Arrival Time from Linear and Non-Linear Route Parameters Using Hybrid Predictors // *2nd International Conference on Smart Electronics*

- and Communication, Trichy, India, 07-09 October 2021. – IEEE, 2019. – P. 633–638. ISBN 978-1-6654-3369-3.
12. Filippov F. V., Shulgin F. E. The use of Markov chains to optimize the movement of public transport [Primenenie cepej Markova dlya optimizacii dvizheniya obshchestvennogo transporta] // All-Russian scientific, technical and scientific-methodological conference of undergraduates and their supervisors; Collection of the best reports, St. Petersburg, 05-07 December 2023. – SUT, 2023. – Vol. 1. – Pp. 396–401. ISBN 978-5-89160-306-6.
 13. Subbotin B. S., Solntsev A. A., Ershov V. S., Akulov A. A., Lukin K. S. Modeling Methods Comparison of Urban Public Transport Movement for ITS // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 16-18 March 2021. – IEEE, 2021. – P. 1–5. ISBN 978-1-6654-1548-4.
 14. Tian Yu., Rakhmangulov A. N., Muraviev D. S., Wang S. Algorithm for predicting the arrival times of urban passenger buses based on Markov chains [Algoritm prognozirovaniya momentov vremeni pribytiya gorodskih passazhirskih avtobusov na osnove Markovskih cepej] // Modern problems of the Russian transport complex. – 2018. – Vol. 8. № 2. – Pp. 29–37. ISSN 2222-9396.
 15. Mukhitdinov A. A., Kutlimuratov K., Siradzhov B. Method of time simulation for a bus train along the route [Metod vremennogo modelirovaniya avtobusnogo poezda po marshrutu] // Silk Road transport. – 2019. – № 3-4. – Pp. 15–25. ISSN 2181-0710.
 16. Dihua S., Hong L., Liping F., Weining L., Xiaoyong L., Min Z. Predicting Bus Arrival Time on the Basis of Global Positioning System Data // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – №2034. – P. 62–72. ISSN 0361-1981.
 17. Takumi N., Ismail A., Arata E., Masatoshi K., Kazutoshi F. Improving Bus Arrival Time Prediction Accuracy with Daily Periodic Based Transportation Data Imputation // 2023 IEEE International Conference on Smart Mobility, Thuwal, Saudi Arabia, 19-21 March 2023. – IEEE, 2023. – P. 126–131. ISBN 979-8-3503-1275-1.
 18. Igumnov A. O., Sonkin D. M. Development of a methodology for predicting arrival time using statistical and factual data on the movement of vehicles based on the principle of template selection [Razrabotka metodiki postroeniya prognoza vreme-ni pribytiya s ispol'zovaniem statisticheskikh i fakticheskikh dannyh o dvizhenii transportnykh sredstv po principu podbora shablonov]. URL: <https://cyberleninka.ru> (date of access: 26.02.2024).
 19. Prakhar B., K. Ramachandra R. An Adaptive Long-Term Bus Arrival Time Prediction Model with Cyclic Variations // Journal of Public Transportation. – 2015. – Vol. 18, № 1. P. 1–18. ISSN 2375-0901.
 20. Agafonov A. A., Myasnikov V. V. Algorithm for estimating the arrival time of public transport using adaptive composition of elementary forecasts [Algoritm ocenki vremeni pribytiya obshche-stvennogo transporta s ispol'zovaniem adaptivnoj kompozicii elementarnykh prognozov] // Computer Optics. – 2014. – Vol. 38. № 2. – Pp. 356–368. ISSN 0134-2452.
 21. Agafonov A. A. Algorithm for estimating the departure time of a public transport using traffic management strategies [Algoritm ocenki vremeni otpravleniya obshchestvennogo transporta s ispol'zovaniem strategij upravleniya dvizheniem] // IV International Conference and Youth School «Information Technologies and Nanotechnology», Samara, April 24-27, 2018. – Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. – 2018. – Pp. 1214–1220.

Статья сдана в редакцию 1 марта 2024 года

Организация производства

УДК 65.011.4

Д. Ю. Горелова, С. Р. Рогожина

Методика оценки запаздывания влияния факторов на сетевые организационные структуры

UDC 65.011.4

D. Yu. Gorelova, S.R. Rogozhina

Methodology for assessing the delayed the influence of factors on network organizational structures

Аннотация

В статье предложена методика оценки запаздывания влияния факторов в функционировании хозяйствующих субъектов сетевых организационных структур. Для анализа взяты три предприятия с различной динамикой производственных мощностей (возрастающая, отрицательная и стабильно работающее предприятие). Выборка состоит из десяти контрольных точек (лет). Рассмотрены внутренние факторы состояния сетевых организационных структур на примере трех предприятий с различной производственной динамикой (стабильно функционирующей, с растущими и падающими

производственными мощностями).

Выполнен корреляционный анализ для выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на исследуемую переменную «объем реализованной продукции». После анализа было отобрано два значимых фактора для успешно развивающегося предприятия, три – для стабильно работающего и четыре – для предприятия, отличающегося стремительным падением производственных мощностей.

Проведена оценка запаздывания влияния факторов методом пошагового сдвига столбца данных относительно столбца значений реализованной продукции.

С помощью метода наименьших квадратов найдены коэффициенты прогнозной формы и получены функции трёх предприятий сетевой организационной структуры.

Использование предложенной методики позволяет обосновать значимые показатели функционирования сетевых организационных структур и период, когда их влияние на элементы сети будет максимальным.

Ключевые слова: влияние факторов, запаздывание влияния, организационная сеть, устойчивость организационных сетей, факторы, прогнозный функционал.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-33-41

Статья рекомендована к публикации В. М. Сай, д-ром техн. наук, профессором; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: VSay@usurt.ru

Дарья Юрьевна Горелова, канд. техн. наук, доцент; кафедра «Строительные конструкции и строительное производство» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: DGorelova@usurt.ru. ORCID 0000-0002-5653-2036.

София Радиславовна Рогожина, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: sofia_rogozhina@bk.ru. ORCID 0009-0006-4961-9519.

© Д. Ю. Горелова, С. Р. Рогожина, 2024

The article has been recommended for publication by V. M. Say, Doctor of Engineering sciences, professor; Ural State University of Railway Transport. E-mail: VSay@usurt.ru.

Daria Yurievna Gorelova, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor; Department «Engineer construction and Construction Operations Department» Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: DGorelova@usurt.ru. ORCID 0000-0002-5653-2036.

Sofia Radislavovna Rogozhina, Department «Railway Automation, Telemechanics and Communication» Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: sofia_rogozhina@bk.ru. ORCID 0009-0006-4961-9519.

© D. Yu. Gorelova, S. R. Rogozhina, 2024

Abstract

The article has proposed a methodology for assessing the delayed influence of factors in the functioning of business entities of network organizational structures. Three enterprises with different dynamics of production capacities (increasing, negative and stable enterprise) were used to make an analysis. The sample consists of ten control points (years). The internal factors of the state in the network organizational structures have been considered on the example of three enterprises with different production dynamics (stably functioning, with growing and falling production capacities).

The correlation analysis has been performed to identify the factors that have the greatest impact on the studied variable «volume of realized production». After the analysis two significant factors have been chosen for a successfully developing enterprise: three factors are for a stable one and four ones are for an enterprise characterized by a rapid decline in production capacity.

The estimation of the delayed influence of factors by the method of step-by-step shifting of the data column relative to the values column of the realized production was carried out.

Using the least squares method, the coefficients of

the predictive form have been found and the functions of three enterprises in the network organizational structure have been obtained.

The use of the proposed methodology allows us to substantiate significant indicators of the functioning of network organizational structures and periods when their impact on network elements will be maximum.

Key words: influence of factors, delayed influence, organizational network, stability of organizational networks, factors, predictive functional.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-33-41

Устойчивость работы сетевой структуры определяется объемом продукции, реализованной хозяйствующими субъектами. Главная цель функционирования любого предприятия – востребованность на рынке и внутри организационной сети. Падение спроса на продукцию говорит о нестабильности функционирования элемента сети и сетевой организационной структуры в целом [1, 2].

Ранее предлагалось использовать корреляционно-регрессионный анализ для определения величины влияния каждой из множества переменных, воздействующих на динамику объема реализованной продукции [3]. Однако некоторые факторы могут влиять на объем реализованной продукции хозяйствующих субъектов не мгновенно, а через некий промежуток времени, называемый запаздыванием.

Значит, необходимо, используя методику многофакторного анализа, не только выявить факторы, которые оказывают наибольшее действие на динамику результирующей переменной, но и определить временной период, когда это влияние будет максимальным.

Для исключения сильно зависимых между собой факторов и величин, оказывающих небольшое влияние на объем реализованной продукции (зависимую переменную), применялся метод корреляционного анализа [4–6]. Исследованные факторы предприятия 1: X_1 – стоимость основных производственных фондов, руб., X_2 – амортизационные отчисления, руб., X_3 – эффективность использования основных производственных фондов, руб./руб., X_4 – фондоемкость, руб./руб., X_5 – фондоотдача, руб./руб., X_6 – доля продукции, сбываемой холдингу ОАО «РЖД», %, X_7 – рентабельность, %, X_8 – доля заемных средств, %, X_9 – доля собственных средств на развитие предприятия, %.

Для анализа можно использовать как предложенные факторы, так и их расширенный перечень, определяющий эффективность функционирования холдинга «РЖД» [7]. Исходные данные предприятия 1 с возрастающей динамикой производственных мощностей за десять условных лет представлены в таблице 1.

Корреляционные матрицы значений попарной корреляции между факторами сформированы в программе Microsoft

Таблица 1

Исходные данные исследуемого предприятия 1

Период	Объем реализованной продукции	Стоимость ОПФ	Амортизационные отчисления	Эффективность использования ОПФ	Фондоёмкость	Фондоотдача	Доля продукции, сбываемой холдингу ОАО «РЖД»	Рентабельность	Доля заемных средств	Доля собственных средств на развитие предприятия
	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	132500	62500	6250	1,36	0,472	2,120	30,5	18,3	30,1	2700
2	130000	60200	6020	1,38	0,463	2,159	30,2	18,5	35,4	2777
3	205350	59064	5906	1,46	0,288	3,477	30,4	19,0	29,8	2108
4	201500	58514	5851	1,44	0,290	3,444	32,1	18,9	31,7	2616
5	196000	58789	5879	1,42	0,300	3,334	33,2	18,7	34,9	2535
6	226800	59561	5956	1,52	0,263	3,808	30,5	19,6	36,3	2641
7	217500	60713	6071	1,50	0,279	3,582	32,3	19,4	37,2	2660
8	212000	62158	6216	1,48	0,293	3,411	33,7	19,2	35,6	2501
9	245000	63416	6342	1,56	0,259	3,863	30,6	20,0	37,4	2886
10	231050	65034	6503	1,54	0,281	3,553	34,5	19,8	36,2	2717

Excel. После проведения корреляционного анализа данных предприятия 2 исследовались факторы: X_1 – стоимость основных производственных фондов, тыс. руб.; X_3 – эффективность использования основных производственных фондов, руб./руб.

Корреляционная матрица для выбранных факторов приведена таблице 2; переменные x_1, x_3 соответствуют параметрам «стоимость основных производственных фондов» и «эффективность использования основных производственных фондов». Переменная y соответствует корреляции параметров x_1 и x_3 с исследуемым фактором, определяет величину влияния каждого из них на объем реализованной продукции.

Таблица 2

Корреляционная матрица предприятия 1 и отобранных факторов

	y	x_1	x_3
y	1		
x_1	0,199	1	
x_3	0,955	0,412	1

Именно эти два фактора легли в основу функциональной прогнозной модели предприятия 1 и на основании данных по этим факторам проводились расчеты.

Влияние рассматриваемых факторов на объем реализованной продукции предприятий может быть отсрочено либо запаздывать из-за реакции свободного рынка на изменения факторов. Время запаздывания влияния определяется с помощью пошагового сдвига столбца данных рассматриваемого фактора относительно столбца значений объема реализованной продукции до тех пор, пока корреляция между фактором и исследуемой переменной не достигнет максимального значения. После каждого сдвига на одну компоненту (год) заново формируется корреляционная матрица. На каждом шаге столбцы фактора и исследуемой переменной (объем реализованной продукции) укорачивались на одну компоненту, оставшуюся после сдвига без соответствующей пары (рис. 1).

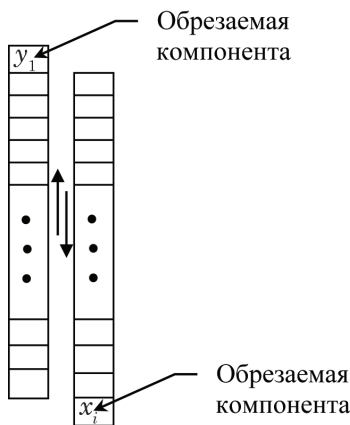


Рис. 1. Сдвиг столбцов и обрезка компонент

В качестве используемого в дальнейшем запаздывания принимается та величина сдвига α_i (в годах), которая дает максимальное значение коэффициента корреляции между фактором x_i и объемом реализованной продукции.

Графики изменения коэффициента корреляции в зависимости от сдвига α_i приведены на рис. 2.

Значения выявленных величин запаздываний по оценочным параметрам приведены в таблице 3.

Таким образом, при старении и износе, а также реновации и ремонте влияние стоимости основных производственных фондов достигает своего пика уже через два года. Эффект от использования основных производственных фондов доходит до максимального значения на третий год.

Аналогично рассмотрены предприятия 4 и 7. Предприятие 4 отличается стабильной производственной динамикой, а предприятие 7 – регрессирующими производственными мощностями. В результате корреляционного анализа для предприятий с положительной динамикой нужны два фактора, объясняющие исследуемую переменную,

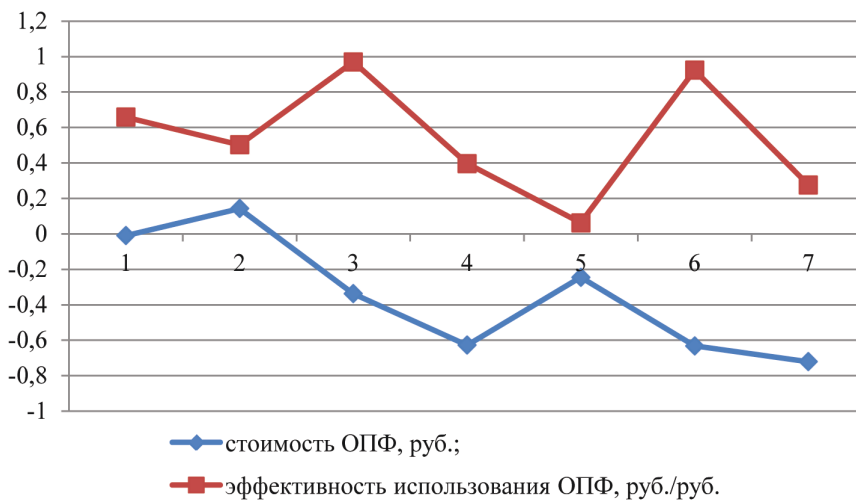


Рис. 2. График изменения влияния факторов на объем реализованной продукции предприятия 1

Таблица 3

Величины запаздывания влияния факторов	
Наименование	Запаздывание влияния параметра, годы, α_i
Стоимость основных производственных фондов, x_1	2
Эффективность использования основных производственных фондов, x_3	3

для предприятия с отрицательной динамикой – четыре, а для предприятия, где рост объема реализованной продукции не превышает падения, необходимо три таких фактора [3].

Значимые факторы и графики изменения коэффициента корреляции в зависимости от сдвига α_i для предприятий 4 и 7 представлены на рис. 3.

Выявленные величины запаздываний для предприятий 4 и 7 приведены в таблицах 4, 5.

Итак, максимальное влияние основных производственных фондов на исследуемую переменную достигает своего максимума уже на второй год для всех предприятий с различной динамикой производственных мощностей. Аналогичным образом ведет себя фактор рентабельности, показывая максимальное влияние на объем реализованной продукции для стабильно функционирующего предприятия и предприятия с падающими мощностями на шестой год.

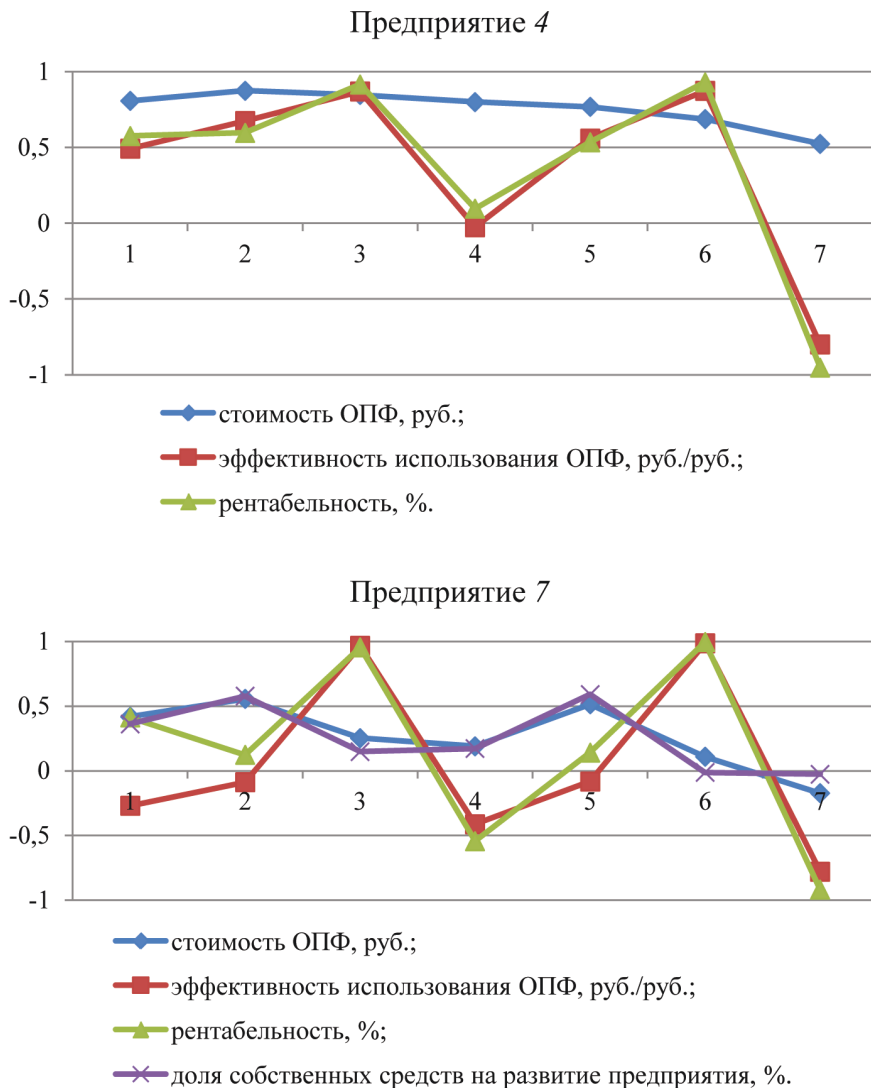


Рис. 3. График изменения влияния факторов на объем реализованной продукции предприятий 4 и 7

Таблица 4

Величины запаздывания факторов предприятий 4

Наименование	Запаздывание влияния параметра, годы, α_i
Стоимость основных производственных фондов, x_1	2
Эффективность использования основных производственных фондов, x_3	6
Рентабельность, x_7	6

Таблица 5

Величины запаздывания факторов предприятий 7

Наименование	Запаздывание влияния параметра, годы, α_i
Стоимость основных производственных фондов, x_1	2
Эффективность использования основных производственных фондов, x_3	6
Рентабельность, x_7	6
Доля собственных средств на развитие предприятия, x_9	5

А вот фактор эффективности использования основных производственных фондов показывает максимальное влияние на исследуемую переменную для растущего предприятия уже на второй год. Для стабильно работающего предприятия и предприятия с падающими производственными мощностями максимальный эффект достигается уже на шестой год.

В настоящей работе принимается, что прогнозный функционал имеет следующий вид:

$$y = A_1 \cdot x_1(t - \alpha_1) + A_2 \cdot x_2(t - \alpha_2) + \dots + A_i \cdot x_i(t - \alpha_i) + B,$$

то есть является линейной формой от значимых переменных, оставленных после корреляционного анализа $x_1(t - \alpha_1)$, $x_2(t - \alpha_2)$, $x_i(t - \alpha_i)$, интерпретируемых как значения учитываемых оценочных факторов на момент t с учетом запаздываний $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ влияния этих факторов на прогнозируемую величину «объем реализованной продукции». В приведенном выражении через A_1, A_2, \dots, A_i обозначены весовые коэффициенты прогнозной формы, которые

отражают степень влияния совокупности исходных данных (исходных факторов) на известные фактические значения объема реализованной продукции [8–10].

Коэффициенты A_1, A_2, \dots, A_i, B прогнозной линейной формы необходимо определить на основании совокупности исходных данных (временных серий) $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}$ и значений факта y_j . Здесь индекс j пробегает совокупность отчетных периодов, для которых есть значения факта y_j и предшествующие (на интервал запаздывания) этим значениям исходные данные [11]. В нашем случае максимальный интервал запаздывания равен шести годам (для эффективности использования основных производственных фондов и рентабельности), поэтому имеет смысл рассматривать значения $j = 7, 8, \dots, 10$.

Для определения коэффициентов A_1, A_2, \dots, A_i, B прогнозной формы использован метод наименьших квадратов (МНК). С помощью МНК построена такая линейная форма от полученных в результате корреляционного анализа значимых переменных, что сумма квадратов отклонений её значений

аргументах формы $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}$ от фактически реализовавшихся значений y_j объема реализованной продукции в соответствующие отчетные периоды максимална [8–11].

Восьмерки $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}$ аргументов линейной формы формируются с учетом запаздывания. Очевидно, если для соответствующего отчетного периода (j -й год) линейная форма должна принимать значение, равное или близкое к y_j (фактически реализованному в j -м году объему продукции), то набором аргументов для формы будет следующая совокупность данных:

$$x_1(j - \alpha_1) = x_{1,j-\alpha_1}, x_2(j - \alpha_2) = x_{2,j-\alpha_2}, \\ \dots, x_i(j - \alpha_i) = x_{i,j-\alpha_i}.$$

В нашем случае ожидаемому значению y_j прогнозной формы соответствует набор аргументов (см. таблицы 3–5 величин запаздывания).

Для предприятия 1: $(x_{1,j-2}, x_{3,j-3})$.

Для предприятия 4: $(x_{1,j-2}, x_{3,j-6}, x_{7,j-6})$.

Для предприятия 7: $(x_{1,j-2}, x_{3,j-3}, x_{7,j-6}, x_{9,j-5})$.

Практически сдвиг столбцов аргументов на период запаздывания осуществлялся в программе Excel. В настоящей работе выписанная система решена методом Гаусса [9–12].

Найденные неизвестные коэффициенты линейной формы для трех предприятий представлены в таблице 6.

Таким образом, прогнозный функционал для задачи прогнозирования объема реализованной продукции исследуемых предприятий сетевой организационной структуры имеет следующий вид:

$$y_1 = -3,861x_1(t - 2) + 570151,444x_3(t - 3) - 399072,245;$$

$$y_4 = -0,594x_1(t - 2) + 473069,514x_3(t - 6) + 26893,614x_7(t - 6) - 957523,889;$$

$$y_7 = 0,166x_1(t - 2) + 276907,645x_3(t - 6) + 14409,961x_7(t - 6) + 5,560x_9(t - 5) - 519524,229.$$

Таблица 6
Коэффициенты уравнений регрессии предприятий 1, 4, 7

Предприятие 1	
B	-399072,245
A_1	-3,861
A_3	570151,444
Предприятие 4	
B	-957523,889
A_1	-0,594
A_3	473069,514
A_7	26893,614
Предприятие 7	
B	-519524,229
A_1	0,166
A_3	276907,645
A_7	14409,961
A_9	5,560

Этим решается задача формирования прогнозного функционала для функциональной модели.

Итак, для формирования функциональной модели предложен набор факторов, из которого с помощью корреляционного анализа выделены наиболее значимые, влияющие на объемы реализованной продукции.

Спрогнозированы объемы реализованной продукции по функциональной модели трех предприятий, входящих в сетевую организационную структуру. Определены запаздывания влияния для каждого из учитываемых факторов, построен прогнозный линейный функционал.

Для предприятия, наращивающего производственные мощности, при отборе нужны два фактора, определяющие его работу в организационной сети: «стоимость основных производственных фондов» с запаздыванием два года и «эффективность использования производственных фондов» с запаздыванием три года.

Для предприятия со стабильно функционирующими производственными мощностями отобрано три значимых фактора: «стоимость основных производственных фондов» с запаздыванием два года, «эффективность использования основных производственных фондов» с запаздыванием шесть лет и «рентабельность» с запаздыванием шесть лет.

Для предприятия, отличающегося стремительным падением объемов

реализованной продукции, требуется четыре фактора, определяющих устойчивость его работы: «стоимость основных производственных фондов» с запаздыванием два года, «эффективность использования основных производственных фондов» с запаздыванием шесть лет, «рентабельность» с запаздыванием шесть лет и «доля собственных средств на развитие предприятия» с запаздыванием пять лет. ■

Литература

1. Gorelova D. Yu. Methodology for substantiating the indicators of economic entities to solve the problems of determining their reliability and stability in the organizational network / V. M. Say, M. R. Yakimov, D. Yu. Gorelova // AIP conference proceedings. Scientific conference on railway transport and engineering. Vol. 2389. – 2021. – P. 100030.
2. Горелова Д. Ю. Моделирование системы обнаружения аномалий в сетевых организационных структурах / В. М. Сай, Д. Ю. Горелова // Вестник УрГУПС. 2023. № 1 (57). С. 4–13. ISSN 2079-0392.
3. Горелова Д. Ю. Методика обоснования показателей хозяйствующих субъектов для определения устойчивости организационной сети с использованием многофакторного анализа / В. М. Сай, Д. Ю. Горелова // Вестник РГУПС. 2020. № 4. С. 102–112. ISSN 0201-727X.
4. Бахвалов Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 9-е изд. – М. : Лаборатория знаний, 2020. – 636 с. ISBN 978-5-00101-836-0.
5. Елисеева И. И. Общая теория статистики / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев / под ред. И. И. Елисеевой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 656 с. ISBN 5-279-02414-7.
6. Близуруков М. Г. Количественные методы анализа многомерных величин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2009. – 123 с. ISBN 978-5-7996-0467-7.
7. Герус В. Л. Система ключевых показателей эффективности как инструмент стратегического управления / В. Л. Герус // Транспорт Урала. 2023. № 3 (78). С. 18–23. ISSN 1815-9400.
8. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М. : Физматлит, 2-е изд., доп. и испр. – 1962. – 349 с.
9. Пугачев В. С. Основы статистической теории автоматических систем. / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Л. Г. Евланов. – М. : Машиностроение. – 1974. 400 с.
10. Шолохович Ф. А. Основы высшей математики / Ф. А. Шолохович, В. В. Васин. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета. – 2-е изд., испр. и доп. 2003. – 416 с.
11. Островская Е. В. Построение функциональной статистической модели прогнозирования / Е. В. Островская, М. Г. Близуруков // Современные проблемы математики и ее приложений : Труды 46-й Международн. молодежной школы-конференции, Екатеринбург, 25–31.01.2015 / Институт математики и механики УрО РАН. – Екатеринбург : Институт математики и механики УрО РАН им. Н.Н. Красовского, 2015. – С. 118–121.
12. Воскобойников Ю. Е. Эконометрика в Excel: парные и множественные регрессивные модели. – СПб : Лань, 2018. – 260 с. ISBN 978-5-8114-2318-7.

References

1. Say V. M., Yakimov M. R., Gorelova D. Yu. Methodology for substantiating the indicators of economic entities to solve the problems of determining their reliability and stability in the organizational network. AIP conference proceedings. Vol. 2389. 2021. P. 100030.
2. Say V. M., Gorelova D. Yu. Modeling of anomaly detection system in network organizational structures [Modelirovanie sistemy obnaruzheniya anomalij v setevyh organizacionnyh strukturah]. Gerald of USURT. 2023. № 1. Pp. 4–13. ISSN 2079-0392.

3. Say V. M., Yakimov M. R., Gorelova D. Yu. Methodology for substantiating the indicators of economic entities to determine the stability of the organizational network using multifactor analysis [Metodika obosnovaniya pokazatelej hozyajstvuyushchih sub"ektov dlya opredeleniya ustojchivosti organizacionnoj seti s ispol'zovaniem mnogofaktornogo analiza]. Vestnik RGUPS. 2020. № 4. Pp. 102–112. ISSN 0201-727X.
4. Bahvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobel'kov G. M. Numerical methods [Chislennye metody]. The 9th edition. – M. : Laboratory of Knowledge. 2020. 636 p. ISBN 978-5-00101-836-0.
5. Eliseeva I. I., Yuzbashev M. M. General theory of statistics [Obschchaya teoriya statistiki]. The 5th edition, revised and enlarged. Moscow: Finance and statistics, 2004. 656 p. ISBN 5-279-02414-7.
6. Blizorukov M. G. Quantitative methods for the analysis of multidimensional quantities. [Kolichestvennye metody analiza mnogomernyh velichin]. Ekaterinburg : Ural University Press, 2009. 123 p. ISBN 978-5-7996-0467-7.
7. Gerus V. L. The system of key performance indicators as a strategic management tool [Sistema klyuchevyh pokazatelej effektivnosti kak instrument strategicheskogo upravleniya]. Transport of the Urals. 2023. № 3 (78). Pp. 18–23. ISSN 1815-9400.
8. Linnik Yu. V. The least squares method and the foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing [Metod naimen'shih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudenij]. Moscow: Physmathlit, the 2nd edition, revised and enlarged. 1962. 349 p.
9. Pugachev V. S., Kazakov I. E., Evlanov L. G. Fundamentals of the statistical theory in automatic systems [Osnovy statisticheskoy teorii avtomaticheskikh system]. Moscow: Mechanical engineering. 1974. 400 p.
10. Sholohovich F. A., Vasin V. V. The fundamentals of Higher Mathematics]. Ekaterinburg: Ural University Press. The 2nd edition, revised and enlarged. 2003. 416 p.
11. Ostrovskaya E. V., Blizorukov M. G. Building a functional statistical forecasting model [Postroenie funkcional'noj statisticheskoy modeli progno-zirovaniya]. Modern Problems of Mathematics and its Applications: Proceedings of the 46th International Youth school conference, Ekaterinburg, 25–31.01.2015. Institute of Mathematics and Mechanics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2015. Pp. 118–121.
12. Voskoboynikov Yu. E. Econometrics in Excel: paired and multiple regression models. [Ekonometrika v Excel: parnye i mnozhestvennye regressivnye modeli]. St. Petersburg : Lan, 2018. 260 p. ISBN 978-5-8114-2318-7.

Статья сдана в редакцию 26 декабря 2023 года

И. Д. Громов, А. Д. Хазимуллин

Перспективы внедрения транспортного маркетплейса для грузоотправителей железнодорожного транспорта

I. D. Gromov, A. D. Khazimullin

Prospects for the implementation of the transport marketplace for shippers of railway transport

Аннотация

Рассмотрены варианты организации логистической деятельности малого и среднего бизнеса, предложен подход к организации рынка транспортных услуг России с использованием принципов электронной торговли. Это предполагает разработку цифрового сервиса – транспортного маркетплейса на базе железнодорожного перевозчика с привлечением всех профессиональных участников транспортного рынка, что позволит создать единое транспортно-информационное пространство, в котором

собственники груза смогут организовать логистику в одно «цифровое окно». Применение цифрового сервиса снизит долю транспортной составляющей в конечной стоимости продукции грузоотправителей, а у логистических операторов появится новый канал продвижения транспортных услуг. С учётом опыта создания современных цифровых сервисов определены архитектура транспортного маркетплейса и требования к его функциональным возможностям.

Разработана графоаналитическая модель по само-

стоятельной организации логистики грузоотправителями в транспортном маркетплейсе и с использованием услуги «цифровой экспедитор».

Рассмотрен алгоритм взаимодействия между контрагентами – профессиональными логистическими операторами и грузоотправителями при планировании транспортировки грузов в транспортном маркетплейсе с использованием блокчейн-технологии – SMART-контрактов. Предложена методика расчёта для определения экономических эффектов железнодорожного перевозчика при

Статья рекомендована к публикации Г. А. Тимофеевой, д-ром физ.-мат. наук, Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Игорь Дмитриевич Громов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Мировая экономика и логистика» Уральского государственного университета путей сообщения, начальник отдела по таможенной деятельности, Свердловский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания – структурное подразделение Центра фирменного транспортного обслуживания – филиал ОАО «РЖД»; Екатеринбург, Россия. E-mail: idgromov@gmail.com. ORCID 0000-0002-3543-7312.

Артем Дамирович Хазимуллин, аспирант кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, ведущий инженер отдела по таможенной деятельности, Свердловский территориальный центр фирменного транспортного обслуживания структурного подразделения Центра фирменного транспортного обслуживания – филиала ОАО «РЖД»; Екатеринбург, Россия. E-mail: hazimullinad@mail.ru. ORCID 0000-0002-7799-0706.

© И. Д. Громов, А. Д. Хазимуллин, 2024

The article has been recommended for publication by G. A. Timofeeva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ural State University of Railway Transport. E-mail: GTimofeeva@usurt.ru.

Igor Dmitrievich Gromov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor; Department «World Economy and Logistics» Ural State University of Railway Transport, Head of the Customs Department, Sverdlovsk Territorial Center for Branded Transport Services structural subdivision of the Center for Branded Transport Services – branch of JSC Russian Railways; Ekaterinburg, Russia. E-mail: idgromov@gmail.com. ORCID 0000-0002-3543-7312.

Artem Damirovich Khazimullin, postgraduate student, Department «Natural Sciences», Ural State University of Railway Transport, Senior Engineer of the Customs Department, Sverdlovsk Territorial Center for Branded Transport Services structural subdivision of the Center for Branded Transport Services – branch of JSC Russian Railways; Ekaterinburg, Russia. E-mail: hazimullinad@mail.ru. ORCID 0000-0002-7799-0706.

© I. D. Gromov, A. D. Khazimullin, 2024

успешной реализации транспортного маркетплейса.

Ключевые слова: транспортно-логистические услуги, транспортный маркетплейс, профессиональный участник транспортного рынка, цифровой сервис, логистика.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-42-52

Abstract

The variants of the organization of logistics activities have been considered for small and medium-sized businesses. Thus, we have proposed an approach to the organization of the Russian transport services market using the principles of electronic commerce. This involves the development of a digital service – a transport market place based on a rail-way

carrier with the involvement of all professional participants in the transport market. It will create a single transport and information space and cargo owners will be able to organize logistics in one «digital window». The use of a digital service will reduce the share of the transport component in the final cost of shippers' products, and logistics operators will have a new channel for promoting transport services. We have defined the experience of creating modern digital services, the architecture of the transport marketplace and the requirements for its functionality.

A graphic-analytical model has been developed for the independent organization of logistics by shippers in the transport marketplace and

using the «digital forwarder» service.

We have considered the algorithm of interaction between contractors – professional logistics operators and shippers in the planning of cargo transportation in the transport marketplace applying blockchain technology – SMART contracts. A calculation method has been proposed to determine the economic effects of a railway carrier in the successful implementation of a transport marketplace.

Keywords: transport and logistics services, transport marketplace, professional participant in the transport market, digital service, logistics.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-42-52

Целевым результатом функционирования цифровой транспортной экономики должно стать повышение координации и взаимодействия различных видов транспорта с использованием цифровых технологий и платформенных решений [1]. Развиваются различные логистические агрегаторы (электронные сервисы): биржа грузовых автомобильных грузоперевозок Ati.su, электронная торговая площадка «Грузовые перевозки», личный кабинет клиента участника внешней экономической деятельности и многое другое [2–4].

Большинство грузоотправителей хорошо знает о логистических электронных площадках, пользуясь ими для отслеживания следования груза [5]. Преимущества электронных площадок заключаются в сокращении объемов документации и времени взаимодействия между собственниками груза и логистическими операторами. Грузоотправители будут пользоваться цифровыми сервисами, если это снизит транспортные

расходы и не усложнит взаимоотношения с перевозчиками.

Развитие экономики увеличивает спрос на транспортировку грузов, в первую очередь это связано с увеличением объемов производства и появлением новых хозяйствующих субъектов – предприятий малого и среднего бизнеса (МСП), которые предпочитают при необходимости построения логистики обращаться к 3PL-оператору. Однако по состоянию на 2023 г. доля логистических операторов на рынке транспортных услуг, готовых предложить комплексную транспортную услугу, составляет примерно 11 % [6].

Укрупненная модель планирования транспортировки груза хозяйствующим субъектом, который относится к сегменту МСП, представлена на рис. 1.

Грузоотправитель может либо обратиться к профессиональному 3PL-оператору, либо организовать транспортировку самостоятельно.

В случае передачи логистики на аутсорсинг собственник груза должен

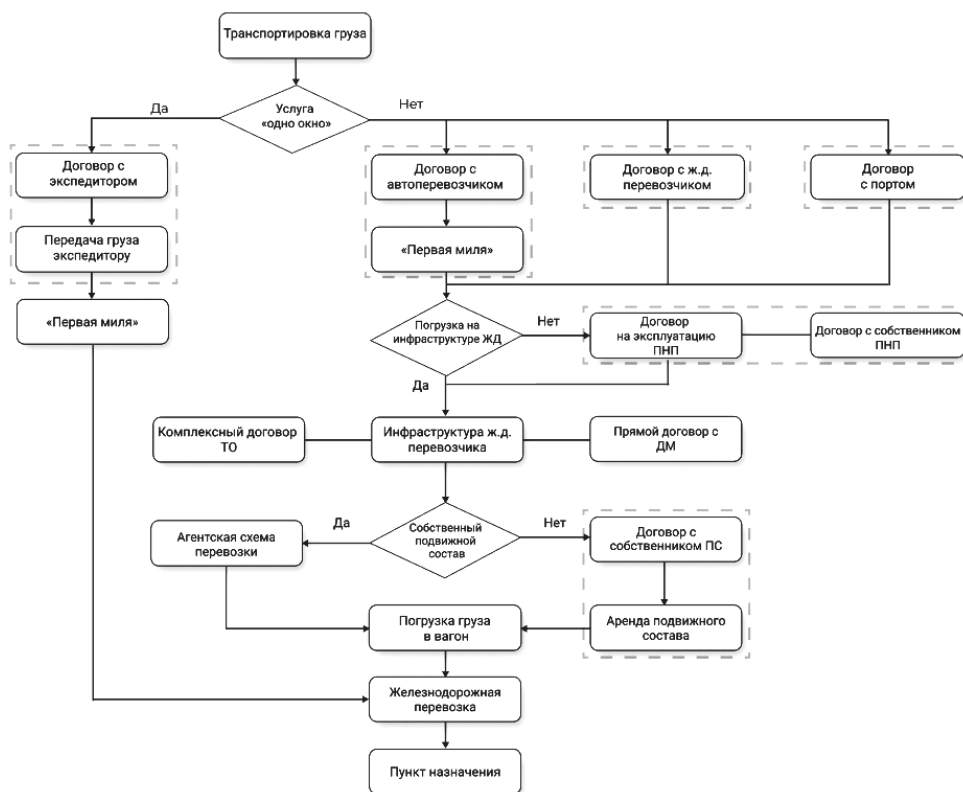


Рис. 1. Схема вариантов организации транспортировки груза; пунктиром выделены информационные поля соответствующих процессов; ПНП – пути не-общего пользования; ДМ – дирекция терминально-складского комплекса; ТО – транспортное обслуживание; ПС – подвижной состав

заключить договор с 3PL-оператором и передать груз по описи. Такое решение должно полностью устраивать представителей МСП, так как они делегируют все вопросы организации транспортировки грузов. Проблема здесь – стоимость услуг 3PL-операторов: в среднем она достигает 30 % от стоимости всей транспортировки, что сильно увеличивает транспортные издержки в конечной стоимости продукции, следовательно, снижает её конкурентоспособность.

Когда собственник груза самостоятельно взаимодействует со всеми участниками транспортного рынка, необходи-

мыми для конкретной перевозки, то он вынужден заключать договор с каждым логистическим оператором, а также погружаться в разные информационные среды*, которые окружают транспортных контрагентов. Далее идёт процесс организации транспортировки. Груз передается автомобильному перевозчику для закрытия «первой мили». Определяется место погрузки товара на железнодорожный транспорт, подбирается подвижной состав (грузоотправитель делает либо самостоятельно, либо делегирует вопрос железнодорожному перевозчику).

* Под информационной средой в данном аспекте понимается набор особенностей, которые могут заключаться в условиях заключения договоров, вопросах организации расчетов, разрозненных информационных сред и другое. Можно выделить несколько информационных сред: железнодорожные перевозки, рынок автоперевозок, рынок экспедиторских услуг, рынок подвижного железнодорожного состава и собственников путей необщего пользования.

С финансовой стороны вопроса такой поход выгодней для грузоотправителя, однако затруднения, возникающие при организации перевозки, очевидны.

Проблема хозяйствующих субъектов при организации логистических процессов заключается в сложном устройстве рынка транспортных услуг России и высокой транспортной составляющей в конечной стоимости продукции. Сложности существуют и у перевозчиков. Для железнодорожного транспорта – конкуренция автотранспорта и сокращение перевозок на расстояния до полутора тысяч километров, а перевозки на более дальние расстояния по-прежнему труднодоступны для МСП, чьи грузы чаще всего относятся к высокодоходным, обострение проблем с инфраструктурой, вызванных переориентацией грузопотоков на восток.

У автоперевозчиков, помимо межвидовой, очень сильна внутренняя конкуренция; 8–9 % всех транспортировок приходится на десять крупнейших перевозчиков, что осложняет консолидацию автоперевозчиков. Другими словами, автоперевозчики находятся в постоянной конкурентной борьбе и поиске новых каналов продаж.

Результаты исследований по развитию комплекса транспортно-логистических услуг, уровня сервиса и повышению доходов от неперевозочных видов деятельности железнодорожного перевозчика представлены в [7–9].

Решение рассматриваемой проблемы заключается в создании транспортного маркетплейса.

Предлагается использовать современный опыт электронной торговли и создать веб-сервис на базе железнодорожного перевозчика, который позволит организовать сеть бизнес-контактов из профессиональных участников транспортного рынка с возможностью оперирования всей логистической

деятельностью в режиме одного «цифрового окна» [10].

Предполагается, что в транспортном маркетплейсе будут представлены транспортно-логистические услуги всех участников транспортного рынка: железнодорожные и автомобильные перевозки, складирование и перегрузка, услуги экспедиторов и таможенного брокера и т.д. А хозяйствующие субъекты смогут размещать объявление о покупке/продаже грузов, организовывая комплексную транспортную услугу в режиме одного «цифрового окна» (рис. 2).

В рамках сервиса грузоотправители смогут обратиться за комплексной транспортной услугой «от двери до двери» в формате «цифровой экспедитор» или же подбирать контрагентов из каждого контура логистических операторов.

Функционирование данной логистической системы направлено на развитие транспортного рынка России и дополнительную коммерциализацию холдинга ОАО «РЖД» с помощью продвижения диверсифицированных продуктов компании.

Из-за множества потенциальных участников транспортного маркетплейса, отличающихся друг от друга не только по роду предоставляемых услуг, но и набором собственных информационных систем, предлагается при разработке цифрового сервиса использовать микросервисную архитектуру.

Микросервисы представляют собой такой способ разработки и компоновки программных систем, при котором они формируются из небольших независимых компонентов, взаимодействующих друг с другом через сеть. Такая методика полностью противоположна традиционному «монолитному» способу разработки программного обеспечения, где создается одна большая программа, обычно написанная на C++ или на Java [11]*.

* В отличие от монолитных систем, микросервисная архитектура намного удобней в обслуживании благодаря своей модульности. Кроме того, микросервисы не зависят от системы и поэтому не обязательно должны быть написаны на одном и том же языке программирования. Это дает возможность опробовать новые технологии и повышает гибкость в разработке. Развертывание обновлений происходит быстрее, проще и менее подвержено ошибкам, поскольку необходимо обновлять только затронутую микрослужбу [12].

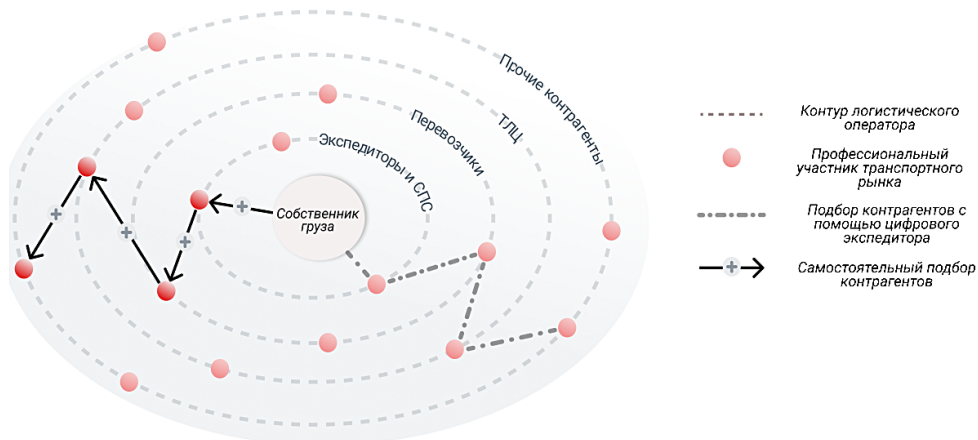


Рис. 2. Графическая модель транспортного маркетплейса*

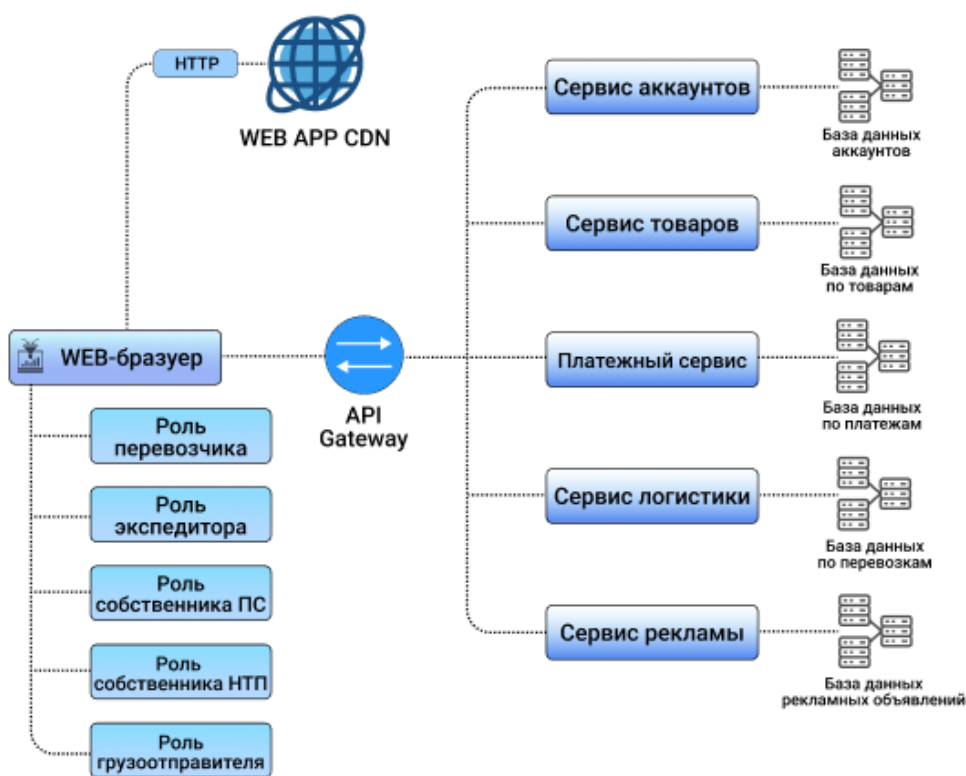


Рис. 3. Микросервисная архитектура на примере транспортного маркетплейса

* На рис. 2 разграничены информационные среды разных логистических операторов. Собственник груза находится в одной информационной среде со всеми участниками ТС рынка и с унифицированными процессами. Отмечены этапы подбора ТС контрагентов при планировании перевозки (в одной среде) и альтернатива в виде «цифрового экспедитора», которая в этой же среде подбирает контрагентов без участия собственника груза. Собственно, по-нашему мнению, это и является одним из преимуществ для собственника груза.

Например, Keycloak (обширная библиотека с открытым исходным кодом) позволяет разработчикам интегрировать настраиваемый интерфейс безопасности для централизованного и унифицированного управления пользователями [11] (рис. 3).

Сервисы взаимодействуют на сетевом уровне, который позволяет сотрудничать контейнерным микросервисам. Каждый из этих контейнеров имеет собственную «экосистему», которая предоставляет микросервису интерфейсы для сети, хранилища и управления. Такой подход при необходимости упрощает интеграцию собственных информационных систем участников с транспортным маркетплейсом и создаст гибкие настройки под каждый вид логистической деятельности.

Поскольку в качестве архитектуры транспортного маркетплейса предлагается использовать микросервисную, то логично применить блокчейн-технологии – SMART-контракты.

SMART-контракт – это алгоритм, написанный на языке программирования, который поддерживается платформой блокчейна. Этот код содержит набор инструкций, функций и переменных, определяющих, какие действия выполняются при выполнении заданных условий [13].

Процесс заключения SMART-контрактов состоит из нескольких этапов.

1. Идентификация сторон. В случае транспортного маркетплейса можно использовать электронные подписи.

2. Определение условий. Согласование цены, сроков оказания услуг, права и обязанности.

3. Подписание контракта. Это может быть создание и отправка транзакций, содержащих данные контракта и подписи сторон.

Рассматриваемую технологию можно использовать на транспортном маркетплейсе для организации заключения договоров, распределения денежных средств за оказанные услуги. Сервис будет представлять классическое

web-приложение, состоящее из клиентской и серверной частей.

Предполагается, что в транспортном маркетплейсе будут доступны следующие функциональные возможности.

1. Возможность текстового взаимодействия между потребителем и продавцом услуги прямо в транспортном маркетплейсе.

2. Рейтинговая система оценки участников на основании обратной связи о качестве предоставления услуги и товара.

3. Наличие рекомендательной системы на основе рейтинга логистического оператора, подбора аналогичного товара или платной услуги.

4. Сбор и анализ данных о точках зарождения грузопотоков на основании заключенных в сервисе сделок.

5. Интеграция с информационными системами логистических операторов для отслеживания груза в пути следования.

6. Возможность делегировать логистику, воспользовавшись услугой «цифровой экспедитор».

7. Наличие кода товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД) в каждом объявлении для упрощения расчетов транспортных тарифов.

8. Единый лицевой счет для организации расчетов между всеми участниками транспортного маркетплейса.

9. Все транзакции на транспортном маркетплейсе будут организованы по технологии SMART-контрактов.

Рассмотрим, как будет организована работа по планированию логистической деятельности в рамках цифрового сервиса – транспортного маркетплейса.

На этапе оформления сделки между двумя хозяйствующими субъектами на передачу прав собственности на товары сервис предлагает грузоправителю услугу «цифровой экспедитор», которая предполагает комплексную транспортно-логистическую услугу «от двери до двери» с уже подобранными контрагентами из числа профессиональных логистических операторов,

зарегистрированных в транспортном маркетплейсе (рис. 4).

В случае выбора услуги «цифровой экспедитор» собственник груза полностью делегирует вопрос организации перевозки. Стоимость такого решения составляет 2-3 % от стоимости всей перевозки (в отличие от существующих 30 %).

В случае самостоятельной организации логистики грузоотправителем (отказ от услуги «цифровой экспедитор») грузоотправитель задает параметры перевозки, а именно: какие логистические операторы ему необходимы, например, автоперевозчики, собственники подвижного состава, владельцы путей необщего пользования и т.д. На основании заданных параметров транспортный маркетплейс формирует заявки и направляет их в микросервисы каждого контрагента.

После рассмотрения заявок логистические операторы направляют коммерческие предложения об оказании

услуг потенциальному заказчику. Выбрав оптимальные или устраивающие предложения, собственник груза дает согласие на оказание услуг. Цифровой сервис снимает предусмотренную договором сумму с лицевого счета заказчика и распределяет её между контрагентами, а электронные финансовые документы поступают в личный кабинет заказчика.

Поскольку в основе исследования предполагается, что основным заказчиком по созданию транспортного маркетплейса с интеграцией собственных цифровых платформ будет выступать железнодорожный перевозчик, логично рассмотреть потенциальные эффекты от реализации.

Создание единого цифрового логистического «окна» сильно скажется на усилении бренда компании, а минимизация издержек грузоотправителей многократно повысит лояльность клиентов железнодорожного перевоз-

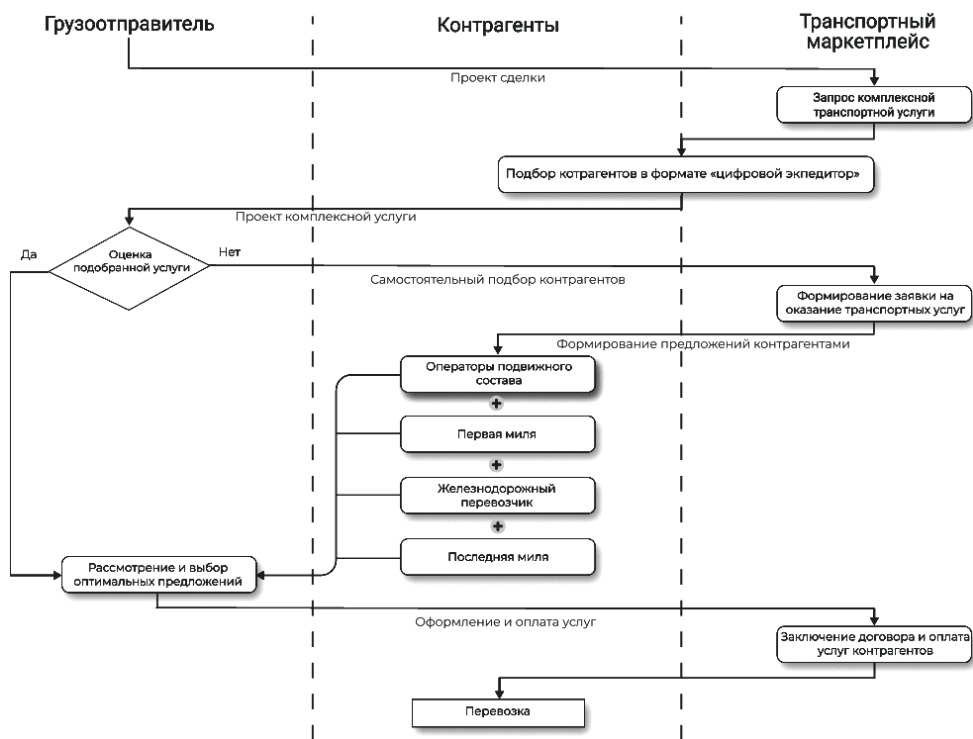


Рис. 4. Модель бизнес-процессов транспортного маркетплейса

чика, однако основной эффект заключается в дополнительных доходах компании.

Рассмотрим подробнее каждый вид дополнительного дохода: от увеличения объёмов перевозок ($Income_N$), агентского вознаграждения ($Income_{ac}$), от услуги «цифровой экспедитор» ($Income_{kl}$), оказания дополнительных услуг ($Income_{NI}$) и размещения рекламных баннеров ($Income_{an}$).

Предполагается, что упрощение планирования логистики, заключения договоров на оказание транспортных услуг и снижение издержек повысит привлекательность железнодорожных перевозок и привлечет новых грузоотправителей, особенно из числа МСП, чьи грузы относятся к высокодоходной тарифной категории.

Доход от увеличения объёмов перевозок $Income_N$:

$$Income_N = N \cdot LV \cdot IR_{cp}, \quad (1)$$

где N – количество новых грузоотправителей после реализации транспортного маркетинга; LV – среднее количество отправляемых вагонов одного грузоотправителя; IR_{cp} – средняя стоимость железнодорожной перевозки одного вагона.

Регистрация и размещение объявления об услугах на транспортном маркетинге для логистических операторов бесплатны. Плата за пользование будет отчисляться в пользу железнодорожного перевозчика в виде агентского вознаграждения за логистическую услугу, оказанную в рамках транспортного маркетинга.

Доход от агентского вознаграждения $Income_{ac}$:

$$Income_{an} = V_p \cdot k \cdot AC, \quad (2)$$

где V_p – объём рынка транспортно-логистических услуг России; k – доля логистических операторов подключившихся к маркетингу; AC – агентское вознаграждение (от 1 до 3 %).

Доход от услуги по полному делегированию процесса организации логистической деятельности, где исполнителями являются железнодорожный перевозчик и его дочерние зависимые общества, получает железнодорожный перевозчик как лицо, выступающее экспедитором.

Доход от услуги «цифровой экспедитор» $Income_{kl}$:

$$Income_{kl} = N \cdot Kl \cdot C \cdot V_u, \quad (3)$$

где k_1 – доля грузоотправителей, заинтересованных в услуге «цифровой экспедитор»; C – доля от общего объёма транспортных услуг (2–5 %); V_u – объём услуг, подобранных через маркетинг.

В процессе транспортировки груза оказываются и дополнительные услуги, например, погрузка/выгрузка, вывоз подвижного состава на пути общего пользования, услуги, связанные с прибытием грузов под таможенным контролем и другое. С увеличением числа грузоотправителей возрастает и потребность в этих услугах.

Доход от оказания дополнительных логистических услуг $Income_{NI}$:

$$Income_{NI} = NI \cdot \frac{V_1 - V_0}{V_0}, \quad (4)$$

где NI – доход от оказания текущего объёма дополнительных услуг; V_0 – объём перевозок до реализации транспортного маркетинга; V_1 – объём перевозок после реализации.

Доходы, связанные с дополнительной коммерциализацией транспортного маркетинга. Поскольку в функциональных возможностях сервиса заложена рекомендательная система, логично предложить пользователям маркетинга возможность размещения рекламных баннеров в поисковых запросах (за дополнительную плату).

Доход от размещения рекламных баннеров на транспортном маркетинге $Income_{kl}$:

$$\text{Income}_{k_1} = N \cdot b \cdot Sb, \quad (5)$$

где KI – количество размещенных рекламных баннеров; b – доля участников, воспользовавшихся услугой рекламных баннеров; Sb – стоимость размещения одного баннера.

Итоговый доход (FI) от реализации транспортного маркетплейса на базе железнодорожного перевозчика рассчитывается как сумма доходов от увеличения объёмов перевозок и прочих услуг:

$$FI = \text{Income}_{N_1} + \text{Income}_{k_1} + \text{Income}_{k_1} + \text{Income}_{ac} + \text{Income}_N. \quad (6)$$

Доходы от увеличения объёмов перевозок Income_N будут иметь наибольшую долю в структуре дополнительных доходов из-за высокой стоимости тарифов на перевозку железнодорожным транспортом. Однако наибольший интерес представляют доходы от остальных видов услуг, во-первых, из-за невысокой рентабельности железнодорожных перевозок, то есть прибыль от увеличенного объёма перевозок будет приблизительно равна общей прибыли от остальных транспортно-логистических услуг, во-вторых, реализация услуг на транспортном маркетплейсе позволит диверсифицировать доходы компании, не зависящие от объёмов перевозок железнодорожным транспортом.

Выводы

В работе рассмотрены варианты организации логистической деятельности

хозяйствующими субъектами, относящимися к предприятиям малого и среднего бизнеса. Определены особенности и издержки каждого варианта, выделены проблемы перевозчиков.

В качестве решения предложен новый формат функционирования транспортного рынка – транспортный маркетплейс, построенный по принципам электронной торговли. Данное решение позволит упростить организацию логистики для представителей МСП, снизить транспортную составляющую в конечной стоимости продукции собственников грузов за счёт «цифровой экспедитор». Для железнодорожного перевозчика транспортный маркетплейс позволит диверсифицировать направления компании и привлечь дополнительные доходы без существенного увеличения объёмов перевозок, а для профессиональных участников транспортного рынка создаст дополнительный канал продвижения транспортных услуг. В работе представлена графоаналитическая модель и рассмотрена архитектура предлагаемого цифрового сервиса.

Предложена модель бизнес-процессов, отражающая принципы взаимодействия между собственниками грузов и профессиональными логистическими операторами в рамках предоставления транспортных услуг в цифровом сервисе – транспортном маркетплейсе.

Рассмотрены потенциальные экономические эффекты для железнодорожного перевозчика в случае успешной реализации транспортного маркетплейса, предложены способы их оценки. ■

Литература

1. Правительство России. URL: <http://government.ru/docs/28653/> (дата обращения: 22.11.2023).
2. Электронная торговая площадка «Грузовые перевозки». URL: <https://etpgp.rzd.ru/#/landing> (дата обращения: 15.10.2023).
3. Ati.su. <https://ati.su/> (дата обращения: 15.10.2023).
4. ФТС Личный кабинет участника ВЭД. URL: <https://edata.customs.ru/FtsPersonalCabinetWeb2017/> (дата обращения: 15.10.2023).
5. Iris I. Lin, Hani S. Mahmassani, Patrick Jaillet, and C. Michael Walton Electronic Marketplaces for Transportation Services // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, January 2002, № 1790(1):1–9.

6. Хазимуллин А. Д. Анализ программ лояльности в сфере грузовых перевозок / Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – (29-30 ноября 2022 г.) Екатеринбург : УрГУПС, 2023. – С. 224–227.
7. Зубков В. В. Модель комплексной транспортной услуги как эффективный метод управления предприятиями / Тренды развития современного общества: управленческие, правовые, экономические и социальные аспекты : сб. науч. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. (18-19 сентября 2020 г.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. – С. 145–148.
8. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Анализ стратегий по привлечению клиентов транспортно-логистических услуг холдинга «РЖД» с учетом дифференциации клиентов // Вестник УрГУПС. 2023. № 1 (57). С. 64–72. ISSN 2079-0392.
9. Тимофеева Г. А., Хазимуллин А. Д. Вероятностное моделирование поведения грузоотправителей при оценке программ лояльности на железнодорожных перевозках // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 34–40. ISSN 1815-9400.
10. Тронин В. Г. Профессиональные социальные сети LinkedIn и академия Google // Вестник УлГТУ. 2015. № 3 (71) С. 34–36. ISSN 1684-7016.
11. Chris Richardson. Microservices patterns: with examples in Java // Manning Publications, New York, 2019. ISSN 9781617294549.
12. Ларин О. Н. Современный опыт применения блокчейн-технологий в транспортной логистике // Транспорт: наука, техника, управление. – 2019. – № 9. – С. 37–41. ISSN 0236-1914.
13. Keycloak. URL: <https://www.keycloak.org/> (дата обращения: 01.12.2023).

References

1. The Russian Government. URL: <http://government.ru/docs/28653/> URL: <http://government.ru/docs/28653/> (data accessed: 22.11.2023).
2. Electronic trading platform «Freight transportation». URL: <https://etpgp.rzd.ru/#landing> (data accessed: 15.10.2023)].
3. Ati.su. URL: [Ati.su. https://ati.su/](https://ati.su/) (data accessed: 15.10.2023).
4. FCS Personal account of a foreign trade participant. URL: <https://edata.customs.ru/FtsPersonalCabinetWeb2017/> (data accessed: 15.10.2023).
5. Iris I. Lin, Hani S. Mahmassani, Patrick Jaillet, and C. Michael Walton Electronic Marketplaces for Transportation Services // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, January 2002, № 1790(1):1–9.
6. Khazimullin A. D. Analysis of loyalty programs in the field of freight transportation [Analiz programm loyalti v sfere gruzovyh perevozok] / Col. art. International Scientific-practical conference (November 29-30, 2022). Ekatherinburg : USURT, 2023. – Pp. 224–227.
7. Zubkov V. V. The model of integrated transport services as an effective method of enterprise management [Model' kompleksnoj transportnoj uslugi kak ef-fektivnyj metod upravleniya predpriyatiyami] / Trends in the development of modern society: managerial, legal, economic and social aspects : collection of scientific articles of the 10th International Scientific and Practical Conference (September 18-19, 2020). – Kursk : South West State University, 2020. – Pp. 145–148.
8. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Analysis of strategies for attracting customers of transport and logistics services in the Russian Railways holding company, taking into account customer differentiation [Analiz strategij po privleche-niyu klientov transportno-logisticheskij uslug holdinga «RZHD» s uchetom differenciacii klientov // Gerald of USURT. 2023. № 1 (57). Pp. 64–72. ISSN 2079-0392.
9. Timofeeva G. A., Khazimullin A. D. Probabilistic modeling of shippers' behavior in evaluating loyalty programs in railway transportation [Veroyatnostnoe modelirovanie povedeniya gruzootpravitelej pri ocenke programm loyalti na zhelezno-dorozhnyh perevozkah] // Transport of the Urals. 2023. № 4 (79). Pp. 34–40. ISSN 1815-9400.
10. Tronin V.G. Professional social networks LinkedIn and Google Academy [Professional'nye social'nye seti LinkedIn i akademiya Google] // Gerald of UISTU. 2015. № 3 (71). Pp. 34–36. ISSN 1684-7016.
11. Chris Richardson. Microservices patterns: with examples in Java // Manning Publications, New York, 2019. ISSN 9781617294549.

12. Larin O.N. Modern experience of using blockchain technologies in transport logistics [Sovremennyj opyt primeneniya blokchejn-tekhnologij v transportnoj logistike] // Transport: science, technology, management. – 2019. – № 9. – Pp. 37–41. I ISSN 0236-1914.
13. Keycloak. URL: <https://www.keycloak.org/> (data accessed: 01.12.2023).

Статья сдана в редакцию 16 января 2024 года

Управление в технических системах

УДК 625.1

Н. Ф. Сирина, П. Е. Раевская

Выбор оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов

UDK 625.1

N. F. Sirina, P. E. Raevskaya

The choice of the best option of the connected trains formation and regulation

Аннотация

Рассматриваются вопросы эффективности использования соединенных поездов для повышения провозной и пропускной способности участков электрифицированных железных дорог.

Предлагается внедрить способ выбора оптимального варианта формирования и регулирования соединенных поездов при организации корреспонденций грузов, который обеспечивает получение большей суммарной прибыли при наименьших суммарных затратах. Для обеспечения надежности в перевозочном процессе в условиях постоянного

сокращения резерва пропускной способности на магистральных участках предлагается разработать форсированный график движения поездов (график движения поездов с включенными в него соединенными поездами, движущимися в прямом и обратном направлениях).

Разработан график движения поездов с включением в его ядро твердых ниток соединенных поездов и алгоритм организации их обращения. Оптимальный вариант формирования и регулирования соединенных поездов при организации корреспонденций грузов

выбирается для участка с имеющимися погодными и инфраструктурными ограничениями по критерию обеспечения получения большей суммарной прибыли при наименьших суммарных затратах участников перевозочного процесса.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, провозная и пропускная способность железнодорожных участков, соединенный поезд, форсированный график движения поездов, Восточный полигон, оптимизация финансовых издержек.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-53-61

Статья рекомендована к публикации В. В. Цыгановым, д-ром техн. наук, главным научным сотрудником Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН; Москва, Россия. E-mail: bbc@ipu.ru.

Нина Фридриховна Сирина, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе и связям с производством Уральского государственного университета путей сообщения. Екатеринбург, Россия. E-mail: NSirina@usurt.ru. ORCID 0000-0001-9691-5181.

Полина Евгеньевна Раевская, старший преподаватель кафедры «Управление процессами перевозок» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО «ИрГУПС». Чита, Россия. E-mail: polina.volo@mail.ru. ORCID 0009-0008-2952-1623.

© Н. Ф. Сирина, П. Е. Раевская, 2024

the article is recommended for publication by V. V. Tsyganov, Doctor of Technology, sciences, chief researcher at the Institute of Management Problems. V. A. Trapeznikov RAS; Moscow, Russia. E-mail: bbc@ipu.ru.

Nina Fridrihovna Sirina, DSc in technical science, professor, vice-rector in academic affairs and relations with manufacture of the Ural State University of Railway Transport. Ekaterinburg, Russia. E-mail: NSirina@usurt.ru. ORCID 0000-0001-9691-5181.

Polina Evgenievna Raevskaya, senior teacher of chair of «Management of Transportation Process» of Zabaikalsky Institute of Railway Transport – branch of FSBEI «IrGUPS». Chita, Russia. E-mail: polina.volo@mail.ru. ORCID 0009-0008-2952-1623.

© N. F. Sirina, P. E. Raevskaya

Abstract

The issues of the efficiency of using connected trains to increase the carrying capacity of the electrified railway areas are considered.

The way of choosing the best option to form and regulate the connected trains when organizing cargo correspondence which provides the most total profit with less total expenses is introduced. It is suggested to develop a forced schedule of trains traffic (the schedule of trains traffic

with connected trains moving in forward and backward directions) in order to provide safety of the transportation process under conditions of the constant decrease of the railways carrying capacity reserve.

Trains traffic schedule is developed which includes, in its core, a solid thread of connected trains and the algorithm of the organization of their use. The best option of the formation and regulation of connected trains when

organizing cargo correspondence is chosen for an area with weather and infrastructure constraints on the criteria of receiving the most total profit under the least total expenses of the transportation process participants.

Key words: railway transport, railway areas carrying capacity, connected transit, forced schedule of trains traffic, Eastern polygon, financial costs optimization.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-53-61

Пропускная и провозная способность зависит от структуры и плотности потока поездов для конкретного участка. Она определяется длиной участка, количеством блок-участков, отдельных пунктов и примоотправочных путей на них, профилем пути, нормами длины и массы поездов, мощностью эксплуатируемых локомотивов и другими показателями. Учитывая, что на каждом участке сочетания значений этих факторов различны, устанавливается влияние вождения соединенных поездов (СП) на мощность линии отдельно для конкретного из них.

Пропуск соединенных поездов предусматривается в отдельное время года, когда возрастают объемы грузовых и пассажирских поездов, как необходимая мера при недостаточной пропускной способности (нет возможности предоставления «окон»), в качестве кратковременной меры для восстановления пропускной способности после предоставления «окон».

Фрагмент алгоритма организации обращения соединенных поездов показан на рис. 1 [1].

Этап первый. Проверка отношения наличной пропускной способности к потребной. При приближении наличной пропускной способности к потребной, т. е. сокращении резерва пропускной способности, необходимо принять меры

по ее увеличению. При этом необходимо учитывать длины блок-участков на перегонах и длину поездов.

Этап второй. Выбор скорости следования грузовых поездов при увеличении пропускной способности:

- если $V_{сл} > 60$ км/ч, то возможно отправление грузовых поездов в пакетах;
- если $V_{сл} < 60$ км/ч, то необходимо определить межпоездной интервал $I^{СТЭ}$ по системе тягового электроснабжения (СТЭ) с учетом режимных карт. При этом, если:

- $I^{СТЭ} > I$, то после расчета дополнительных потерь отправляется поезд;
- $I^{СТЭ} < I$, то определяется интенсивность подхода одиночных грузовых поездов.

Этап третий. Проверка возможности отправления поезда повышенной массы или длины с учетом силы тяги и силы сцепления.

Если сила сцепления больше, то отцепляются группы вагонов, и поезд отправляется в соответствии с нормой.

Если сила тяги меньше, то начинается проверка отправления поездов по системам централизации и блокировки и системам тягового электроснабжения с учетом длины поезда и длины блок-участков на перегоне следования. При длине поезда меньше длины блок-участка грузовой поезд отправляется по показаниям автоматической локомотивной сигнализации.

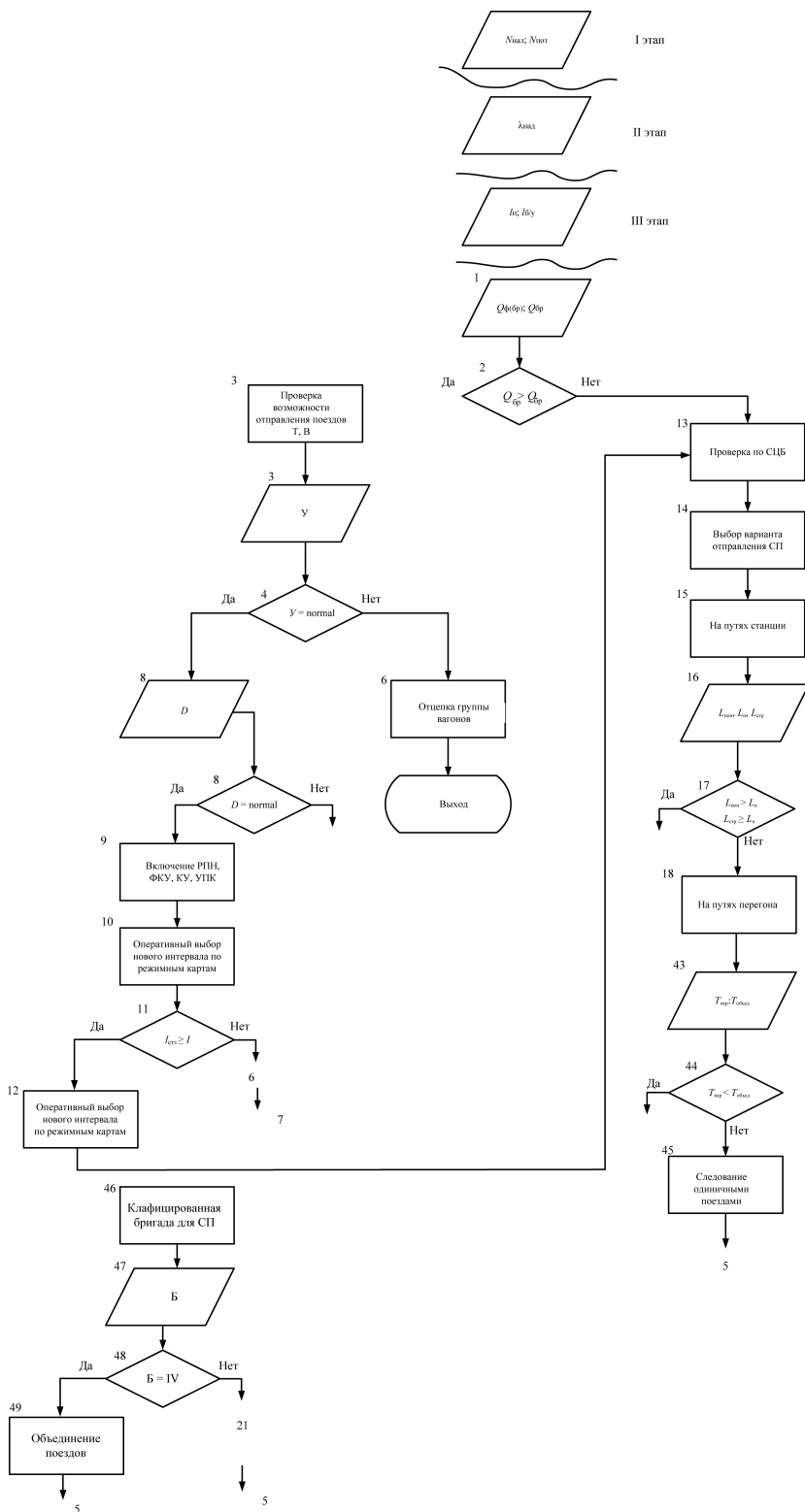


Рис. 1. Алгоритм организации обращения соединенных поездов (фрагмент)

Если же длина блок-участка больше, то необходимо определить массу формируемого поезда.

Этап четвертый. Проверка массы брутто формируемого поезда.

Если масса больше нормы, то тяжеловесные или поезда повышенной массы формируются с учетом возможных для этого климатических условий. Весь контроль берет на себя поездной диспетчер.

Когда масса поезда брутто не увеличивается, возникает необходимость отправления соединенных поездов (при выполнении некоторых условий проверки).

Этап пятый. Отправление соединенных или одиночных поездов.

Если длина приемоотправочный путей на станциях с учетом длины стрелочных горловин позволяет соединять поезда и если есть квалифицированная локомотивная бригада, то пропускная способность увеличивается за счет следования соединенных поездов. Когда условия не соблюдены, поезда отправляются одиночными.

Для регулярного применения СП система тягового электроснабжения должна обеспечивать устойчивую работу электроподвижного состава при принятых размерах движения и пропуске пакетов поездов с минимальным интервалом графика движения соединенных поездов, если не предусмотрены иные условия организации движения таких поездов на участке*. Персонал подстанций электроснабжающих участков, где эксплуатируются СП, может задействовать имеющиеся в резерве агрегаты или отрегулировать их характеристики для увеличения напряжения линии и располагаемой мощности.

Экономический эффект при уменьшении межпоездного интервала зависит от времени прохождения поездов по участку и нахождения на станции; сравнение двух вариантных графиков движения поездов, в которых

предусматривается «окно» в течение суток, оценивает влияние этого фактора. Основное отличие вариантных графиков состоит в межпоездных интервалах до и после усиления контактной сети на участке.

Наименьшие потери мощности линии от предоставления «окон» достигаются при двустороннем пакетном движении, когда предоставлено «окно» по незакрытому пути. При использовании схемы двух пакетов (второй – максимальный) пропускается больше поездов, чем при организации движения по схеме двух равных пакетов.

Составление графиков для разных размеров движения с перестановкой каждый раз «ниток» поездов и, как следствие, изменением графика оборота локомотивов и локомотивных бригад неэффективно, нарушается технология работы объектов инфраструктуры и других подразделений железнодорожного транспорта [3].

Для обеспечения надежности в перевозочном процессе в условиях постоянного сокращения резерва пропускной способности на участках предлагается разрабатывать форсированный график движения поездов – нормативный график движения поездов с включенными в него соединенными поездами, которые движутся в прямом и обратном направлениях исходя из определенных условий.

На рис. 2 представлен пример фрагмента форсированного графика движения поездов при организации пропуска СП на двухпутном участке для четного (прямого) и нечетного (обратного) направлений. Для формирования форсированного графика движения с 7 ч 40 мин со станции «Б» сформировано начало «ядра» соединенных поездов четного направления (нитка поезда № 9010). Далее с интервалом 20 мин сформированы нитки других соединенных поездов (№ 9012, № 9014, № 9016, № 9018 и т.д. до поезда № 9034). В 12 ч

* Влияние СТЭ на пропускную способность электрифицированных участков на основании анализа межподстанционных зон по минимальному межпоездному интервалу рассмотрено в работе [2].

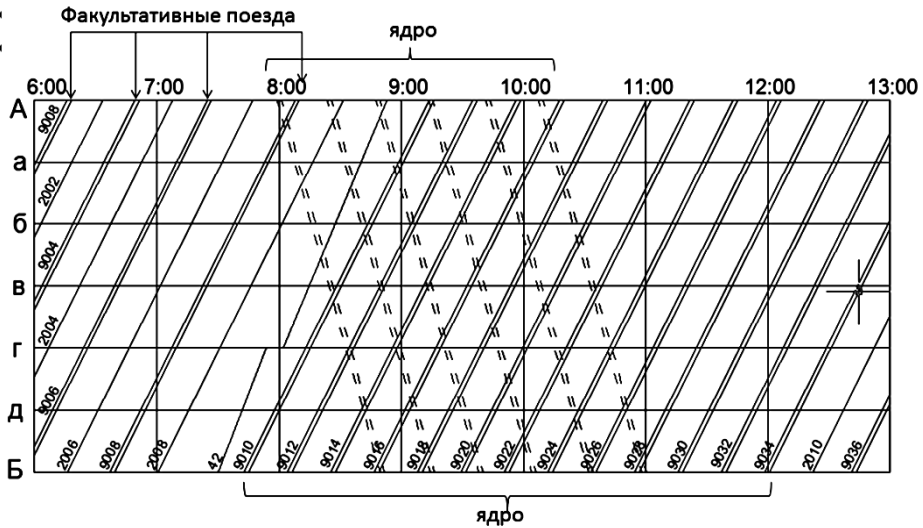


Рис. 2. Форсированный график движения поездов при организации пропуска СП на двухпутном участке для четного (прямого) и нечетного (обратного) направлений (фрагмент)

СП сформированы поездом № 9034. «Ядро» соединенных поездов для нечетного направления показано пунктиром.

Все эти 13 поездов четного направления и шесть поездов нечетного направления, обозначенных пунктиром, образуют «ядро» форсированного графика.

После формирования «ядра» составляется факультативное расписание в графике движения: специалисты закладывают в расписание СП, которые смогут проследовать рассматриваемый участок в определенные сутки месяца ожидаемого кратковременного увеличения поездопотока. Минимальное время, через которое могут проследовать один за другим СП в одном направлении, составляет 8–20 мин в зависимости от местных условий.

При необходимости дополнительного кратковременного повышения пропускной способности, возникающей вследствие непредвиденных обстоятельств (аварийно-восстановительные работы на железнодорожных путях, заторы в движении и т.п.), возможно формирование дополнительных СП до устранения указанных обстоятельств.

На рис. 3 представлен пример фрагмента форсированного ГДП при ремонтных работах на перегоне между станциями «Г» и «Д» в трехчасовой период с 14.00. Поезда № 9040, № 9046, № 9050 четного (второго) пути – дополнительные, включенные в состав форсированного графика.

Пунктирной линией указаны СП нечетного (первого) пути, составляющие начало «ядра».

В результате применения предлагаемых способа и организации движения поездов повышается провозная способность железнодорожных линий, при этом нет необходимости затрат на строительство дополнительных железнодорожных путей. Применение предлагаемого способа повышает срок доставки грузов, повышает оборачиваемость вагонов, повышает мощность линии на 35–40 %*.

В условиях уменьшения мощности линии снижаются скорости корреспонденций грузов и увеличиваются (нарушаются) сроки доставки грузов, а в некоторых случаях заявки от грузоотправителей на перевозку грузов

* Предложенная система прошла государственную регистрацию и не имеет в настоящее время аналогов, в том числе международных [4].

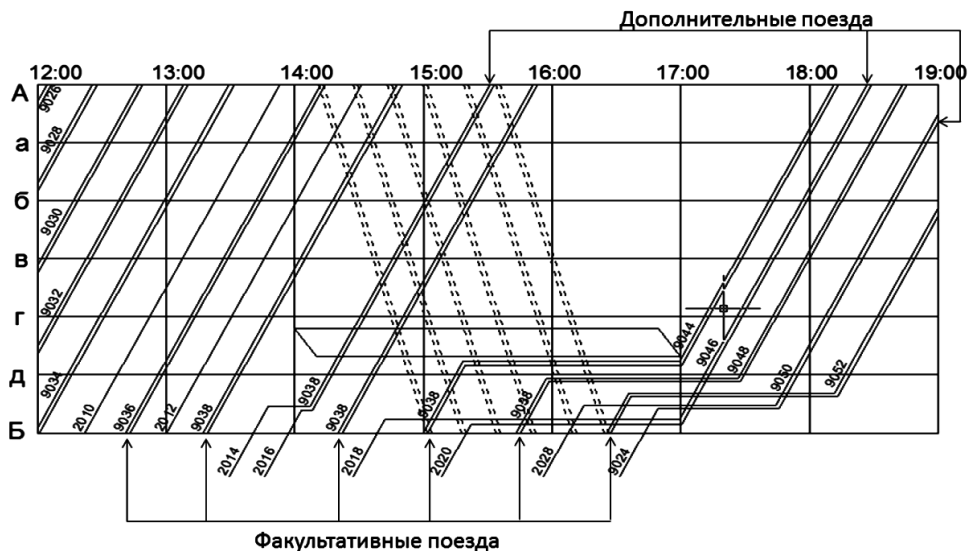


Рис. 3. Форсированный график движения поездов (фрагмент)

на направления Восточного полигона ОАО «РЖД» могут не приниматься/отклоняться. Грузоотправитель и грузополучатель терпят убытки от нарушений договорных обязательств перед потребителями их услуг (отсутствие гарантий на перевозку грузов, нарушение сроков доставки грузов), а ОАО «РЖД» получает финансовые издержки от штрафных санкций за нарушение сроков доставки грузов и недополучает прибыль из-за отклонения заявок на перевозку; из-за растущей грузонапряженности железнодорожных линий инфраструктура изнашивается интенсивней.

Одно из технологических решений ОАО «РЖД», минимизирующее потери, – отправление грузовых поездов по твердым «ниткам» графика [5]. Количество грузовых поездов по расписанию представлено на рис. 4.

В соответствии с нормативными документами, грузоотправитель заключает дополнительный договор на перевозку, гарантируя организацию следования грузового поезда по расписанию. Услуга оплачивается только при выполнении условий, количество таких перевозок растет ежегодно [6].

Такая мера была эффективна до глобального кризиса и санкционных воз-

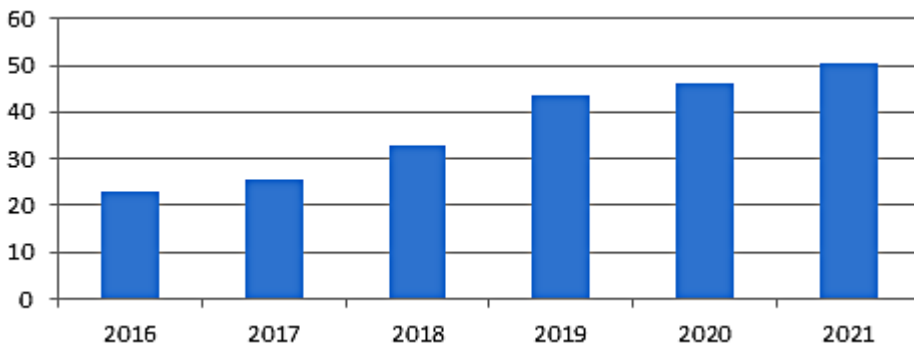


Рис. 4. Перевезенные грузовые поезда по расписанию, кол-во, тыс.

действий на наше государство, но при ее использовании искусственно занижается мощность железнодорожных линий.

Предлагается внедрить способ выбора оптимального варианта формирования и регулирования СП при организации корреспонденций грузов, который обеспечивает получение большей суммарной прибыли при наименьших суммарных затратах.

Применение такого способа позволит грузоотправителям и грузополучателям гарантировать перевозку грузов в направлениях Восточного полигона ОАО «РЖД», а также минимизировать финансовые издержки от потребителей услуг за нарушение сроков доставки. ОАО «РЖД» получает дополнительный источник финансирования развития транспортной инфраструктуры в направлении портов Дальневосточного федерального округа, минимизирует финансовые штрафы за нарушение сроков доставки грузов и долю недополучения прибыли от принятых заявок на перевозку грузов.

Способ выбора оптимального варианта формирования и регулирования СП в процессе организации корреспонденций грузов представляют планом формирования и пропуска соединенных поездов, который интегрируется в график движения поездов Восточного полигона ОАО «РЖД».

Анализ изменения грузооборота в течение года представлен на рис. 5, количество сформированных соединенных поездов на Восточном полигоне – на рис. 6.

Итак, в условиях роста грузооборота в границах Восточного полигона ОАО «РЖД» воздействие на увеличение пропускных и провозных способностей направления через призму рационального формирования СП находится за пределами областей (не в области!) стратегического планирования и стратегического регулирования перевозочным процессом.

СП для возможного повышения мощностей Восточного полигона формируются хаотично, без экономической оценки,

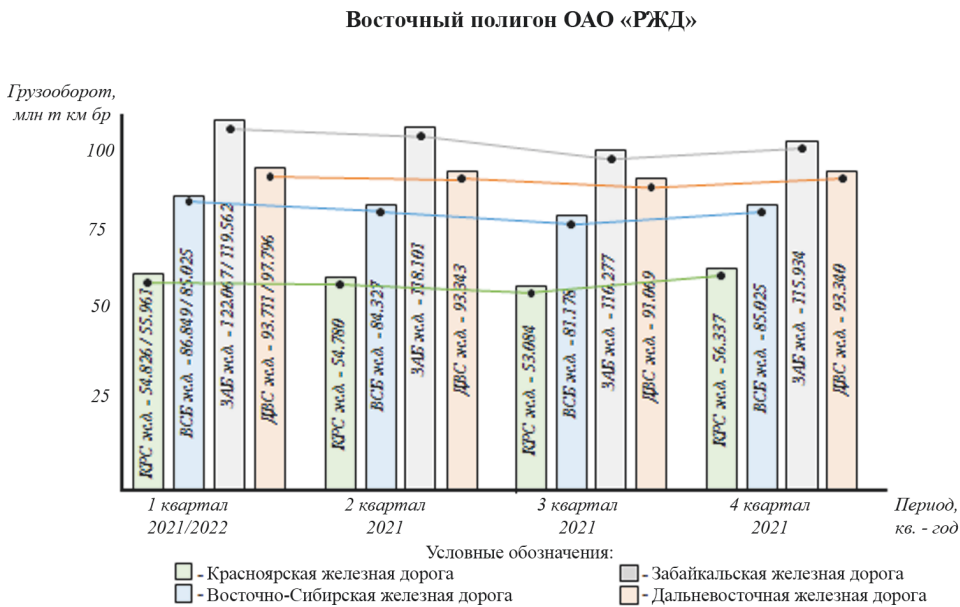


Рис. 5. Грузооборот на инфраструктуре Восточного полигона

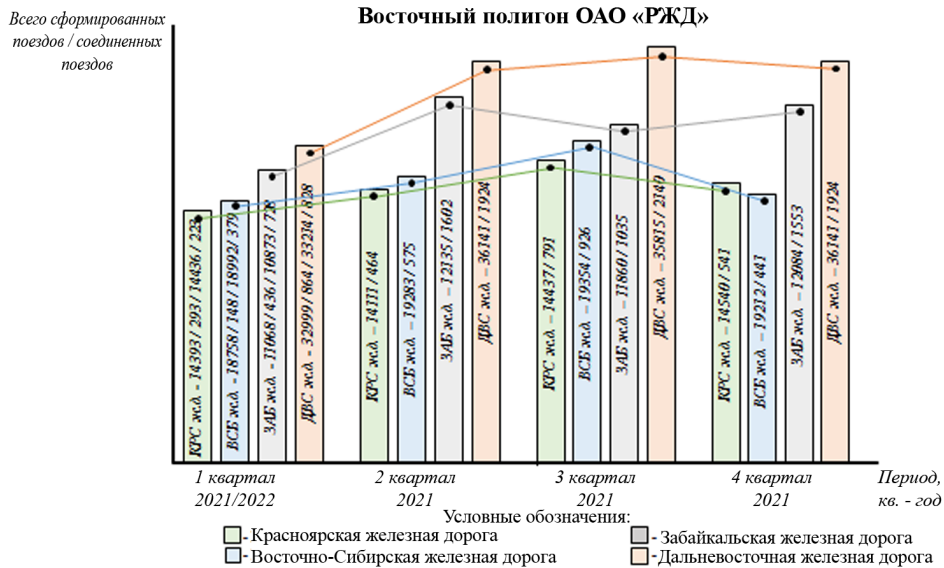


Рис. 6. Сформированные и СП на инфраструктуре Восточного полигона, кол-во

определяющей целесообразность их формирования для получения экономического эффекта (прибыли). Сравнение стратегического планирования процесса формирования СП и стратегического регулирования грузоперевозок представлено в таблице.

Для принятия оптимального решения по формированию СП необходимо сформировать план погрузки

и выгрузки на выбранный период, определить ресурсные возможности на всем протяжении полигона, лимитирующие участки в пропуске или формировании-расформировании соединенных поездов, определить и распределить способы и методы организации движения соединенных поездов, оценить экономическую целесообразность формирования СП.

Анализ стратегического планирования процесса формирования СП и стратегического регулирования грузоперевозок

Наименование	Определение	Результат
Стратегическое планирование формирования соединенных поездов	Принятие оптимального решения по качественному использованию всех видов ресурсов при организации транспортных услуг как по погрузке заявленных объемов грузов, так и в способе их корреспонденции – стратегическом плане корреспонденций на установленный период	План передислокации железнодорожного подвижного состава способом прокладки соединенных поездов, поэтому измерителем принимают возможный рейс порожних и груженых соединенных поездов (поездо-километры)
Стратегическое регулирование грузоперевозок	Оптимальная реализация перевозчиком стратегического плана корреспонденций подвижного состава на установленный период	Соблюдение срока доставки грузов, поэтому измерителем принимают возможные затраты ресурсов на технологические операции по формированию соединенных поездов, связанные с использованием подвижного состава

Решение этих задач позволяет разработать и утвердить план на предстоящий период формирования и регулирования СП.

Таким образом, оптимальный вариант формирования и регулирования

СП при организации корреспонденций грузов выбирается по критерию обеспечения получения большей суммарной прибыли при наименьших суммарных затратах. ■

Литература

1. Раевский Н. В., Раевская П. Е. Способы увеличения пропускной способности на железнодорожной линии // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы IX Международной научно-практической конференции, Иркутск 10–13 апреля 2018 г. – Иркутск : Иркутский государственный университет путей сообщения, 2018. – Т.1. С. 124–128. ISBN 978-5-9500771-9-7.
2. Раевская П. Е. (Волокитина). Влияние системы тягового электроснабжения на пропускную способность Забайкальской железной дороги // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. №2(42). С. 126–131. ISSN 0201-727X.
3. Чернюгов А. Д. Организация безостановочных обгонов на двухпутных линиях // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1964. № 6. С. 58–62.
4. Патент № 2734044 РФ. Система для определения пропускной способности участка железной дороги / Раевская П. Е., Сирина Н. Ф., Зубков В. В., Раевский Н. В., Зубков В. В. (УрГУПС) (RU); №2019137146 ; Заявл. 19.11.2019 ; Опубл. 12.10.2020.
5. ГОСТ Р 58855-2020. Услуги на железнодорожном транспорте. Качество услуг в области грузовых перевозок. Термины и определения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200173329> (дата обращения: 10.01.2024).
6. РЖД в цифрах. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377#cargo> (дата обращения: 10.01.2024).

References

1. Raevsky N. V., Raevskaya P. E. Methods to Increase Carrying Capacity of a Railway [Sposoby uvelicheniya propusknoy sposobnosti na zheleznodorozhnoy linii] // Siberian Transport Infrastructure : Materials of IX International Scientific and Practical Conference, Irkutsk April 10-13 2018. – Irkutsk : Irkutsk State Transport University, 2018 – V. 1. P. 124–128. ISBN 978-5-9500771-9-7.
2. Raevskaya P. E. (Volokitina). The Impact of the System of Traction Power Supply on the Trans-Baikal Railway Carrying Capacity [Vliyanie sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya na propusknyuyu sposobnost' Zabajkal'skoj zheleznoj dorogi] // Vestnik Rostov State Transport University. 2011. № 2 (42). P. 126–131. ISSN 0201-727X.
3. Chernugov A. D. Non-stop Overtakes Organization on Double-Track Lines [Organizaciya bezostanovochnykh obgonov na dvukhputnykh liniyakh] // Vestnik Railway Research Institute of JSC Russian Railways. 1964. № 6. P. 58–62.
4. Patent № 2734044 RF. System to Detect a Railway Area Carrying Capacity [Sistema dlya opredeleniya propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoj dorogi] / Raevskaya P. E., Sirina N. F., Zubkov V. V., Raevsky N. V. (USURT) (RU); №2019137146 ; Claim 19.11.2019 ; Published 12.10.2020.
5. GOST R 58855-2020. Railway Transport Service. Quality of Freight Transportations Service. Terms and Definitions. [Uslugi na zheleznodorozhnom transporte. Kachestvo uslug v oblasti gruzovykh perevozov. Terminy i opredeleniya]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200173329> (date of access: 10.01.2024).
6. RZD in Numbers. [RZHD v cifrakh]. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9377#cargo> (date of access: 10.01.2024).

Статья сдана в редакцию 7 февраля 2024 года

М. А. Шрайбер

Термические напряжения в изоляции тяговых электродвигателей локомотивов

М. А. Shreiber

Thermal stresses in insulation of locomotives traction electric motors

Аннотация

Возникновению температурного градиента способствуют термомеханические процессы и циклическое изменение температуры в структуре изоляции тяговых электрических машин. Повышенная температура расширяет элементы обмотки, повреждает материал изоляции (термическая усталость, чрезмерная деформация, ползучесть и прочее).

Разработана методика для численного исследования напряженно-деформированного состояния материала изоляции тяговых электрических машин тепловозов на различных этапах статического и циклического нагружения. Установлено, что основным фактором, определяющим интенсивность старения изоляции, является влияние знакопеременных циклических

термомеханических напряжений, а не термохимическое разрушение пропиточного состава.

Получены аналитические выражения для оценки напряженно-деформированного состояния изоляции ТЭД тепловозов, отличающиеся тем, что они требуют сравнительно небольшого объема исходных данных и позволяют выполнить прочностные расчеты с учетом особенностей системы электропривода.

Разработана приближенная прогнозирующая модель для оценки межфазных термических напряжений в сборке материалов паза обмотки тягового электродвигателя (ТЭД) тепловоза. Материал изоляции считается линейно эластичным при уровне деформации ниже предела текучести. Соединяемые компоненты можно рассматривать

с точки зрения структурно-анализа как удлиненные прямоугольные пластины, испытывающие линейные упругие деформации. Результаты анализа могут быть использованы для оценки термомеханических напряжений в пропиточных материалах тяговых электрических машин тепловозов и аналогичных им.

Ключевые слова: тепловоз, тяговый электродвигатель, изоляция, надежность, термические напряжения.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-62-68

Abstract

Thermomechanical processes and cyclic temperature changes in the structure of insulation of traction electric motors lead to thermal gradient appearance. Increased temperature widens the elements of winding, damages insulation material (thermal

Статья рекомендована к публикации И. С. Цихалевским, канд. техн. наук, доцентом; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ITsikhalevsky@usurt.ru.

Марина Александровна Шрайбер, канд. техн. наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения имени Александра I (ПГУПС); Санкт-Петербург, Россия. E-mail: goshapti4ka@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7590-0263.

© М. А. Шрайбер, 2024

The article is recommended for publication I. S. Tsikhalevsky, Candidate of Technology sciences, associate professor; Ural State University of Railways. E-mail: ITsikhalevsky@usurt.ru.

Marina Aleksandrovna Shreiber, PhD in technical science, associate professor of the chair «Locomotives and Locomotive Sector» Emperor Alexander 1 St. Petersburg State Transport University (PGUPS); St. Petersburg, Russia, E-mail: goshapti4ka@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7590-0263.

© M. A. Shreiber, 2024

fatigue, extreme deformation, creeping, etc.).

Methods for the numerical study of stress-strain state of the material of the insulation of traction electric motors of diesel locomotives on different stages of static and cyclic loading have been developed. It is determined, that the main factor defining the intensiveness of insulation aging is the impact of alternating cyclic thermomechanical stresses, but not thermomechanical destruction of impregnating composition.

Analytical expressions for the evaluation of stress-strain state of insulation of

traction motor diesel locomotives are received and they are distinguished by the fact that they require a relatively small amount of basic data and let conduct accurate calculations taking into account the peculiarities of the electric drive system.

An approximate predictive model for the evaluation of inter-phase thermal stresses in the assembly of the materials of winding slots of the traction electric motor of a diesel locomotive is developed. The insulation material is considered as linear elastic when the deformation level is less than the yield strength.

The joining components can be considered from the view point of structural analyses as elongated rectangular plates suffering from linear elastic strains. The analyses results can be used for evaluation of thermomechanical stresses in the impregnating materials of traction electric motors of diesel locomotives and their analogues.

Key words: diesel locomotive, traction electric motor, insulation, safety, thermal stresses.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-62-68

До недавнего времени считалось, что состояние изоляции обмоток ТЭД ухудшает термическое окисление изоляционных материалов. Однако и циклическое изменение нагрузки приводит к циклическим изменениям температуры в обмотках, что приводит к возникновению температурного градиента. Например, температура медного проводника будет более высокой или более низкой, чем у стального сердечника. Повышение температуры вызывает тепловое расширение элементов обмотки – чем длиннее обмотка, тем больше общее расширение проводников. Следовательно, тепловое расширение, вызывающее значительные деформации материала изоляции, будет наибольшим в осевом направлении [1–4].

Примеры таких повреждений, которые вносят основной вклад в ограничение срока службы и увеличивают количество отказов ТЭД тепловозов: пластичный разрыв, хрупкое разрушение, термическая усталость, ползучесть, чрезмерная деформация или смещение, релаксация напряжений (она может привести к чрезмерным смещениям), термический удар, коррозия под напряжением [5].

При температурных отклонениях межфазные напряжения концентри-

руются на периферийных участках обмотки. Пластические деформации возникают в пропиточном материале, если индуцированные деформации превышают предел текучести. Условия малоциклового усталости, когда обмотка подвергается температурному циклированию, делают такой пропиточный материал уязвимым и ответственным за усталостное повреждение изоляции.

Способность исследователя понимать источники термических напряжений и деформаций в изоляции ТЭД тепловозов очень важна на практике, равно как и способность прогнозировать и моделировать и, возможно, минимизировать при необходимости индуцированные температурные напряжения и смещения [6].

Рассмотрим приближенную аналитическую модель для оценки межфазных напряжений в компонентах обмотки (сталь, изоляция и проводник), разработанную для случая эластичного пропиточного состава [7]. Термическая нагрузка действует при нормальной эксплуатации многокомпонентных материалов (к которым можно отнести обмотки ТЭД), а также при их изготовлении, испытаниях или хранении [8].

Допущения в настоящем анализе

Соединяемые компоненты с точки зрения структурного анализа можно рассматривать как удлиненные прямоугольные пластины, испытывающие линейные упругие деформации.

Для оценки напряжений и перемещений можно использовать приближенные методы сопротивления материалов и физики материалов.

Пропиточный состав ведет себя линейно-упругим образом, когда индуцированная деформация сдвига ниже, чем деформация, соответствующая пределу текучести.

Межфазные касательные напряжения оцениваются на основе концепции межфазной податливости [6] без учета эффекта отслаивания.

Пусть удлиненная паяная сборка из двух материалов изготовлена при повышенной температуре, а затем охлаждена до низкой (комнатной) температуры (рис. 1).

При приближенном анализе продольные межфазные смещения $\delta_c(x)$ и $\delta_m(x)$ стыков можно искать в пределах упругой средней части в виде [7]

$$\begin{aligned} \delta_c(x) &= -\alpha_c \Delta T x + e_c \int_0^l F_c dx - k_c \tau_{не}(x), \\ \delta_i(x) &= -\alpha_i \Delta T x - e_i \int_0^l F_i dx + k_i \tau_{и}(x), \end{aligned} \tag{1}$$

где α_c и α_m – коэффициенты теплового расширения стального сердечника и медного проводника, $1/^\circ\text{C}$; ΔT – изменение температуры, $^\circ\text{C}$; l – длина активной части обмотки, м; e_c и e_m – продольные податливости стали и меди соответственно, которые определяются по выражениям:

$$e_c = \frac{1 - \nu_c}{E_c b_c}, \quad e_i = \frac{1 - \nu_i}{E_i b_i};$$

b_c и b_m – толщина слоя стали и меди, м/Па; E_c и E_m – модули упругости стали и меди, Па; ν_c и ν_m – коэффициенты Пуассона стали и меди; k_c и k_m – межфазные податливости стали и меди, которые определяется по выражениям:

$$k_c = \frac{b_c}{3\mu_c} = \frac{2b_c}{3E_c}(1 + \nu_c),$$

$$k_i = \frac{b_i}{3\mu_i} = \frac{2b_i}{3E_i}(1 + \nu_i);$$

μ_c и μ_m – модули сдвига стали и меди, Па; $\tau_{си}(x)$ и $\tau_{ми}(x)$ – межфазные сталь-изоляция и медь-изоляция касательные напряжения, Па.

Термомеханические силы, действующие в поперечных сечениях изоляции на границах слоев, определяются следующим образом [8].

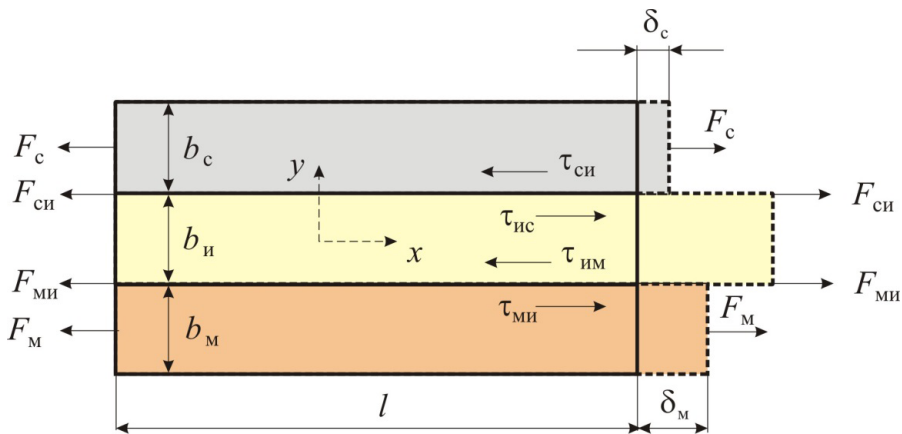


Рис. 1. Расчетная схема паза ТЭД

Сталь-изоляция:

$$F_{\text{н}\sigma}(x) = \int_{-l/2}^{l/2} \tau_{\text{н}\sigma}(x) dx - \left(\frac{l}{2} - x\right) \tau_{\text{н}\sigma}.$$

Медь-изоляция:

$$F_{i\sigma}(x) = \int_{-l/2}^{l/2} \tau_{i\sigma}(x) dx - \left(\frac{l}{2} - x\right) \tau_{i\sigma}.$$

Первые члены в правой части выражений (1) представляют собой неограниченные (без напряжений) перемещения. Вторые слагаемые определяют смещения из-за термомеханических сил, которые возникают в поперечных сечениях компонентов сборки из-за несоответствия термического сжатия разнородных материалов спаянных компонентов. Эти члены определяются на основе закона Гука, предполагающего, что все точки данного поперечного сечения имеют одинаковые продольные перемещения, т. е. сечения сборки остаются плоскими, несмотря на изменение напряженно-деформированного состояния. Третьи члены в правой части уравнений (1) объясняют ошибочность такого предположения и учитывают тот факт, что межфазные перемещения несколько больше, чем перемещения внутренних точек сечений. Структура этих дополнительных членов отражает предположение о том, что смещения, ответственные за нарушение плоскостности поперечного сечения детали, пропорциональны межфазному касательному напряжению, действующему в этом сечении. Предполагается также, что на эти дополнительные смещения не влияют напряжения и деформации в соседних сечениях.

Для оценки напряжений и перемещений коэффициенты межфазных податливостей стали и меди k_c и k_m между межфазными смещениями и межфазными касательными напряжениями оцениваются на основе теории решения упругости.

Условие совместности межфазных перемещений $\delta_c(x)$ и $\delta_m(x)$ можно записать, учитывая податливость материала изоляции k_n [7]:

$$\delta_c(x) = \delta_i(x) - k_n \tau_n(x), \quad (7)$$

где b_n – толщина слоя изоляции, м; μ_n – модуль сдвига материала изоляции, Па; E_n – модуль упругости материала изоляции, Па; μ_n – коэффициент Пуассона материала изоляции.

Податливость материала изоляции k_n :

$$k_n = \frac{b_n}{\mu_n} = \frac{2b_n}{E_n} (1 + \nu_n). \quad (8)$$

Подставляя формулы (1) в условие совместности (4), получаем следующее основное интегральное уравнение для функции касательных напряжений $\tau_n(x)$ в упругой средней части материала изоляции [7]:

$$k\tau(x) - e \int_0^l F(x) dx = \Delta \propto \Delta T x. \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha_m - \alpha_{cc}; \\ k &= k_c + k_n + k_m; \\ e &= e_c + e_m; \\ F(x) &= F_c(x) - F_m(x); \\ \tau(x) &= \tau_{cn}(x) + \tau_{mn}(x). \end{aligned}$$

Из (6) путем дифференцирования (по координате x) находим

$$k\tau'(x) - eF(x) = \Delta\alpha\Delta T. \quad (10)$$

Повторное дифференцирование (7) с учетом формул (2) и (3) дает

$$\tau''(x) - \alpha^2\tau(x) = 0, \quad (11)$$

где $a = \sqrt{\frac{e}{k}}$.

Решение уравнения (8) можно представить в форме [9]:

$$\tau(x) = a \frac{\Delta \propto \Delta T}{e} \frac{\sin hal / 2}{\cosh al / 2}. \quad (12)$$

Результаты вычислений

Данные моделирования касательных напряжений в среде SolidWorks

и результаты расчета согласно выражению (9) приведены на рис. 2. Они отражают хорошее согласование результатов, полученных с помощью моделей и аналитических расчетов. Максимальная погрешность не превышает 5,6 %. Используя выражение (9), можно быстро определить величину касательных напряжений в изоляции проводника.

Результаты расчетов показывают, что около 60 % изоляционного материала в середине паза фактически не подвергается термическому сдвиговому напряжению. В действительности результирующей тепловой нагрузке подвергается только участок изоляции примерно

60–80 мм с каждой наружной стороны обмотки. Для материала изоляции наиболее опасны изгибающие напряжения, возникающие в лобовой части обмотки, вызывающие их остаточные деформации и повреждения в местах, где проводники выходят из пазов.

Из выражения (9) следует, что максимальные касательные напряжения прямо пропорциональны разнице между коэффициентами теплового расширения для двух смежных слоев ($\Delta\alpha$) и изменению температуры (ΔT) (рис. 3).

Увеличение толщины слоя изоляции приведет к снижению касательных напряжений. Знаменатель, т. е. e содержит

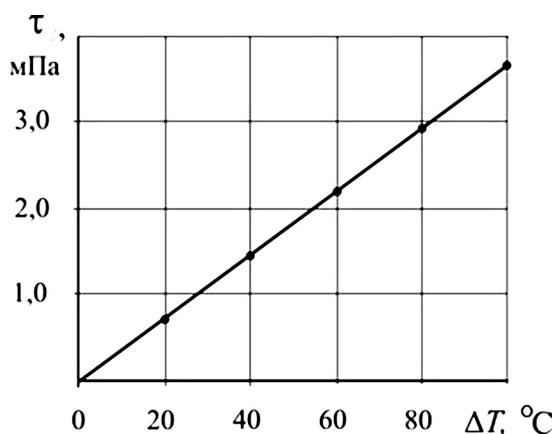


Рис. 3. Зависимость изменения максимального касательного напряжения в материале изоляции от температуры ΔT

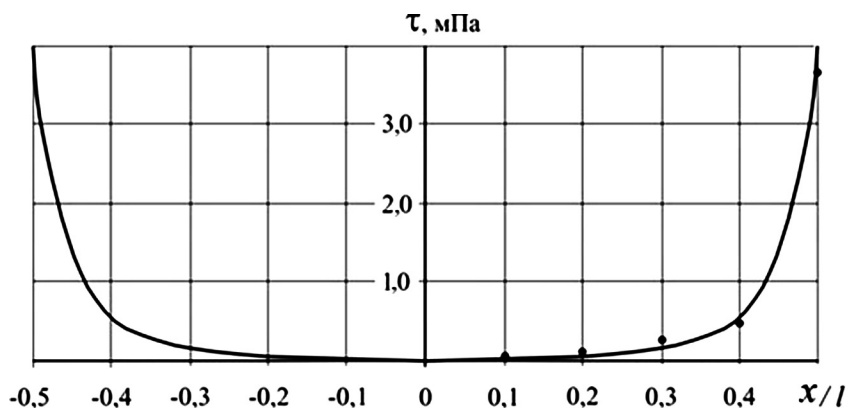


Рис. 2. Распределение касательных напряжений по длине паза
• – данные расчета; — – результаты моделирования в среде SolidWorks

модуль упругости внешних слоев и их толщину (см. рис. 1). Если увеличить толщину слоев, то максимальные касательные напряжения увеличатся. Тот же принцип применяется к модулю упругости, например, если увеличить модуль упругости внешних слоев, то максимальные касательные напряжения в изоляции увеличатся.

Выпускаемые в настоящее время тепловозы и электровозы с асинхронными ТЭД оснащаются тепловыми системами защиты оборудования. Так, для тяговых электродвигателей локомотива предусмотрена установка блока защиты, представляющая собой термодатчик, установленный в сердечник статора, с блоком управления, который при превышении допустимого значения температуры этого узла выводит сообщение на рабочий монитор машиниста поезда. В свою очередь, машинист может принять решение и изменить параметры работы электровоза и, в частности, электродвигателя.

Такая система контролирует значение температуры только одного элемента конструкции тягового двигателя (не всегда самого нагретого). То есть по получаемой информации не каждый раз можно корректно оценить тепловую нагрузку всей машины. Для получения же достоверной информации о тепловом состоянии всего объекта необходимо использование большего количества контрольных узлов, соответственно, нужна установка большего количества термодатчиков. Это

не всегда возможно из-за загромождения пространства внутри машины и усложнения системы защиты. Таким образом, исследования асинхронных тяговых электродвигателей как тепловых объектов и создание для них систем оптимального мониторинга теплового состояния становятся актуальными. Применение таких систем необходимо как при испытаниях, так и в период эксплуатации, чтобы не допустить предельного температурного состояния асинхронных ТЭД.

Выводы

Изоляция – один из сложных компонентов для оценки состояния ТЭД в целом. Большая ее часть скрыта, существует множество взаимодействующих факторов, влияющих на старение, а в длинной обмотке требуется одна небольшая проблемная зона, чтобы вывести из строя всю электрическую машину.

Система изоляции имеет характеристики, противоположные характеристикам проводника: она сопротивляется протеканию тока, когда на клеммы ТЭД подается напряжение. Чем лучше изоляция, тем лучше ее способность сохранять основные параметры с течением времени.

Прогнозное моделирование – это эффективный инструмент прогнозирования и предотвращения механических и функциональных отказов в материале изоляции ТЭД, подвергающихся термическим нагрузкам. ■

Литература

1. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции электрических машин подвижного состава : монография. – Омск, 2007. – 391 с. ISBN 5-94941-039-4.
2. Шрайбер М. А. Конечно-элементное моделирование тепловых процессов асинхронного тягового электродвигателя / Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы : М-лы первой Международн. научн.-техн. конф. (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). – Ташкент : Ташкентский государственный транспортный университет, 2022. – С. 203–208.
3. Грачев В. В. Модель теплового потока обмотки статора асинхронного тягового электродвигателя / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, И. Г. Киселев, Д. Н. Курилкин [и др.] // Электротехника. 2022. – № 2. – С. 36–39. ISSN 0013-5860.
4. Грищенко А. В. Термомеханические напряжения в изоляции тяговых электрических машин тепловозов / А. В. Грищенко, М. А. Шрайбер / В сб. : III Бетанкуровский международный инженерный форум. – СПб : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. 2021. – С. 107–109.

5. Кьонг Л. К. Об оценке трещиностойкости при межслойном разрушении слоистых композитов / Л. К. Кьонг, С. А. Лурье, А. А. Дудченко // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. – Т. 18. – № 1. – 2012. – С. 83–91.
6. Дудкин А. Н. Исследование внутренних механических напряжений в пропиточных и заливочных лаках / А. Н. Дудкин, В. С. Ким, С. С. Марьин // *Известия Томского политехнического университета*. 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 171–174. ISSN 1684-8519.
7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // *Journal of Applied Mechanics*. – 1986. – № 53 (3). – Pp. 657–660.
8. Suhir. E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // *Journal of Applied Mechanics*. – 1989. – № 56 (3). – Pp. 595–600.
9. Suhir E. Modeling of Thermal Stress in Microelectronic and Photonic Structures: Role. Attributes. Challenges. and Brief Review // *Journal of Electronic Packaging*. – 2003. – № 125 (2). – Pp. 261–267. ISSN 1043-7398.

References

1. Ismailov Sh. K. Increase of Insulation Life of Rolling-Stock Electric Motors : monograph. [Povyshenie resursa izolyacii ehlektricheskikh mashin podvizhnogo sostava : monografiya]. – Omsk, 2007. – 391 p. ISBN 5-94941-039-4.
2. Shreiber M. A. Finite Element Modelling of Thermal Processes of Induction Traction Electric Motor [Konechno-elementnoe modelirovanie teplovykh processov asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya] / Railway Rolling-Stock: problems, solutions, perspectives : Materials of First International Scientific-Technical Conference (Tashkent, April 20–23, 2022 r.). – Tashkent : Tashkent State Transport University, 2022. – P. 203–208.
3. Grachev V. V. Model of Thermal Flow of Stator Winding of Induction Traction Electric Motor [Model' teplovogo potoka obmotki statora asinkhronnogo tyagovogo ehlektrodvigatelya] / V. V. Grachev, A. V. Grischenko, I. G. Kiselev, D. N. Kurilkin [and al.] // *Electrotechnics*. 2022. – № 2. – P. 36–39. ISSN 0013-5860.
4. Grischenko A. V. Thermomechanical Stresses in Insulation of Traction Electric Motors of Diesel Locomotives [Termomekhanicheskie napryazheniya v izolyacii tyagovykh ehlektricheskikh mashin teplovozov] / A. V. Grischenko, M. A. Shreiber / Collection : III Betankur International Engineer Forum. – SPb : Emperor Alexander 1 St. Petersburg State Transport University. 2021. – P. 107–109.
5. Kyung L. K. On Evaluation of O6 Fracture Toughness under Interlayer Destruction of Layered Composites [Ob ocenke treshchinostojkosti pri mezhslajnom razrushenii sloistykh kompozitov] / L. K. Kyung, S. A. Lurye, A. A. Dudchenko // *Mechanics of Composite Materials and Constructions*. 2012. – Vol. 18. – № 1. – 2012. – P. 83–91.
6. Dudkin A. N. Research of Internal Mechanical Stresses in Impregnating and Filling Lacquers [Issledovanie vnutrennikh mekhanicheskikh napryazhenij v propitochnykh i zalivochnykh lakakh] / A. N. Dudkin, V. S. Kim, S. S. Maryin // *Izvestiya Tomsk Polytechnical University*. 2005. – Vol. 308. – № 7. – P. 171–174. ISSN 1684-8519.
7. Suhir E. Stresses in Bi-Metal Thermostats // *Journal of Applied Mechanics*. – 1986. – № 53 (3). – Pp. 657–660.
8. Suhir. E. Interfacial Stresses in Bimetal Thermostat // *Journal of Applied Mechanics*. – 1989. – № 56 (3). – Pp. 595–600.
9. Suhir E. Modeling of Thermal Stress in Microelectronic and Photonic Structures: Role. Attributes. Challenges. and Brief Review // *Journal of Electronic Packaging*. – 2003. – № 125 (2). – Pp. 261–267. ISSN 1043-7398.

Статья сдана в редакцию 23 ноября 2023 года

А. В. Смольянинов, Д. В. Дуванов, К. М. Колясов

Выбор и проверка метода схематизации случайного процесса нагружения пружин буксового подвешивания

A. V. Smolyaninov, D. V. Duvanov, K. M. Kolyasov

Selection and verification of the method of schematization in the random process of loading springs for axle box suspension

Аннотация

Контракт жизненного цикла изделия, который определяется его составными частями (комплектующими), должен содержать его стоимость на изготовление изделия, сдачу поставщику, последующее обслуживание, эксплуатацию и ремонт изделия вплоть до утилизации. Статья рассматривает разработку методики расчета жизненного цикла пружин буксового подвешивания (в дальнейшем и рамы) тележки электропоезда «Ласточка». Методика анализа базируется на

оценке прочности пружин и результатах прочностных испытаний, полученных при ходовых испытаниях, проведенных на отдельных действующих участках железных дорог, на результатах данных снятых блоков осциллограмм записи сил с моделей тележки электропоезда виртуальных ходовых испытаний, которое проведено на определенных созданных участках пути с учетом горизонтальных и вертикальных неровностей пути для разного состояния пути.

В работе дан анализ литературных источников по

методам схематизации результатов испытаний в виде осциллограмм записи сил случайных процессов; использован метод падающего дождя. Реализация в программном продукте методики анализа напряженно-деформированного состояния пружин буксового подвешивания и результатов ходовых испытаний, которые обработаны (подготовлены) методом «падающего дождя», позволяет определить реальный срок службы пружин буксового подвешивания.

Ключевые слова: ходовые испытания, циклические

Статья рекомендована к публикации В. Ф. Лапшиным, д-ром техн. наук, профессором; Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: VLapshin@usurt.ru @usurt.ru.

Александр Васильевич Смольянинов, д-р техн. наук, профессор, Уральский государственный университет путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: ASmolyaninov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-8775-0781.

Константин Михайлович Колясов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: KKolyasov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-1039-6144.

Даниил Вадимович Дуванов, инженер-конструктор, департамент конструкторских разработок и исследований ООО «Уральские локомотивы», аспирант кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, Россия. E-mail: mr.duvanov@bk.ru. ORCID 0000-0002-9800-1305.

© А. В. Смольянинов, К. М. Колясов, Д. В. Дуванов, 2024

The article has been recommended for publication by V. F. Lapshin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural State University of Railway Transport. E-mail: VLapshin@usurt.ru @usurt.ru.

Alexander Vasilyevich Smolyaninov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: ASmolyaninov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-8775-0781.

Konstantin Mikhailovich Kolyasov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department «Wagons» Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: KKolyasov@usurt.ru. ORCID 0000-0003-1039-6144.

Daniil Vadimovich Duvanov, design engineer, Department of Design Development and Research, Ural Locomotives LLC, post-graduate student Department «Wagons» Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: mr.duvanov@bk.ru. ORCID 0000-0002-9800-1305.

© A. V. Smolyaninov, K. M. Kolyasov, D. V. Duvanov, 2024

нагрузки, осциллограмма (история нагружения), методы схематизации, подсчет дождевого потока.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-69-79

Abstract

The product life cycle contract also contains its cost for the preparation of the product, delivery to the supplier, subsequent maintenance, operation and repair of the product up to disposal. The article considers the development of a methodology for calculating the life cycle of axle box suspension springs (and later frames) of the Lastochka electric train

trolley. The method of analysis is based on the assessment of the spring strength and the results of strength tests obtained during sea trials. These tests have been carried out on separate operating sections of railways, based on the results of data from the removed blocks of oscillograms recording forces from models of electric train bogies of virtual sea trials. Virtual sea trials have been conducted on certain created sections of the track, taking into account the horizontal and vertical irregularities of the track for different track conditions.

The paper analyzes the tutorials on the methods

for schematization of test results in the form of oscillograms recording the forces of random processes; the method of falling rain is used. The implementation in the software product of the methodology for analyzing the stress-strain state of box suspension springs and the results of sea trials, which have been proceed by the falling rain method, allows us to determine the actual service life of box suspension springs.

Keywords: sea trials, cyclic loads, oscillogram (loading history), schematization methods, rain current calculation.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-69-79

Нагрузки, действующие на ходовые части электропоезда ЭС2Г «Ласточка», и вызванные ими напряжения носят случайный характер, так как они определяются разной степенью загрузки вагона, скоростью движения и движением по кривым и прямым участкам пути, состоянием верхнего строения пути (рельсы, шпалы, рельсовые скрепление, балласт), состоянием ходовых частей вагона и т.д.

По результатам ходовых динамико-прочностных испытаний в порожнем и груженом состояниях на действующих линиях железнодорожного пути с различными скоростями движения получены осциллограммы зависимости вертикальных и горизонтальных (продольных и поперечных) сил в рессорных комплектах первой ступени подвешивания.

Осциллограммы представляют собой график случайного процесса изменения сил в пружинах в зависимости от времени. Для получения достаточной информации об уровне циклической нагруженности пружин, необходимой для расчета на долговечность путем замены реального процесса набором простых асимметричных циклов, необходимо обработать первоначальную

информацию, представленную осциллограммами.

Под «простым» циклом здесь понимается цикл нагружения, повреждение от которого может быть оценено по результатам стандартных испытаний на малоцикловую усталость, а степень накопленного повреждения за эксплуатационный цикл определяется на основе гипотез суммирования повреждений.

При таком подходе случайный, сложный и трудноуправляемый динамический процесс превращается в простой управляемый процесс. В общем случае простой асимметричный цикл напряжений характеризуется амплитудой, средним напряжением и коэффициентом асимметрии напряжений [1].

Существует много практически не отличающихся понятий «схематизация процесса». Например, ГОСТ 25.101–83 устанавливает, что «схематизация процесса – это совокупность правил, с помощью которых реальный процесс нагружения заменяется схематизированным процессом, эквивалентным исходному по величине усталостного повреждения» [2, 3].

Основные методы схематизации сложного эксплуатационного цикла системой простых циклов: метод

максимумов, метод пересечений, метод полных циклов (метод постепенного исключения промежуточных циклов), метод полных циклов с учетом среднего, метод полусумм-полуразностей (метод размахов с учетом среднего), метод укрупненных размахов, метод «дождя» [2, 4–6].

Методы выделения полных циклов учитывают как основные, так и наложенные циклы и позволяют выделить циклы с наибольшим повреждающим воздействием.

Методы схематизации устанавливаются правила выделения цикла или полуцикла регулярного нагружения из исследуемого процесса нагружения. Полуцикл нагружения – это часть цикла регулярного нагружения, которая соответствует половине периода изменения нагрузки [2]. Схематизированная реализация случайного процесса нагружения (схематизированный процесс) представляет собой совокупность выделенных по одному из методов схематизации циклов или полуциклов нагружения.

Результаты схематизации используются для расчетной оценки усталостной долговечности элементов по критериям накопления усталостных повреждений на стадиях до появления макроскопической усталостной трещины и ее развития, проводя сравнительную оценку процессов нагружения однотипных элементов, чтобы выявить самые нагруженные элементы, количественную оценку эксплуатационных режимов машин и конструкций по их повреждающему воздействию, моделирование нагружения элементов при испытаниях на усталость и расчетном определении характеристик их сопротивления усталости.

Применение каждого метода регламентировано действующим ГОСТом в зависимости от коэффициента нерегулярности случайного процесса нагружения [4]. Методы полных циклов и «падающего дождя» признаны универсальными – они позволяют дать расчетные оценки долговечности, более сопоставимые с экспериментальными данными.

Методы «падающего дождя» и полных циклов дают практически одинаковые результаты, лучше всего выделяя «простые» циклы. Но для их применения необходимо знать всю историю нагружения.

Однако нужно модернизировать старые или разрабатывать новые методы для получения процессов, эквивалентных по повреждающему воздействию исходным процессам и отвечающих следующим требованиям: нужно разделять основную и наложенную составляющие случайного процесса нагружения, в качестве повреждающих учитывать только полуциклы нагружения [4].

В соответствии с теорией огибающих, должна быть обеспечена возможность схематизации как в режиме реального времени, так и в пакетном режиме. Массивы, описывающие схематизированный процесс, должны иметь минимальные объемы [4]. Предложены два метода схематизации для выделения составляющих процесса нагружения, учитывающие временной характер действующих нагрузок.

Основные методы схематизации сложных эксплуатационных циклов не позволяют оценить эквивалентную циклическую наработку в эксплуатации в реальном времени, что важно для анализа работы элементов авиационного газотурбинного двигателя [5].

Различные методы схематизации могут давать отличающиеся результаты в случае оценки суммарного накопленного повреждения по критерию исчерпания усталости при случайном нагружении [5, 6]. В работе [5] выполнен анализ существующих методов схематизации и предложен свой, в котором из последовательности экстремумов «max – min – max» при знании «глобального минимума» – (0) выделяются основной простой цикл нагружения и дополнительный от минимума до наименьшего из двух максимумов. Разработанному методу схематизации, в отличие от метода «дождя», не нужна информация обо всем эксплуатационном цикле, он позволяет выделять простые циклы, то

есть реализация метода проходит в реальном времени. Разработанный алгоритм реализован в среде MS Excel [5, 6].

Накопленная повреждаемость в момент разрушения зависит от того, с какого уровня начинается нагружение циклическим напряжением: с S_1 до S_2 или с S_2 до S_1 , при этом разброс значений накопленной повреждаемости в момент разрушения может находиться в диапазоне 0,25–4,0 [7]. Поэтому предложен метод определения полетной циклограммы без использования гипотезы линейного суммирования повреждений. Разработан модифицированный метод полных циклов, сохранивший типовой алгоритм обработки с отличием в том, что при проведении промежуточных операций (логические и арифметические) не теряется информация. В этом случае информация трансформируется и записывается в специальной таблице, что позволяет сохранить взаимно-однозначное соответствие между информацией, содержащейся в характеристиках циклов, и информацией в исходной полетной реализации [7].

Схематизация процесса нагружения по методу полных циклов предложена в работе [8]. На первом этапе вычисляется коэффициент нерегулярности процесса как отношение числа пересечений уровня средней нагрузки к числу экстремумов этого же процесса, задаются ширина класса и его нижняя граница. Затем из дальнейшего рассмотрения исключаются циклы, размах которых меньше заданного интервала. Затем последовательно исключаются циклы, размах которых меньше двух, трех и так далее раз. На каждом этапе запоминается количество удаленных циклов, их максимум и минимум, а также амплитуда и среднее значение. На третьем этапе каждый максимум и минимум сравниваются со своими соседями слева и справа. Если экстремумы больше соседей, то они остаются, в противном случае точка удаляется при условии, что размах меньше заданного. По этой процедуре разработана блок-схема [8].

Методика, синтезирующая удачные положения современных отечественных и зарубежных методов расчета на усталость элементов авиационных конструкций, позволяющая значительно упростить и повысить точность расчетов, предложена в [10, 11]. Под рейтингом усталости понимается максимальное напряжение от нулевого цикла, при котором усталостная долговечность рассматриваемого элемента конструкции равна 10^5 циклов [11].

Методическим основам определения коэффициента запаса сопротивления усталости при испытаниях подвижного состава посвящена работа [12]. Усталостная долговечность рассчитывается из назначенного гамма-процентного ресурса, а это приводит к тому, что наработка до предельного состояния значительно выше установленных нормативных значений. Этот фактор убедительно доказан в [13]. Тем самым подчеркивается актуальность применения более совершенных методов расчета и обоснования сроков службы изделий железнодорожного транспорта.

Предложены основы методики расчетно-экспериментальной оценки сопротивления усталости конструкций подвижного состава. Для отдельных типов вагонов используемые методики оценки долговечности подвижного состава и его узлов можно усовершенствовать, если, кроме общепринятых методик испытаний, при учете реальных условий эксплуатации рассматривать повреждения, накопленные при порожнем пробеге и погрузке-выгрузке, усталостную прочность изделия проверять не только по правилу Пальмгрена – Майнера, но и по другим различным гипотезам, что позволит снизить риск ошибки при определении сроков службы изучаемого объекта. Более того, предлагается для каждого типа подвижного состава использовать «свою» гипотезу, которая бы гарантировала минимальное значение риска ее применения [12]; из-за неточностей тензометрирования в результате рассеивания значения модуля упругости [13, 14] предлагается при

испытании деталей на усталость контроль осуществлять по силам; физико-механические свойства локальных объемов материала не одинаковы, следовательно, атрибуты, получаемые на их основе, случайны, и характеристики сопротивления усталости конструкции тоже будут иметь рассеивание.

Практическое применение метода «падающего дождя» при расчете критериев долговечности несущих конструкций и оценке циклической долговечности тяжело нагруженной детали приведено в работах [15, 16].

Процессы нагружения систематизируют применительно к блоку нагружения, который соответствует совокупности последовательных значений переменных нагрузок, возникающих в элементе конструкции за какой-либо характерный период эксплуатации. Длительность записи или длина реализации процесса нагружения, соответствующая блоку нагружения, должна содержать не менее тысячи экстремумов процесса. Можно схематизировать короткие процессы (менее тысячи экстремумов), в этом случае рекомендуется оценивать погрешность, вносимую использованием недостаточно представительных по числу экстремумов реализаций [2].

В условиях автоматизированной обработки информации о нагруженности практическое преимущество по сравнению со всеми известными методами схематизации имеет метод «дождя» [17, 18, 20]. Он учитывает как основные, так и наложенные циклы и позволяет выделить циклы с наибольшим повреждающим воздействием.

Подсчет «дождевого потока» состоит из двух этапов: схематизация процесса нагружения (определение количества циклов усталости в истории нагрузки) и статистическая обработка информации.

Первый алгоритм циклов дождевого потока нагружения пружин буксового подвешивания реализуется на так называемом четырехточечном методе подсчета очков (метод *rainflow*) [17–19]. Второй – это выделение полных циклов из истории нагружения методом подсчета циклов дождевого потока [19, 20].

Фрагмент осциллограммы колебаний пружин буксового подвешивания груженого вагона электропоезда «Ласточка» на прямом участке пути в режиме тяги приведен на рис. 1. Аналогичные осциллограммы могут быть получены в результате моделирования электропоезда в программном комплексе «Универсальный механизм» на стадии

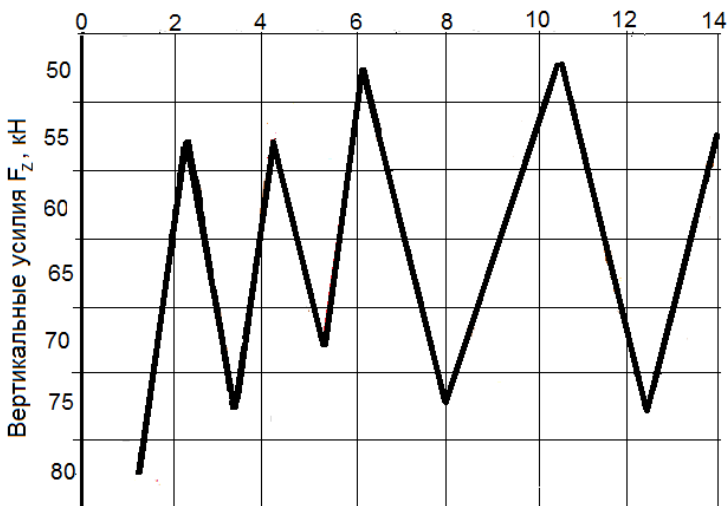


Рис. 1. Фрагмент осциллограммы процесса нагружения пружин, 14 с (история нагружения)

проектирования новых объектов и узлов поезда. В таком случае можно спрогнозировать значения сроков службы разрабатываемых элементов.

Такой осциллограмма стала в результате предварительной подготовки, включающей удаление очень маленьких циклов из истории загрузки. Любой цикл, имеющий амплитуду меньше установленной величины, удаляется. В осциллограмме сохранены только точки, имеющие разворот.

Произведена дискретизация точек поворота по фиксированным диапазонам амплитуд путем их центрирования в соответствующих ячейках. На рис. 2 показаны семь дискретных элементов, используемых для разделения диапазона амплитуд, составляющего 5 кН [18, 19].

После всех процедур приступаем к подсчету (выделению) циклов для расчета усталостной долговечности пружин. При этом нужно определить и сохранить количество циклов, их амплитуду и среднее значение цикла.

Первый алгоритм – четырехбалльный метод подсчета циклов.

Для истории нагружения (см. рис. 1) выполним следующие шаги. Выберем четыре последовательных точки усилия F_1 , F_2 , F_3 и F_4 (рис. 2, а). Диапазон между внутренними точками $F_2(55)$ и $F_3(75)$ меньше диапазона между внешними $F_1(80)$ и $F_4(55)$. Внутренне усилие имеет диапазон 20 кН, а внешнее – 25 кН. В этом случае идентифицируется полный цикл с параметрами от 55 до 75. Цикл сохраняется в матрице «дождевого потока» (рис. 2, а), представляющей собой данные размером $n \times n$, где n – число интервалов с соответствующими значениями усилий (F_z). Каждый элемент матрицы содержит число циклов, найденных в истории нагружения, соответствующих амплитудам «от» и «до».

Две внутренние точки усилия F_2 и F_3 удаляются из истории нагружения по времени и рассматриваются следующие первые четыре точки в оставшейся временной истории (рис. 2, б): $F_1(80)$,

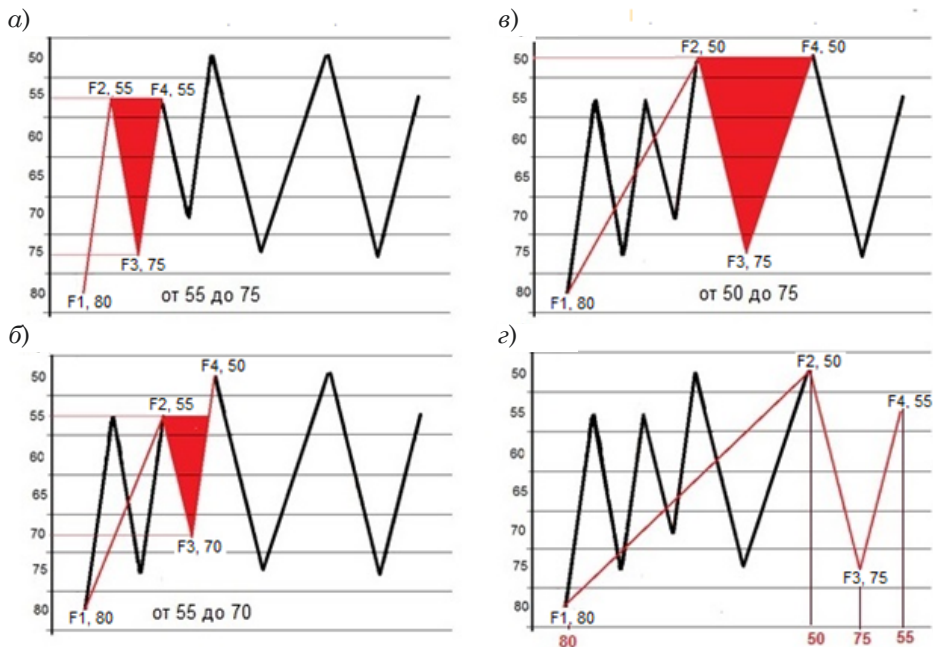


Рис. 2. Идентификация циклов в рассматриваемой истории нагружения
 а – первый шаг выделения цикла; б – второй шаг выделения цикла;
 в – третий шаг выделения цикла; г – четвертый шаг выделения цикла

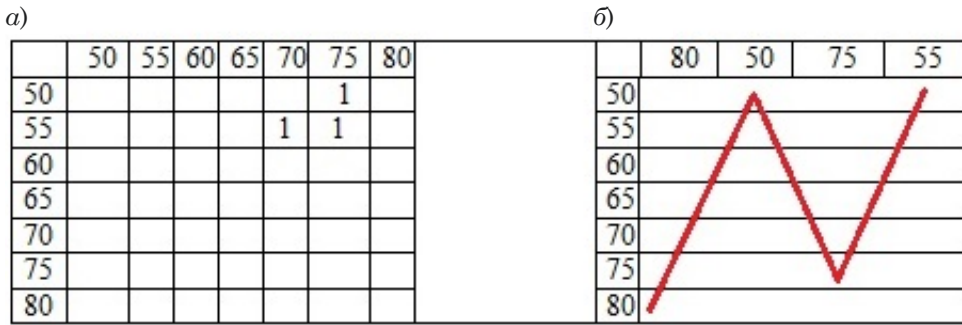


Рис. 3. Матрица «дождевого потока» и «остаток»

а – количество выделенных циклов; б – итоговая осциллограмма выделения циклов

F2(55), F3(70) и F4(50). Диапазон между второй F2(55) и третьей F3(70) точками составляет 15 кН, а между первой F1(80) и четвертой F4(50) – 30 кН, т.е. данные точек F2(55) и F3(70) находятся в пределах данных крайних точек F1(80) и F4(50). В таком случае цикл подсчитывается, как показано на рис. 2, б. Идентифицированный цикл от 55 до 70 сохраняется в матрице «дождевого потока» (рис. 3, а). Процесс продолжается до тех пор, пока все идентифицированные циклы не будут удалены и отсчитаны из истории времени (рис. 1). На рис. 2, в показан цикл, идентифицированный аналогично предыдущему (рис. 2, б), на рис. 2, г – незавершенный цикл, «остаток» матрицы «дождевого потока». Он содержит самые большие незамкнутые циклы, присутствующие в истории нагружения, и сохраняется для последующего формирования матрицы «дождевого потока» (рис. 3, б).

Матрица «дождевого потока» и «остаток» – это итог подсчета «дождевого потока» данного алгоритма.

Рассмотрим процесс выделения полных циклов из истории нагружения (см. рис. 1) методом подсчета циклов «дождевого потока» [19]. На рис. 4 показана история нагружения, представленная на рис. 1, повернутая на 90° по часовой стрелке. «Дождевой поток» начинается в каждой последующей точке экстремума. Черным показана история загрузки, цветными – циклы «дождя» истории.

Поток, начавшийся в точке А, падает с точки Н, в которой происходит самый большой разворот А-Н (первый разворот, полуцикл). Второй по величине разворот F-I начинается в точке F и заканчивается в точке I (второй полуцикл).

В первом развороте: разворот В-С, дождь начинает течь в точке В и заканчивается в точке С, поскольку максимум F больше В; разворот С-В(D), «дождь» начинает течь в точке С и встречается

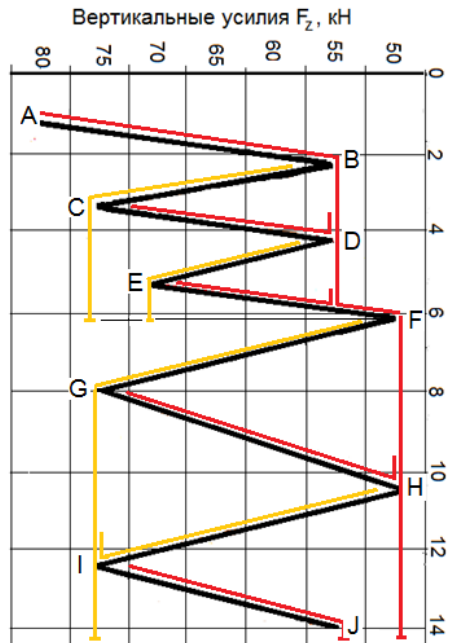


Рис. 4. Иллюстрация метода подсчета «дождевых потоков»

Развороты, кол-во	Начало	Конец	Значение, кН		Диапазон, кН	Среднее, кН	Циклы*
			от	до			
1	А	Н	80	50	30	65	0,5
1	В	С	55	75	20	65	0,5
1	С	В	75	55	20	65	0,5
1	Д	Е	55	70	15	62,5	0,5
1	Е	Д	70	55	15	62,5	0,5
1	Ф	І	50	75	25	62,5	0,5
1	Г	Ф	75	50	25	62,5	0,5
1	Н	Г	50	75	25	62,5	0,5
1	І	Ж	75	55	20	65	0,5

* Циклов в диапазоне: 15 кН – 1, 20 кН – 1,5, 25 кН – 1,5, 30 кН – 0,5.

с предыдущим потоком в точке В; разворот Д-Е, «дождь» начинает течь в точке Д и заканчивается в точке Е, поскольку максимум F больше D; разворот Е-Д(Ф) «дождь» начинает течь в точке Е и встречается с предыдущим потоком в точке Д; разворот Г-Ф(Н), «дождь» начинает течь в точке Г и встречается с предыдущим потоком в точке Ф; разворот Н-Г(І), «дождь» начинает течь в точке Н и встречается с предыдущим потоком в точке Г(І); разворот І-Ж, «дождь» начинает течь в точке І и заканчивается в точке Ж.

Результаты подсчета разворотов на основе метода подсчета «дождевого потока» приведены таблице.

Данные таблицы используются для формирования матрицы «дождевого потока», которая включает амплитуду

цикла, его среднее значение и количество циклов.

Для одной истории нагружения (осциллограмма) по двум алгоритмам выделены полные циклы: в первом случае три полных цикла и очень большой остаток, во втором случае – 4,5 цикла. Видимо, следует предположить, что большой остаток составляет 1,5 цикла (см. рис. 3, б).

Рассмотренные методы «падающего дождя» и полных циклов подсчета циклов нагружения имеют незначительные различия в результатах, что, в свою очередь, в дальнейшем являются основополагающими методами для подсчета циклов нагружения и определения срока службы пружин буксового подвешивания других узлов тележки электропоезда «Ласточка». ■

Литература

1. Смольянинов А. В., Колясов К. М., Дуванов Д. В. Статическая и динамическая нагрузка пружин буксового подвешивания тележки электропоезда ЭС2Г // Транспорт Урала. 2022. № 4 (75). С. 28–32. ISSN 1815-9400.
2. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – М. : Изд-во стандартов. 1983. 21 с.
3. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения. – М. : Изд-во стандартов. 1978. 50 с.
4. Почтенный Е. К., Капуста П. П. Анализ методов схематизации случайного нагружения // Современные методы проектирования машин. Т. 1 Перспективные направления создания машин. – Минск, 2004. – С. 130–138.
5. Федорченко Д. Г., Новиков Д. К. Методы схематизации эксплуатационного цикла изменения напряжений системой элементарных циклов // Известия Самарского

- научного центра Российской академии наук. – Самара : 2013. Том. 15, № 6. – С. 267–271. ISSN 2413-9645.
6. Цейтлин В. И., Федорченко Д. Г. Оценка долговечности деталей при совместном действии повторно статического и вибрационного нагружения // Проблемы прочности. – 1980. – № 1. – С. 14–17.
 7. Вронский Г. В. Модифицированный метод полных циклов и схематизация многомерных процессов нагружения // Ученые записки ЦАГИ. – 2004. Том 35. – № 1–2. – С. 97–109. ISSN 0321-3439.
 8. Осипов Д. Н., Сердобольская М. Л., Шапкин В. С. Схематизация процесса эксплуатационного нагружения «обшивка-стрингер» вертолета МИ-26Т для усталостных испытаний со случайным нагружением // Научный вестник МГТУ ГА ; Сер. : «Аэромеханика, прочность, поддержание летной годности». – 2009. – № 153. – С. 83–91. ISSN 2079-0619.
 9. Полоник Е. Н., Суренский Е. А., Федотов А. А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности механических систем соединений элементов авиаконструкций // Труды МАИ. – Вып. № 92. – 2017. ISSN 1727-6942.
 10. Стрижиус В. Е. Методика расчетов на усталость элементов авиационных конструкций с использованием рейтингов усталости // Научный вестник МГТУ ГА. Серия : «Аэромеханика и прочность, поддержание летной годности ВС». – 2008. – № 130. – С. 47–58. ISSN 2079-0619.
 11. Стрижиус В. Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций : справочное пособие. – М. : Машиностроение, 2012. – 272 с. ISBN 978-5-94275-652-9.
 12. Сенько В. И., Макеев С. В., Комиссаров В. В. Методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при натуральных испытаниях подвижного состава // Наука – образование – производство: Опыт и перспективы развития. Т. 1. – Екатеринбург. – 2018. – С. 201–212. ISBN 978-5-9544-0088-5.
 13. Якушев, А. В. Теория о деградации механических свойств литых сталей класса 20Л // Транспорт Урала. – 2022. – № 1 (72). – С. 18–23. ISSN 1815-9400.
 14. Плоткин В. С., Краснобаев А. М., Краснобаев О. А. К вопросу совершенствования методик оценки прочности литых деталей тележек грузовых вагонов при их проектировании и испытаниях для цели подтверждения соответствия // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – № 6. – С. 33–37. ISSN 2223-9731.
 15. Груздев А. С., Надеждин В. С., Фараджев Ф. А., Красавин П. А. Применение метода падающего дождя при расчёте долговечности элементов несущей системы транспортного средства // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 1 (96). – С. 24–26. ISSN 2073-9133.
 16. Агошков О. Г., Цепелев В. С., Петренко Ю. А. Инженерная оценка циклической долговечности элементов технических систем // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2010. – № 1 (11). – С. 54–57. ISSN 2074-1146.
 17. ASTM E1049-1985 Standard Practices For Cycle Counting in ... URL: <https://www.scribd.com/document/12102023> (дата обращения: 12.10.2023).
 18. Rainflow Counting – Community/ URL: <https://community.sw.siemens.com> (дата обращения: 12.10.2023).
 19. Rainflow counts for fatigue analysis – MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения: 12.10.2023).
 20. Rainflow Counting – an overview | ScienceDirect Topics/ URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rainflow-counting> (дата обращения: 12.10.2023).

References

1. Smolyaninov A. V., Kolyasov K. M., Duvanov D. V. Static and dynamic loading of the springs Smolyaninov A. V., Kolyasov K. M., Duvanov D. V. Static and dynamic loading of the springs of the axle box suspension trolley of the electric train ES2G [Statische i dinamicheskaya nagruzhennost' pruzhin buksovogo podveshivaniya telezhki elektropoezda ES2G] // Transport of the Urals. 2022. № 4 (75). Pp. 28–32. ISSN 1815-9400.
2. GOST 25.101-83. Calculations and strength tests. Schematization methods of random loading processes of machine elements and structures and statistical representation for the results [GOST 25.101-83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizacii sluchajnyh processov nagruzheniya elementov mashin i konstrukcij i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov]. – М. : Publishing House of Standards. 1983. 21 p.

3. GOST 23207-78. Fatigue resistance. Basic terms, definitions and designations [GOST 23207-78. Soprotivlenie ustalosti. Osnovnye terminy, opredeleniya i oznacheniya]. – M. : Publishing House of Standards. 1978. 50 p.
4. Pochtennyi E. K., Kapusta P. P. Analysis of random loading schematization methods [Analiz metodov skhematizacii sluchajnogo nagruzheniya] // Modern methods of machine design. Vol. 1. Promising areas of machine designing. – Minsk, 2004. – Pp. 130–138.
5. Fedorchenko D. G., Novikov D. K. Schematization methods of the operational cycle of voltage changes by the system of elementary cycles [Metody skhematizacii ekspluatacionnogo cikla izmeneniya napryazhenij sistemoy elementarnyh ciklov] // Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – Samara : 2013. Vol. 15, № 6. – Pp. 267–271. ISSN 2413-9645.
6. Zeitlin V. I., Fedorchenko D. G. Durability evaluation of parts under the combined action of repeated static and vibrational loading [Ocenka dolgovechnosti detalej pri sovмест-nom dejstvii povtorno staticheskogo i vibracionnogo nagruzheniya] // Problems of strength. – 1980. – № 1. – Pp. 14–17.
7. Vronsky G. V. Modified method of full cycles and schematization of multidimensional loading processes [Modificirovannyj metod polnyh ciklov i skhematizaciya mnogomernyh processov nagruzheniya] // Scientific notes of CAHI. – 2004. Volume 35. – № 1-2. – Pp. 97–109. ISSN 0321-3439.
8. Osipov D. N., Serdobolskaya M. L., Shapkin V. S. Process schematization of operational loading «skin-stringer» of the MI-26T helicopter for fatigue tests with random loading [Skhematizaciya processa eks-pluatacionnogo nagruzheniya «obshivka-stringer» vertoleta MI-26T dlya ustalostnyh ispytaniy so sluchajnym nagruzheniem]// Scientific Bulletin of MGTU GA, Aeromechanics series, strength, maintenance of airworthiness. – 2009. – № 153. – Pp. 83–91. ISSN 2079-0619.
9. Polonik E. N., Suransky E. A., Fedotov A. A. Automation for calculations of fatigue durability in mechanical systems of element joints of aircraft structures [Avtomatizaciya raschetov ustalostnoj dolgovechnosti mekhanicheskikh sistem soedinenij elementov aviakonstrukcij] // Proceedings of MAI. Issue № 92. – 2017. ISSN 1727-6942.
10. Strizheus V. E. Calculation method for fatigue of elements in aircraft structures using fatigue ratings. [Metodika raschetov na ustalost' elementov aviacionnyh kon-strukcij s ispol'zovaniem rejtingov ustalosti] // Scientific Gerald of MGTU GA. Aeromechanics and durability series, maintenance of airworthiness of aircraft. – 2008. – № 130. – Pp. 47–58. ISSN 2079-0619.
11. Strizheus V. E. Methods for calculating the fatigue life of aircraft components: a reference guide [Metody rascheta ustalostnoj dolgovechnosti elementov avia-konstrukcij: spravocnoe posobie]. – M. : Mechanical Engineering, 2012. – 272 p. ISBN 978-5-94275-652-9.
12. Senko V. I., Makeev S. V., Komissarov V. V. Methodological foundations for determining the coefficient of fatigue resistance reserve during field tests of rolling stock [Metodicheskie osnovy opredele-niya koefficienta zapasa soprotivleniya ustalosti pri naturnyh ispytaniyah podvizhnogo sostava] // Science – education – production: Experience and prospects of development. Vol. 1. – Ekaterinburg. – 2018. – Pp. 201–212. ISBN 978-5-9544-0088-5.
13. Yakushev A. V. Degradation theory of mechanical properties of cast steels for class 20L [Teoriya o degradacii mekhanicheskikh svojstv lityh stalej klassa 20L] // Transport of the Urals. – 2022. – № 1 (72). – Pp. 18–23. ISSN 1815-9400.
14. Plotkin V. S., Krasnobaev A. M., Krasnobaev O. A. On the issue of improving methods for assessing the strength of cast parts in freight car bogies during their design and testing for the purpose of confirming compliance [K voprosu sovershenstvovaniya metodik ocenki prochnosti lityh detalej telezhek gruzovyh vagonov pri ih proektirovanii i ispytaniyah dlya celi podtverzhdeniya sootvetstviya] // Gerald of VNIIZHT. – 2014. – № 6. – Pp. 33–37. ISSN 2223-9731.
15. Gruzdev A. S., Nadezhdin V. S., Faradzhev F. A., Krasavin P. A. Application of the method of falling rain in calculating the durability of elements in the vehicle carrier system [Primenenie me-toda padayushchego dozhdya pri raschyote dolgovechnosti elementov nesushchej siste-my transportnogo sredstva] // Journal of Automotive Engineers, – 2016. – № 1 (96). – Pp. 24–26. ISSN 2073-9133.
16. Agoshkov O. G., Tsepelev V. S., Petrenko Yu. A. Engineering assessment for cyclic durability of elements in technical systems [Inzhenernaya ocenka cikliche-skoj dolgovechnosti

- elementov tekhnicheskikh sistem] // Technical and technological problems of service. – 2010. – № 1 (11). – Pp. 54–57. ISSN 2074-1146.
17. ASTM E1049-1985 Standard Practices For Cycle Counting in ... URL: <https://www.scribd.com/document/12.10.2023>.
 18. Rainflow Counting – Community/ URL: <https://community.sw.siemens.com> (data accessed: 12.10.2023).
 19. Rainflow counts for fatigue analysis – MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/> (data accessed: 12.10.2023).
 20. Rainflow Counting – an overview | ScienceDirect Topics. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rainflow-counting> (data accessed: 12.10.2023).

Статья сдана в редакцию 12 декабря 2023 года

Организация и логистика

УДК 656.22

В. С. Паршина

Технология создания тура по железной дороге

UDC 656.22

V. S. Parshina

The technology of creating a railway tour

Аннотация

В настоящее время из-за сложившейся в мире обстановкой актуальным видом туризма для нашей страны является внутренний, в связи с чем наблюдается тенденция развития железнодорожных туров. Цель исследования – формирование туристических поездок по железной дороге. Предметом исследования являются технологии проектирования железнодорожных туров. Приведенные статистические данные демонстрируют недостаточное использование железнодорожного транспорта для туристических поездок в сравнении с автомобильным и авиа. Показано место РФ в рейтинге стран по туристическому пассажиропотоку. Проведено обобщение проблем, сдерживающих развитие железнодорожного туризма. На основе сформированного перечня значимых для клиентов факторов при

выборе маршрута путешествия выделены 10 приоритетных для жителей исследуемого региона. Приведена технология выбора перспективных маршрутов для туризма и направлений совершенствования организации туристических поездок по железной дороге на основе оценки их конкурентоспособности по результатам опроса пассажиров конкретных железнодорожных маршрутов в регионе. Полученные результаты исследования могут быть использованы для обоснования выбора варианта при разработке маршрутов путешествий по железной дороге. Использование мнений пассажиров определенных маршрутов конкретного региона позволяет предложить востребованные клиентами железнодорожные туры.

Ключевые слова: железнодорожный туризм, особенности путешествий по

железной дороге, факторы выбора тура, виды железнодорожных туров, конкурентоспособность тура.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-80-90

Abstract

Nowadays the current situation in the world makes domestic tourism the most relevant type of tourism for our country, and therefore there is a tendency for the development of railway tours. The purpose of the study is creating tourist railway trips. The subject of the research is the technology of designing railway tours. The mentioned statistics demonstrate the insufficient eye of rail transport for tourist trips in comparison with automobile and air transport. The place of the Russian Federation in the ranking of countries in terms of tourist passenger traffic has been shown. A generalization of the problems hindering

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

Валентина Сергеевна Паршина, д-р экон. наук, Уральский государственный университет путей сообщения. Екатеринбург, Россия. E-mail: vparshina@usurt.ru. ORCID 0000-0002-3932-776X.

© В. С. Паршина, 2024

The article has been recommended for publication by S. V. Racheck, Doctor of Economic Sciences, Ural State University of Railway Transport. E-mail: SVRachek@usurt.ru.

Valentina Sergeevna Parshina, Doctor of Economic Sciences, Ural State University of Railway Transport. Ekaterinburg, Russia. E-mail: vparshina@usurt.ru. ORCID 0000-0002-3932-776X.

© V. S. Parshina, 2024

the development of railway tourism has been carried out. Thanks to the generated list of factors significant to customers we have chosen a travel route and identified 10 priority routes for locals under study. The technology of selecting promising touristic routes and directions for improving the organization of tourist trips

along the same road has been presented. This technology is a result of an assessment of their competitiveness based on the survey of passengers of specific railway routes in the region. The obtained research results can be used to justify the choice of an option when developing travel railway routes. Using the passengers'

opinions on certain routes of a particular region allows us to offer railway tours that are in demand.

Keywords: railway tourism, features of traveling by rail, tour selection factors, types of railway tours, tour competitiveness.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-80-90

Железнодорожным туризмом (путешествием организованных групп туристов с использованием железнодорожного транспорта) занимается, в частности, компания «РЖД Тур»*. В результате перехода под корпоративное управление холдинга «РЖД» (2011 г.) и в связи с решением о возрождении железнодорожного туризма в России появились специальные туристические поезда, экскурсионные туры по стране, путешествия на ретропоездах, событийные тематические и паломнические туры и т.д.

Многодневные туры встречаются редко, в основном по государственному (например, в новогодние каникулы) или корпоративному заказу; в России этим занимаются семь туроператоров. Региональные же компании организуют достаточно много однодневных туров на электропоездах или поездах на паровозной тяге в условиях пригородного сообщения.

Железнодорожный транспорт играет важную роль в туризме, выступая одновременно и способом передвижения, и отдельной туристической достопримечательностью. Железнодорожный тур включает в себя путешествия в специализированных туристических поездах (арендованные составы, при путешествии в которых используются спальные места как база размещения

и вагоны-рестораны как точки питания туристов), а также групповые путешествия с использованием определенного количества мест в графиковых поездах [1–3]. За основу разработки такого путешествия принимается обязательная поездка заинтересованного клиента по железной дороге по определенному маршруту, включая возможность созерцания происходящего за окном по пути следования; в этом и заключается особенность предоставляемых «РЖД Тур» турне. Одновременно предполагается и удовлетворение интереса клиентов к месту путешествия. «РЖД Тур», работая в контакте с туроператором, выступает инициатором создания круизов**. Днем пассажиры в составе экскурсионных групп осматривают объекты, а вечером продолжают путь. Выбор тура с перемещением до места экскурсии и обратно по железной дороге обусловлен получением как позитивных, так и негативных впечатлений (таблица 1).

На мировом уровне туризм – одна из самых прибыльных отраслей, в целом на туризм приходится около 11 % потребительских расходов [1]. Индустрия туризма играет существенную роль в формировании внутреннего валового продукта, т.к. дает возможность создания новых рабочих мест, обеспечивая занятость населения, инициирует модернизацию транспортной отрасли,

* Компания «РЖД Тур» (создана в 2005 г.) вначале ориентировалась на организацию чартерных перевозок, делового туризма и корпоративных мероприятий, связанных с использованием железнодорожного транспорта.

** По аналогии с морскими и речными путешествиями продолжительные железнодорожные туры называются круизами.

Таблица 1

Впечатления от путешествий по железной дороге	
Позитивные	Негативные
Низкая стоимость перевозки	Низкая манёвренность передвижения, ограниченного железнодорожными путями
Фиксированная стоимость поездки	Некоторые регионы страны недоступны
Высокая степень безопасности	Низкая скорость перевозки по сравнению с другими видами транспорта
Гибкий график движения поездов	Необходимость привлечения других видов транспорта для перемещения туристов к местам отдыха
Комфортабельность путешествия	Высокая загруженность железнодорожных путей и подвижного состава
Высокий ограничительный порог на вес и габариты багажа	Длительный простой подвижного состава в некоторых остановочных пунктах
Наличие льгот	Ограниченное меню в вагонах-ресторанах
Удобство в покупке билета	Проблемы с медобслуживанием
Возможность использования подвижного состава в качестве гостиницы за счёт перемещения между остановочными пунктами в ночное время	
Высокая экологичность	
Независимость от погодных условий	
Живописный вид за окном	

Таблица 2

Классификация железнодорожных туров

По типу подвижного состава	
Категория	Особенности
Туры в туристско-экскурсионных поездах	Перевозка осуществляется по определенным маршрутам в специализированном туристическом поезде, арендованном исключительно под туристские цели. Подвижной состав служит не только транспортным средством, но и местом питания и проживания туристов на протяжении всей поездки. Как правило, вагоны оборудованы спальными местами повышенной комфортности и душевыми кабинами
Туры в прогулочных поездах	Поезда, состоящие из вагонов с сидячими местами и вагонов-ресторанов. Во время движения поезда пассажирам предоставляется питание и напитки. Прогулочные поезда используют для однодневного путешествия на небольшие расстояния для отдыха, экскурсий и прогулок по окрестностям
Туры в графиковых поездах	В туристической поездке задействованы регулярные поезда (подчиненные определенному расписанию) для перевозки туристов (на правах пассажиров)
По продолжительности путешествия	
Категория	Особенности
Однодневные (от 3 до 24 ч)	Перевозка осуществляется в прогулочных поездах (вагоны с сидячими местами и/или вагонами-ресторанами и/или вагонами-буфетами). Цены значительно ниже остальных из-за отсутствия услуги ночлега. Однодневные туры рассчитаны на определенную категорию туристов (школьные группы, иностранцы и т.п.). Цель туристической поездки – посещение природных заповедников, культурных и исторических объектов, развлекательных мероприятий (спортивные соревнования, музыкальные концерты и т.п.) по разработанной программе в формате экскурсий
Непродолжительные/ кратковременные (два-три дня)	Ключевая особенность заключается в том, что услугой туристы могут воспользоваться в любое время года, не дожидаясь официального отпуска или каникул, так как непродолжительные туры созданы для отдыха в выходные дни. Перевозка осуществляется в составах из вагонов класса люкс/купе/СВ + вагоны-рестораны/вагоны-буфеты. Поезд движется ночью для увеличения времени пребывания в пункте назначения

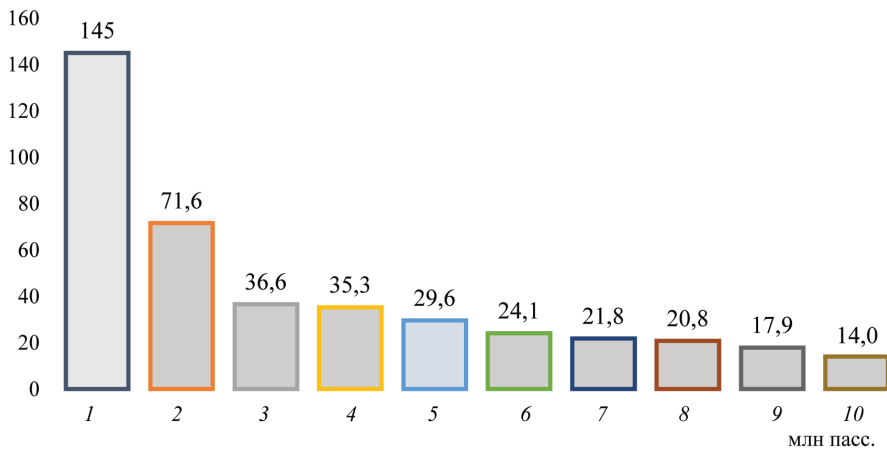


Рис. 1. Рейтинг стран по туристическому пассажиропотоку
 1 – Китай; 2 – США; 3 – Великобритания; 4 – Германия; 5 – Россия; 6 – Индия; 7 – Италия;
 8 – Польша; 9 – Канада; 10 – Мексика

способствует знакомству с местными/ национальными достопримечательностями. В развитых странах железнодорожные круизы от 2 до 14 дней представляют премиальный продукт в виде пятизвездочных отелей на колесах, включающих проезд, проживание, питание, экскурсии. Например, за рубежом популярны туры выходного дня на ретропоездах. В ходе анализа представленных на рынке железнодорожных туров сформированы два основных типа: по подвижному составу и продолжительности круиза (таблица 2).

По данным 2021 г. РФ заняла пятое место по численности туристов (рис. 1) [3].

Интерес представляет стремительный рост туристических потоков в Китае; за последние годы Китай (население 1 443 млн чел.) существенно

преуспел в развитии туризма: 145 млн туристов. При этом железнодорожный транспорт Китая по объему использования находится на первом месте (таблица 3), так как граждане страны оценивают его как самый комфортный способ перемещения на дальние расстояния – время в пути максимально сокращено за счёт высокоскоростного движения, а билет на поезд значительно дешевле, чем на самолет.

Динамика туристических перевозок по видам транспорта в РФ представлена на рис. 2, где очевидно доминирование авиаперевозок. Железнодорожный транспорт традиционно занимал третье место по пассажирообороту, а в 2021 г. перешел на второе.

Представленные на рис. 3 данные демонстрируют большой разрыв между Россией и странами-лидерами мировой

Таблица 3

Протяженность путей сообщения Китая

Транспорт	Протяженность, км	Доля вида транспорта в туристическом пассажирообороте, %
Железнодорожный	146 300	39,2
Автомобильный	5 280 000	25,4
Воздушный	–	23,7
Внутренний водный	131 600	11,7

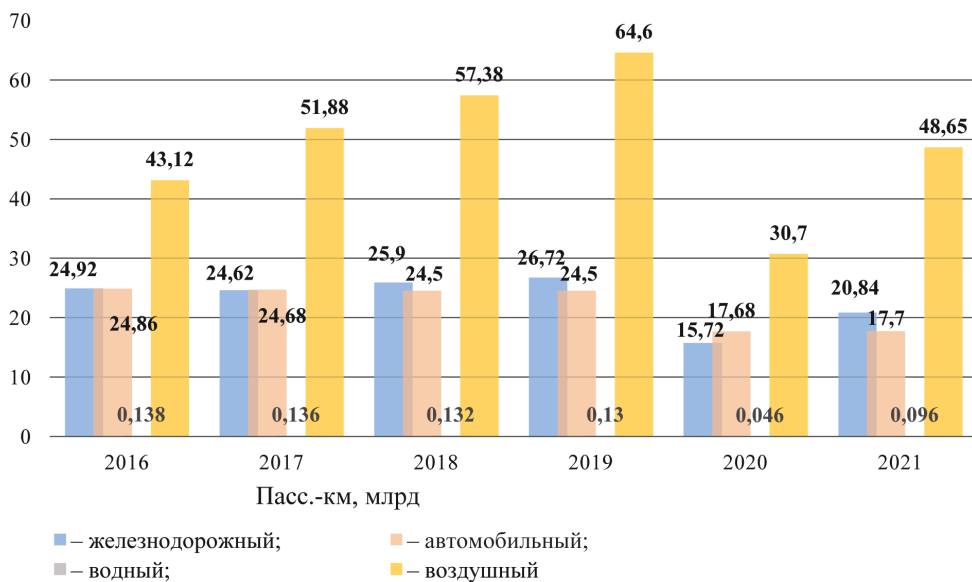


Рис. 2. Туристический пассажирооборот РФ по видам транспорта [2]

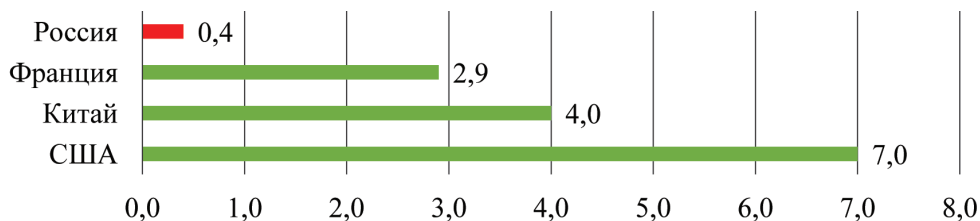


Рис. 3. Количество внутренних туристических поездок с ночевкой на одного жителя страны в год, шт. [4]

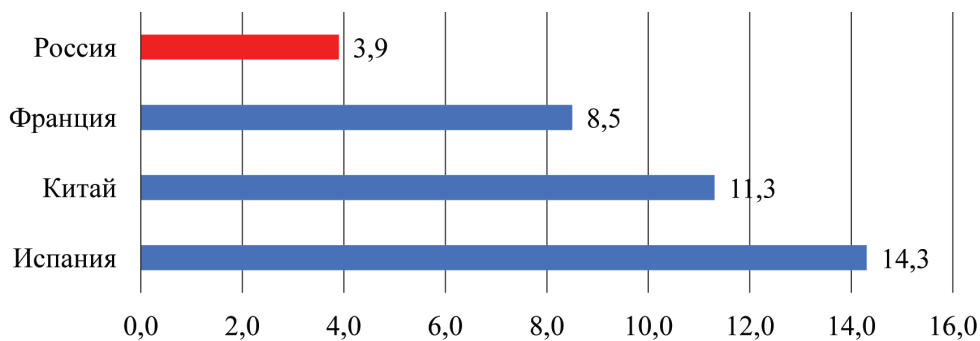


Рис. 4. Совокупный вклад туризма в ВВП страны, %

туристической отрасли по количеству внутренних туристических поездок.

Вклад туризма РФ в объем ВВП составляет 3,9 %, тогда как у стран-лидеров 10 % и выше (рис. 4).

Обобщим проблемы в организации туров при взаимодействии с железной дорогой. На основе опроса пассажиров поездов дальнего следования выявлено свыше ста видов претензий к качеству услуг по следующим направлениям (% от числа опрошенных): техническое и санитарное состояние вагонов – 44,7, организация питания в пути следования – 29,5, комфортабельность поездки – 24, прочие причины – 1,8 [5]. Изучение претензий к обслуживанию на начальных станциях выявило прежде всего нехватку мест в зале ожидания и недостаточное внимание работников вокзала к нуждам пассажиров. В по-

следние годы такие проблемы успешно решаются в других сервисных сферах, например, в гостиницах, торговле [6]. Отмечается и нехватка в ОАО «РЖД» специализированного туристического подвижного состава, а из-за этого нельзя реализовать гарантированные объемы туристических перевозок [7–10].

Для понимания стремления населения путешествовать приведем итоги Национального туристического рейтинга-2022, в «золотую» группу которого вошли регионы, занявшие с 1-го по 30-е место. Свердловская область заняла 17 место (таблица 4), что отражает интерес людей к посещению области, а также ее жителей к знакомству с достопримечательностями региона.

В ходе исследования поставлена задача: разработка турпродуктов, ориентированных на удовлетворение спроса

Таблица 4

Результаты национального туристического рейтинга [2]

Место/субъект РФ	Балл
1. Краснодарский край	121,7
2. Московская обл.	119,2
3. Город федерального значения Москва	118,9
4. Город федерального значения Санкт-Петербург	117,9
5. Республика Крым	112,7
6. Нижегородская обл.	106,8
7. Приморский край	105,4
8. Алтайский край	105,1
9. Республика Татарстан	104,2
10. Самарская обл.	101,1
11. Республика Башкортостан	99,2
12. Новосибирская обл.	96,6
13. Челябинская обл.	96,1
14. Ставропольский край	95,8
15. Иркутская обл.	92,6
16. Тюменская обл.	92,4
17. Свердловская обл.	91,2
18. Калининградская обл.	90,8
19. Ленинградская обл.	90,2
20. Сахалинская обл. и т.д.	90,1

населения относительно путешествий по Свердловской области и близлежащим территориям. Мы ориентировались на информацию, полученную в результате опросов потенциальных клиентов конкретного региона как на макро-, так и микроуровне, для которых создаются новые услуги, товары или изучаются проблемные сферы жизнедеятельности, факторы развития*. Направленное

исследование в туризме позволяет собрать актуальную клиентоориентированную информацию, в результате чего предложить интересный для конкретной аудитории тур.

В общей сложности получены 273 анкеты. Результаты опроса показывают выбор граждан относительно частоты туристических поездок, вида транспорта для путешествий (рис. 5–7).

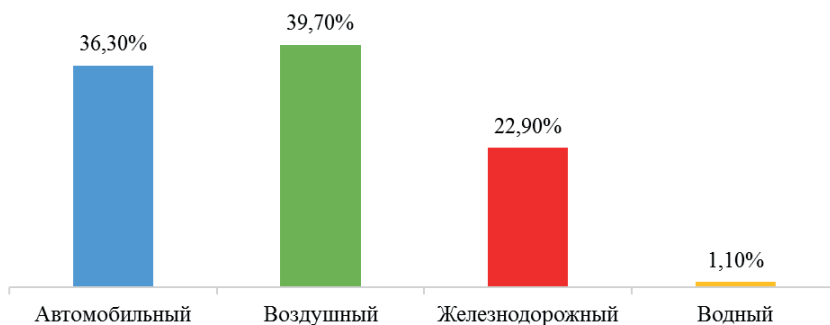


Рис. 5. Виды транспорта в туристических поездках

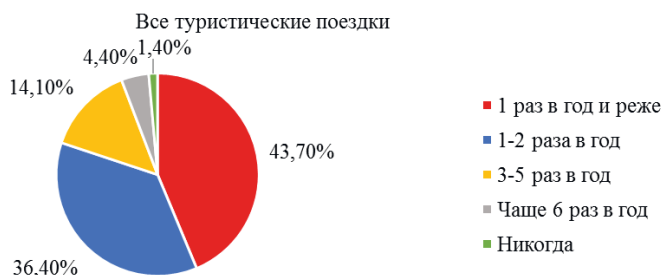


Рис. 6. Частота совершения туристических поездок

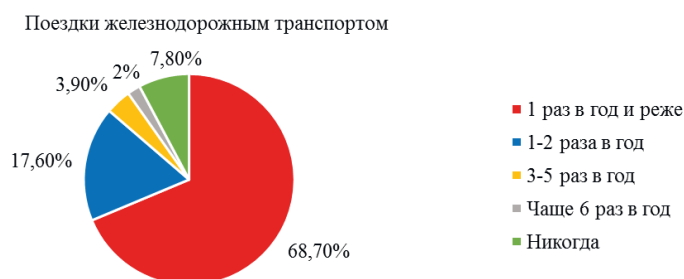


Рис. 7. Частота совершения туристических поездок железнодорожным транспортом

* Ориентация на особенности населения связана с различием его структуры по возрасту, образованию, семейному положению и т.п., их доходов, загруженностью на работе и т.д. Спрос на туризм существенно зависит не только от покупательной способности потребителей, но и от особенностей места проживания, сезонности, периодичности отпусков, выходных и праздничных дней, учебных каникул и т.п.

Полученные данные показывают, что железнодорожный транспорт для туристических поездок используется нечасто, и еще предстоит сформировать вызывающие интерес и адекватные потребностям маршруты для путешествий по региону. Как свидетельствует опыт более развитых в сфере железнодорожного туризма областей страны, большим спросом пользуются поездки с насыщенной программой, позволяющей посетить сразу несколько районов.

Показатели, влияющие на выбор тура: стоимость тура, время в пути следования и длительность тура, насыщенность и информативность программы туристического маршрута, уровень сервиса на транспорте, удобство приобретения билетов, питание во время поездки, предоставление льгот и скидок, безопасность и комфортность поездки, удобство расписания, репутация туристической/транспортной компании в туристическом бизнесе, удобное расположение станций прибытия/отправления, совет родственников/знакомых/коллег, эксклюзивность и всесезонность тура, регулярность рейсов, наличие дополнительных экскурсионных услуг.

Респондентам предложено расставить приоритеты (1, 2, 3 и т.д.) из числа предварительно сформированных факторов. На основе мнений опрошенных оставлены десять наиболее значимых (таблица 5), по которым оценивается конкурентоспособности тура.

Далее поставлена задача разработки методики определения востребованных региональных железнодорожных маршрутов, увязанных с конкретными местами отдыха (горнолыжный, культурно-познавательный, событийный, санаторно-курортный туризм и др.). В дальнейшем эти маршруты будут организационно доработаны с учетом выявленных приоритетных потребностей туристов [11–13].

Маркетинговые исследования в области туризма необходимы для создания туров с учетом желаний клиентов и анализа конкурентных преимуществ

в сфере туристических услуг. Существуют различные методики определения групп потребителей услуг, готовых перейти из потенциального в реальный сегмент спроса. Исследование населения (потенциальных потребителей туристических услуг) учитывает возраст, пол, уровень доходов, состав компании, а также ключевые факторы, влияющие на выбор транспорта [4]. Такой подход позволяет сформировать туры для узких групп населения.

Еще вариант проектирования туров, позволяющий определить конкурентоспособность транспортных туристических услуг в виде созданных маршрутов и назначений тур-поездов, – разработка универсальной методики для широкого круга желающих путешествовать граждан, позволяющей достичь поставленной цели. Оценка конкурентоспособности маршрута в сфере туристического рынка включает в себя определение уровня конкурентоспособности на основе оценки качества обслуживания и далее затрат на осуществление туристических услуг, нахождение трех вариантов туров с учетом их конкурентных преимуществ, их сравнительная оценка и выбор наилучшего предложения, применение инструментов повышения конкурентоспособности (маркетинг, менеджмент и информационно-коммуникативные технологии).

Разработка таких проектов позволяет создать востребованную программу тура до его запуска. Для этого необходимо дать предложения по освоению железнодорожного туристического рынка путём выбора перспективных направлений на основе разработки трёх туристических маршрутов в определенной сфере, например, культурно-познавательного туризма (экотуризм, событийный туризм и т.д.). Опрашиваются пассажиры поездов, регулярно курсирующих по направлениям проектируемых маршрутов.

Следующий этап в формировании железнодорожного тура – определение оптимального маршрута из предложенных трех направлений. Для этого

составлена анкета для комплексной оценки качества услуг (таблица 5).

На основе значимости каждого из десяти факторов определяются удельные весовые коэффициенты как отношение значимости конкретного фактора к итоговому значению (например, $5/41 = 0,12$).

Вес показателя для группы респондентов по трем маршрутам определяем как среднее арифметическое значение. Обработанные данные опросов занесены в таблицу 6.

Для расчёта индекса конкурентоспособности маршрута определяется

суммарный балл всех респондентов по каждому показателю:

$$Q_i = 5 \cdot n_5 + 4 \cdot n_4 + 3 \cdot n_3 + 2 \cdot n_2 + 1 \cdot n_1 + 0 \cdot n_0, \quad (1)$$

где n_i – количество респондентов, оценивших услугу на i -ю оценку.

Общее значение конкурентоспособности по каждому показателю:

$$q_i = \left(\frac{Q_i}{\bar{Y}} \right) \cdot X_i, \quad (2)$$

Таблица 5

№	Фактор	Значимость по 5-балльной шкале	Оценка фактического состояния, балл					
			0	1	2	3	4	5
1	Стоимость тура							
2	Комфортность условий поездки							
3	Насыщенность и информативность программы туристического маршрута							
4	Безопасность поездки							
5	Удобство расписания							
6	Длительность тура							
7	Питание в период туристической поездки							
8	Уровень качества сервиса на транспорте							
9	Предоставление льгот и скидок							
10	Регулярность рейсов							
Итого								

Таблица 6

Показатели оценки туристического маршрута

№	Показатель	Вес
1	Стоимость тура	0,23
2	Комфортность условий поездки	0,19
3	Насыщенность и информативность программы туристического маршрута	0,12
4	Безопасность поездки	0,11
5	Удобство расписания	0,08
6	Длительность тура	0,07
7	Питание в период туристической поездки	0,06
8	Уровень качества сервиса на транспорте	0,05
9	Предоставление льгот и скидок	0,05
10	Регулярность рейсов	0,04
Итого		1

где q_i – значение конкурентоспособности по i -му показателю; Θ – эталонное значение показателя (оценка «5»); X_i – вес показателя.

Общий индекс конкурентоспособности по всем параметрам (K) туристического маршрута:

$$K = \sum q_i. \quad (3)$$

Теперь можно оценивать конкурентоспособность вариантов туристических маршрутов. По итогам расчётов показателей по трём предложенным маршрутам определяем наиболее перспективный тур, далее разрабатывается полная

туристическая программа. Приведенный метод оценки конкурентоспособности позволяет установить определенные направления развития деятельности. Необходимо принимать во внимание, что каждая категория железнодорожного тура имеет свою специфику организации обслуживания туристов, распределения времени, предоставления услуг и технологии обслуживания туристов.

Предложенная в работе технология может быть использована при разработке и организации новых туристических продуктов для железной дороги в плане развития внутреннего туризма страны. ■

Литература

1. Отчеты Всемирной туристской организации. URL : <https://tourlib.net/wto.htm> (дата обращения: 24.09.2023).
2. Национальный туристический рейтинг 2021. URL : <https://www.rustur.ru/nacionalnyj-turisticheskij-rejting-2021> (дата обращения: 03.09.2023).
3. Обзоры рынка. URL : <https://www.businessstat.ru/> (дата обращения: 13.09.2023).
4. Аналитика туроператоров. URL : <https://www.atorus.ru/analytics> (дата обращения: 25.08.2023).
5. Ефимова Г. Н. Специфика и проблемы сервиса на железных дорогах. URL : <https://www.cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-i-problemy-servisa-na-zheleznyh-dorogah> (дата обращения: 07.08.2023).
6. Паршина В. С., Гилева О. В. Расширение сервиса в вокзальных комплексах // Инновационный транспорт. 2023. № 2 (48). С. 38–42. ISSN 2311-164X.
7. Кусков А. С. Транспортное обеспечение в туризме : учебник / А. С. Кусков, Ю. А. Джалядян. – М. : Изд-во «КноРус». 2016. – 356 с. ISBN 978-5-406-04494-0.
8. Косарева Н. В., Адашова Т. А. Железнодорожный туризм как один из векторов устойчивого развития регионов России // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 2. – С. 61–65. ISSN 1818-4057 (print) ; ISSN 2226-3977 (online).
9. Афанасьева А. В., Гончарова О. В., Лагусев Ю. М., Семенова [и др.]. Железнодорожные перевозки как составляющая туристского ресурсного потенциала: мировой и российский контекст // Сервис в России и за рубежом. – 2020. – Том 14. – № 1/88. С. 43–61. ISSN 1995-042X.
10. Куликова Е. Б., Яцкевич К. О. Железнодорожные туры в России: проблемы и перспективы развития // Транспортное дело России. 2018. № 4. С. 3–5. ISSN 2072-8689.
11. Паршина В. С., Марущак Т. Б. Использование цифровых технологий в сфере пассажирских железнодорожных перевозок // Экономика железных дорог. 2020. № 4. С. 36–44. ISSN 1727-6500.
12. Паршина В. С., Морева А. В. Совершенствование железнодорожного туризма в Российской Федерации // Инновационный транспорт. 2023. № 1 (47). С. 47–53. ISSN 2311-164X.
13. Кержаков Д. А., Паршина В. С. Возможности создания туристско-рекреационного комплекса на базе Уральского федерального округа / В сб. : Тенденции развития туризма и гостеприимства в России : М-лы IV Международн. студ. научн. конф. / под ред. С. В. Дусенко, О. Н. Толстых. – М., 2021. – С. 139–143. ISBN 978-5-6045594-2-0.
14. Васильева М. А., Михайлов Н. А., Паршина В. С. Развитие экологического туризма на Среднем Урале / В сб. : Тенденции развития туризма и гостеприимства в России : М-лы III Международн. студ. научн. конф. – М., 2020. С. 45–50. ISBN 978-5-6045594-2-0.

References

1. Reports of the World Tourism Organization. URL : <https://tourlib.net/wto.htm> (data accessed: 24.09.2023).
2. National Tourism Rating 2021. URL : <https://www.rustur.ru/nacionalnyj-turisticheskij-rejting-2021> (data accessed: 03.09.2023).
3. Market reviews. URL : <https://www.businessstat.ru/> (data accessed: 13.09.2023).
4. Analytics of tour operators. URL : <https://www.atorus.ru/analytics> (data accessed: 25.08.2023).
5. Efimova G. N. Specifics and problems of service on railways [Specifika i problemy servisa na zheleznyh dorogah]. URL : <https://www.cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-i-problemy-servisa-na-zheleznyh-dorogah> (data accessed: 07.08.2023).
6. Parshina V. S., Gileva O. V. Service expansion in railway station complexes [Rasshirenie servisa v vokzal'nyh kompleksah] // Innovative transport. 2023. № 2 (48). Pp. 38–42. ISSN 2311-164X].
7. Kuskov A. S. Transport support in tourism : textbook / A. S. Kuskov, Yu. A. Jaladian [Transportnoe obespechenie v turizme]. – M. : Publishing house «KnoRus». 2016. – 356 p. ISBN 978-5-406-04494-0.
8. Kosareva N. V., Adashova T. A. Railway tourism as one of the factors for sustainable development of the regions in Russia [Zheleznodorozhnyj turizm kak odin iz vektorov ustojchivogo razvitiya regionov Rossii] // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. – 2021. – № 2. – Pp. 61–65. ISSN 1818-4057 (print) ; ISSN 2226-3977 (online).
9. Afanasyeva A. V., Goncharova O. V., Lagusev Yu. M., Semenova [et al.]. Railway transportation as a component of tourist resource potential: global and Russian context [Zheleznodorozhnye perevozki kak sostavlyayushchaya turistskogo resursnogo potentsiala: mirovoj i rossijskij kontekst] // Service in Russia and abroad. – 2020. – Volume 14. – № 1/88. Pp. 43–61. ISSN 1995-042X.
10. Kulikova E. B., Yatskevich K. O. Railway tours in Russia: problems and prospects of development [Zheleznodorozhnye tury v Rossii: problemy i perspektivy razvitiya] // The transport business of Russia. 2018. № 4. Pp. 3–5. ISSN 2072-8689.
11. Parshina V. S., Marushchak T. B. The use of digital technologies in the field of passenger rail transportation [Ispol'zovanie cifrovyyh tekhnologij v sfere passazhirskih zheleznodorozhnyh perevozok]// Economics of railways. 2020. № 4. Pp. 36–44. ISSN 1727-6500.
12. Parshina V. S., Moreva A. V. Improving railway tourism in the Russian Federation [Sovershenstvovanie zheleznodorozh-nogo turizma v Rossijskoj Federacii] // Innovative transport. 2023. № 1 (47). Pp. 47–53. ISSN 2311-164X.
13. Kerzhakov D. A., Parshina V. S. The possibilities of creating a tourist and recreational complex in the Ural Federal District [Vozmozhnosti sozdaniya turistsko-rekreacionnogo kompleksa na baze Ural'skogo federal'nogo okruga]/ In the collection : Trends in the development of tourism and hospitality in Russia : Materials of the IV International student scientific conference / edited by S. V. Dusenko, O. N. Tolstykh. – M., 2021. – Pp. 139–143. ISBN 978-5-6045594-2-0.
14. Vasilyeva M. A., Mikhailov N. A., Parshina V. S. Development of ecological tourism in the Middle Urals [Razvitie ekolo-gicheskogo turizma na Srednem Urale] / In the collection : Trends in the development of tourism and hospitality in Russia : Materials of the III International student scientific conference – M., 2020. pp. 45-50. ISBN 978-5-6045594-2-0.

Статья сдана в редакцию 3 ноября 2023 года

Аспирантская тетрадь

УДК 629.423.3+621.833.15

А. Т. Шарапов

Повышение ресурса тяговой зубчатой передачи грузового электровоза изменением геометрических параметров в зацеплении

UDK 629.423.3+621.833.15

A. T. Sharapov

Increase of the resource of a traction gear transmission of an electric freight locomotive changing geometric-kinematical parameters within an engagement

Аннотация

Повышение ресурса узлов тягового подвижного состава всегда в приоритете для отечественного локомотивостроения. В последнее время для грузовых электровозов постоянного тока 2ЭС6 очень актуальна проблема качества зацепления тяговых зубчатых передач. Образующийся вследствие этого износ как предельный, так и неравномерный по высоте или толщине зубьев со временем искажает эвольвентный профиль, увеличивает боковой зазор в передаче, что вызывает повышенные динамические нагрузки и приводит к возникновению трещин, сколов и изломов на зубьях.

Для решения этой проблемы исследовано влияние геометрических параметров зубчатых колес на удельное давление в зацеплении. Предложены расчетные формулы и рекомендации по величине значения коэффициента удельного давления при контакте зубьев. Сымитирована исходная тяговая зубчатая передача грузового электровоза 2ЭС6, верифицированная результатами экспериментальных исследований. Предложено использование нестандартного исходного контура для увеличения ресурса зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6. Выполнен сравнительный анализ исходной и оптимизированной пере-

дач по предложенной геометрической методике оценки качества зацепления, подтверждающий комплексную оптимизацию.

Ключевые слова: грузовой электровоз, зубчатая передача, ресурс, зацепление, удельное давление, нестандартный исходный контур.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-91-100

Abstract

The increase of a traction rolling stock nodes resource is always a priority for domestic locomotive construction. In recent years, there is a very actual problem of the quality of the engagement of a traction gear transmission for electric freight DC locomotives 2ES6.

Статья рекомендована к публикации А. П. Буйносовым, д-ром техн. наук, профессором. Уральский государственный университет путей сообщения. E-mail: ABuinosov@usurt.ru.

Александр Тахирович Шарапов, аспирант; кафедра «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения; Екатеринбург, Россия. E-mail: ASharapov@usurt.ru. ORCID 0000-0002-0967-9713.

© А. Т. Шарапов, 2024

The article is recommended for publication by A. P. Buinosov, Doctor in technical science, professor. Ural State University of Railway Transport, E-mail: ABuinosov@usurt.ru.

Aleksandr Tikhonovich Sharapov, post-graduate student; chair «Electrical Traction», Ural State University of Railway Transport; Ekaterinburg, Russia. E-mail: ASharapov@usurt.ru. ORCID 0000-0002-0967-9713.

© A. T. Sharapov, 2024

Wear as extreme as uneven in height or thickness, formed as a result, eventually distorts the involute profile, increases the transmission side gap which leads to increased dynamic loads and results cracks formation, chips, and fractures on the teeth.

To solve the problem, the impact of the geometrical parameters of gearwheels on specific pressure in the engagement is researched. Calculation formulas and

recommendations on the value of the coefficient of specific pressure within the teeth contact are suggested. The initial traction gear transmission of the electric freight locomotive 2ES6 is imitated and verified with the results of experimental researches. The use of non-standard initial circuit to increase the resource of the gear transmission of the electric freight locomotive 2ES6 is suggested. Comparative ana-

lyses of the initial and optimized transmissions is conducted within the suggested geometric-kinematical method of the evaluation of the engagement quality which confirms the complexed optimization.

Key words: electric freight locomotive, gear transmission, resource, engagement, specific pressure, non-standard initial circuit.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-91-100

Условия работы современного оборудования на грузовых электровозах сопряжены с повышенными как тепловыми, так и ударными нагрузками; к отдельным узлам предъявляют крайне высокие требования. Это относится, в первую очередь, к обеспечению надежной работы тягового привода.

Тяговый привод – один из наиболее ответственных узлов, который служит индикатором состояния электровоза в целом. Ведь его отказ приводит к потере работоспособности всего электровоза.

Значительную опасность для электровоза представляет износ механической части тягового привода – тягового двигателя, тяговой передачи и колесной пары. Самая труднодоступная для анализа и оценки состояния – тяговая передача из-за конструктивных особенностей исполнения. Условия ее работы сопряжены с воздействием значительных осевых и контактных нагрузок, повышенных температур и коррозионно-активной среды.

Состав тяговой передачи: редуктор, муфта и валопроводы. При опорно-осевом подвешивании редуктора муфта не нужна. Значительные проблемы (в плане изнашивания) возникают в тяговом редукторе – на зубчатом колесе (напрессованном на ось колесной пары), шестерне (смонтированной на валу двигателя) и корпусе.

Отказы тягового редуктора чаще всего связаны с тяговой зубчатой передачей, причины которых: некачественное зацепление (геометро-кинематические параметры передачи не обеспечивают ресурс в 1,8 млн км), вследствие чего возникает ускоренное появление механических повреждений зубчатых колес (частичный или полный износ зубьев, появление сколов и выпцербин, выкрашивание рабочих поверхностей) [1], несовершенство технологии посадки зубчатых колес, из-за чего возникают сползания, ослабление посадки, срезы шестерен с вала двигателей.

Все это составляет 15 % от всех отказов, приходящихся на экипажную часть грузового электровоза 2ЭС6 [2].

Исследование влияния геометрических параметров зубчатых колес на удельное давление в зацеплении

Зубчатые передачи как на этапе проектирования, так и после разработки оцениваются показателями, которые характеризуют качество зацепления, – коэффициенты скольжения, осевого и торцевого перекрытия, удельного давления и формы зуба [3]. Основной критерий контактной прочности зубчатой передачи – это коэффициент удельного давления, поэтому совершенствование его расчета всегда будет важным и актуальным вопросом.

Для оценивания контакта зубчатых колес по их геометрии на ранних этапах проектирования предлагаются расчетные формулы и рекомендации по величине значения коэффициента удельного давления при контакте зубьев q , характеризующего влияние геометрических параметров зубьев на удельное давление (определяемое по формуле Герца).

$$q = \frac{m}{r^{\sqrt[3]{\delta}}}, \quad (1)$$

где $r^{\text{пр}}$ – приведенный радиус кривизны зубьев, мм.

Расчетное выражение для определения коэффициента удельного давления в зацеплении:

$$q = m \cdot \frac{r_2 + r_1}{r_2 \cdot r_1}, \quad (2)$$

где $r_{1,2}$ – радиусы кривизны профилей зубчатых колес, находящихся в зацеплении, мм.

Радиусы кривизны эвольвентных профилей зубчатых колес в точке

контакта целесообразно выразить через количество зубьев.

Коэффициент давления учитывают в соответствии с его значением в полюсе [4, 5]. Для определения значений по линии зацепления предлагается оценивать его и в крайних точках.

Контакт зубчатых колес, где точка B' – вход в зацепление зубчатых колес, B'' – выход из зацепления; активная линия зацепления состоит из доплюсовой g_f и заплусовой g_a частей (рис. 1).

Во внешнем зацеплении в крайней точке B' коэффициент удельного давления:

$$q' = \frac{2 \cdot (z_1 + z_2) \cdot \text{tg } \alpha_{tw}}{((z_1 + z_2) \cdot \text{tg } \alpha_{tw} - z_2 \cdot \text{tg } \alpha_{a2}) \cdot z_2 \cdot \text{tg } \alpha_{a2} \cdot \cos \alpha_t}. \quad (3)$$

В крайней точке B'' коэффициент удельного давления определяется по формуле (4):

$$q'' = \frac{2 \cdot (z_1 + z_2) \cdot \text{tg } \alpha_{tw}}{((z_1 + z_2) \cdot \text{tg } \alpha_{tw} - z_1 \cdot \text{tg } \alpha_{a1}) \cdot z_1 \cdot \text{tg } \alpha_{a1} \cdot \cos \alpha_t}. \quad (4)$$

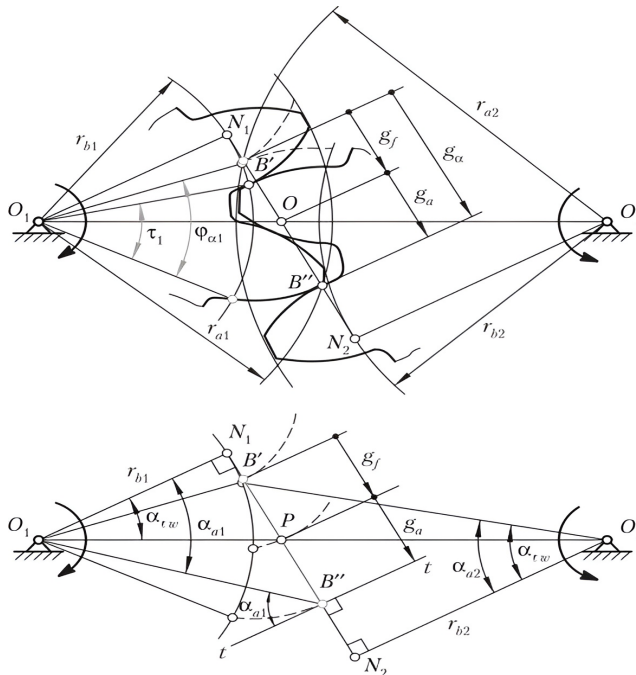


Рис. 1. Зацепление зубчатых колес

Коэффициент удельного давления в полюсе:

$$q^i = \frac{2 \cdot (z_1 + z_2)}{z_1 \cdot z_2 \cdot \cos \alpha_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_{tw}}. \quad (5)$$

Распределение коэффициента удельного давления по линии зацепления (для внешнего зацепления) показано на рис. 2.

Можно сделать вывод, что при увеличении коэффициентов смещения x_1 и x_2 коэффициент удельного давления будет уменьшаться.

Зачастую удобнее оперировать не абсолютным значением коэффициента удельного давления, а его относительным значением к полюсу q^i .

Тогда в крайней точке B' коэффициент относительного давления:

$$\frac{q'}{q^i} = \frac{z_1}{(z_1 + z_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{tw} - z_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{a2}} \times \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_{tw}}{\operatorname{tg} \alpha_{a2}}. \quad (6)$$

В крайней точке B'' коэффициент относительного давления определяется по формуле (7):

$$\frac{q''}{q^i} = \frac{z_2}{(z_1 + z_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{tw} - z_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_{a1}} \times \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_{tw}}{\operatorname{tg} \alpha_{a1}}. \quad (7)$$

При заданном межосевом расстоянии коэффициент относительного давления

в полюсе зацепления проще рассчитать по формуле (8):

$$q^{i \text{ ай}} = \frac{m_t \cdot \cos \beta \cdot \cos \beta_b \cdot (u + 1)^2}{\alpha_w \cdot \sin \alpha_t \cdot u}, \quad (8)$$

где β_b – угол наклона винтовой линии зуба по поверхности основного цилиндра; m_t – торцовый модуль зацепления.

Так как торцовый модуль зацепления m_t вычисляется как отношение нормального модуля зацепления m к косинусу угла профиля исходного контура α , то формула примет вид

$$q^{i \text{ ай}} = \frac{m \cdot \cos \beta_b \cdot (u + 1)^2}{\alpha_w \cdot \sin \alpha_t \cdot u}. \quad (9)$$

Коэффициент давления оценивает контактные напряжения, возникающие в зацеплении (на рабочих поверхностях зубьев), в целом, а не на отдельных зубчатых колесах и не зависит от габаритов передачи. Поэтому чем меньше коэффициент давления в зацеплении, тем выше контактная выносливость и долговечность передачи.

Использование нестандартного исходного контура

Для уменьшения контактных напряжений, повышения износостойкости и улучшения плавности работы, а также увеличения ресурса зубчатой

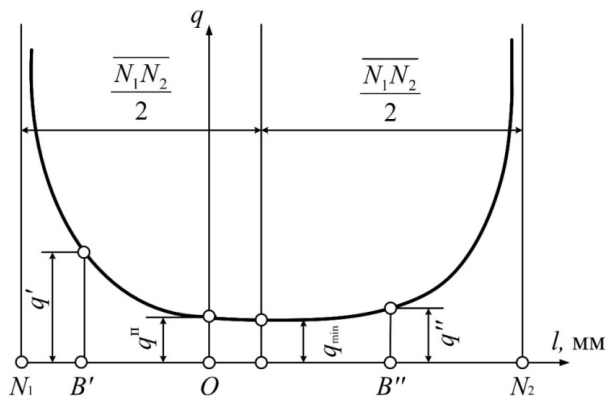


Рис. 2. Изменение коэффициента удельного давления по линии зацепления

передачи грузового электровоза 2ЭС6, предлагается применить нестандартный исходный контур [6, 7].

Для максимизации ресурса передача оптимизирована по совокупному критерию, формируемому из прочности по контакту и изгибу, удельного скольжения профилей зубьев (износостойкость) и коэффициента перекрытия (плавность работы) [8].

Исходные данные и полученные при расчете значения параметров при расчетах геометрии на прочность и долговечность тяговой зубчатой передачи (ТЗП) грузового электровоза 2ЭС6 из сталей 55Ф и 45ХН для большого зубчатого колеса (БЗК) и 20Х2Н4А для малого зубчатого колеса (МЗК) с применением нестандартного исходного контура представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Сравнительный геометрический расчет зубчатых передач

Наименование и обозначение параметра		Исходный вариант		Оптимизированный вариант	
		шестерня	зубчатое колесо	шестерня	зубчатое колесо
Количество зубьев	z	25	86	25	86
Модуль зацепления, мм	m_n	10		8,70744	
Угол наклона зубьев	β	24°34'37»		34°14'04»	
Угол профиля зуба	α	20°00'00»		18°12'30»	
Коэффициент высоты головки зуба	h_a^*	1		1,48268	
Коэффициент радиального зазора	c^*	0,25		0,12466	
Коэффициент радиуса кривизны	ρ_f^*	0,38		0,20386	
Коэффициент смещения	x	+0,3726	+0,3741	+1,3225	+3,0437
Диаметр вершин зубьев, мм	d_a	301,843	972,641	302,043	974,484
Диаметр впадин зубьев, мм	d_f	257,357	928,155	258,345	930,786
Удельное скольжение	θ_p	-0,6796	-0,68056	-0,48207	-0,48446
Коэффициент торцового перекрытия	ε_α	1,383		1,314	
Коэффициент осевого перекрытия	ε_β	1,191		1,851	
Коэффициент перекрытия	ε_γ	2,574		3,165	

Таблица 2

Сравнительный расчет передач на прочность и долговечность

Наименование и обозначение параметра		Исходный вариант ЗК – сталь 45ХН (55Ф)		Оптимизированный вариант ЗК – сталь 45ХН (55Ф)	
		шестерня	зубчатое колесо	шестерня	зубчатое колесо
Расчетное контактное напряжение, МПа	σ_{Hmax}	698,769 (705,688)		624,661 (638,829)	
Коэффициент запаса по контактным напряжениям	n_H	3,967 (3,928)	2,834 (2,719)	4,438 (4,339)	3,17 (3,004)
Расчетное напряжение изгиба, МПа	σ_{Fmax}	162,207 (155,716)	160,112 (153,704)	227,618 (224,088)	164,456 (161,906)
Коэффициент запаса по напряжениям изгиба	n_F	10,016 (10,433)	7,316 (7,733)	7,137 (7,25)	7,123 (7,341)
Ресурс по контакту, ч	L_H	max	99155 (10949)	max	196684 (20469)
Ресурс по изгибу, ч	L_F	max	max	max	max

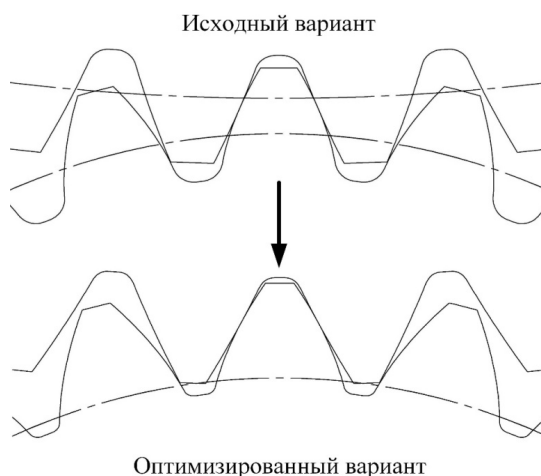


Рис. 3. Визуализация зацепления

При расчете на долговечность учтены три режима работы ТЭД грузового электровоза 2ЭС6: продолжительный (80 %), часовой (15 %) и предельный (5 %). В соответствии с техническими характеристиками электродвигателя ЭДП810 заданы крутящий момент и частота вращения МЗК [9].

Эксплуатация БЗК ТЗП грузового электровоза 2ЭС6 из стали 55Ф недопустима (при использовании параметров исходного контура) из-за низкой нагрузочной способности, износоустойчивости и невыполнения ГОСТ-30803 по выработке ресурса передачи.

Применение нестандартного исходного контура для ТЗП грузового электровоза 2ЭС6, зубчатое колесо которой выполнено из стали 45ХН, целесообразно для повышения износоустойчивости и плавности работы передачи. При использовании БЗК из стали 55Ф (кроме рассматриваемых критериев) также будет достигнут необходимый ресурс по контактным напряжениям ($L_p = 27713,6$ ч), если предельный режим работы ТЭД

составит не более 3 % от общей продолжительности работы передачи. Визуальные отличия в зацеплении представлены на рис. 3.

Верификация результатов моделирования

Моделирование исходной передачи проводилось для шестерен из материала 20Х2Н4А и большого зубчатого колеса из сталей марок 45ХН, 55Ф. Так как ресурс по контактным напряжениям в процессе расчетов оказался наименьшим для БЗК, то верификация будет представлена относительно него.

Для испытаний, проводимых ВНИКТИ, выбрана поковка из стали 55Ф, поэтому приведем результаты определения химического состава БЗК электровоза 2ЭС6 из стали 55Ф [10], полученные спектральным методом (таблица 3).

Результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб БЗК электровоза 2ЭС6 из стали 55Ф представлены в таблице 4.

Таблица 3

Результаты химического анализа БЗК из стали 55Ф (электровоз 2ЭС6)

Химический состав, %								
C	Mn	Si	V	Cr	Ni	S	P	Cu
0,531	0,557	0,293	0,097	0,108	0,103	0,0097	0,0056	0,2157

Таблица 4

Результаты определения механических свойств БЗК из стали 55Ф
(электровоз 2ЭС6)

Механические свойства				
σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	φ , %	КСУ, Дж/см ²
685,3	980,2	19,0	46,7	50,7

Согласно результатам испытаний ВНИКТИ [11], предел контактной выносливости роликовых образцов из стали марки 55Ф $\sigma_{R1} = 730,1$ МПа. Режим работы, заданный при моделировании и наиболее приближенный к результатам эксперимента, – предельный, при котором среднее контактное напряжение, возникающее при взаимодействии зубчатых колес, составило $\sigma_{R2} = 705,688$ МПа (отклонение 3,3 %).

Предел ограниченной контактной выносливости при действии максимально возможных нагрузок в эксплуатации за срок службы редуктора $\sigma_{z1max} = 1900$ МПа (по данным испытаний) совпадает со значением, полученным в результате расчетов $\sigma_{z2max} = 1919$ МПа.

Сравнительный анализ зубчатых передач по предложенной геометрико-кинематической методике оценки качества зацепления

Сравнение исходной зубчатой передачи с передачей, выполненной с использованием нестандартного исходного контура по предложенной методике, приведено в таблице 5. Основные положения методики представлены в [3, 11].

Длина контактных линий зацепления l_{min} в улучшенной передаче больше на 10 мм, что свидетельствует о повышении несущей способности и динамических свойств передачи.

Коэффициенты удельного и относительного давления как в крайних точках зацепления, так и в полюсе значительно меньше (см. таблицу 5), следовательно, контактная прочность зубьев выше.

Сумма коэффициентов удельного скольжения оптимизированного вари-

анта меньше на 25 %, что указывает на увеличение износостойкости передачи.

Коэффициент формы зуба Y_F для БЗК оптимизированной передачи как менее твердого (на 18 единиц HRC для БЗК выполненного из стали 45ХН) по сравнению с МЗК увеличен на 9 % от исходной, что свидетельствует о повышении изгибной прочности.

Выводы

1. Исследовано влияние геометрических параметров зубчатых колес на удельное давление в зацеплении. Для определения значений по линии зацепления предлагается оценивать его и в крайних точках.

2. Сымитирована исходная тяговая зубчатая передача грузового электровоза 2ЭС6, верифицированная результатами экспериментальных исследований, и сделан вывод о невозможности применения стали 55Ф при используемых в настоящее время геометрико-кинематических параметрах зацепления.

3. Исследовано применение нестандартного исходного контура для тяговой зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6 для повышения ресурса путем комплексного подбора показателей качества зацепления. Обоснована возможность применения конструкционной стали марки 55Ф (при использовании нестандартного исходного контура) взамен 45ХН, обработанной токами высокой частоты.

4. Выполнен сравнительный анализ тяговых зубчатых передач по предложенной геометрико-кинематической методике оценки качества зацепления. ■

Таблица 5

Результаты сравнения по предложенной методике

Наименование и обозначение параметра		Исходный вариант		Оптимизированный вариант	
		МЗК	БЗК	МЗК	БЗК
Коэффициент торцового перекрытия	ε_α	1,383		1,314	
Коэффициент осевого перекрытия	ε_β	1,191		1,851	
Длина контактных линий зацепления, мм	l_{\min}	287,155		297,856	
Суммарное значение коэффициентов перекрытия	ε_γ	2,574		3,165	
Коэффициент удельного давления в крайней точке B'	q'	0,356125		0,261479	
Коэффициент удельного давления в крайней точке B''	q''	0,203140		0,170237	
Коэффициент удельного давления в полюсе	$q^{\text{п}}$	0,256673		0,205433	
Коэффициент относительного давления в крайней точке B'	$\frac{q'}{q^i}$	1,387466		1,272819	
Коэффициент относительного давления в крайней точке B''	$\frac{q''}{q^i}$	0,791435		0,828674	
Коэффициент относительного давления в полюсе зацепления	$q^{\text{одп}}$	0,229896		0,184755	
Коэффициент удельного скольжения коэффициентов удельного скольжения на ножках зубьев	$\theta'_{1,2}$	-0,679675	-0,680588	-0,48205	-0,48446
Коэффициент удельного скольжения коэффициентов удельного скольжения на головках зубьев	$\theta''_{1,2}$	0,404970	0,404612	0,326345	0,325227
Сумма коэффициентов удельного скольжения	$ \theta'_{1,2} + \theta''_{1,2}$	1,084545	1,084187	0,808324	0,809667
Отношение коэффициентов ускоренного скольжения в полюсе	$\frac{\theta_{a(l)}}{\theta_{a(\bar{A})}}$	3,44	0,29	3,44	0,29
Отношение коэффициентов ускоренного скольжения для участка N_1O	$\frac{\theta_{a(l)}}{\theta_{a(\bar{A})}}$	4,164412		4,005278	
Отношение коэффициентов ускоренного скольжения для участка N_2O	$\frac{\theta_{a(l)}}{\theta_{a(\bar{A})}}$	0,617292		0,520738	
Коэффициент формы зуба	Y_F	3,545208	3,501063	3,051392	3,817774

Литература

1. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Чебаков С. А. Проверка качества зацепления тяговой зубчатой передачи электровоза 2ЭС6 // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4(48). С. 13–20. ISSN 2079-0392.
2. Буйносов А. П. Определение допустимых значений натяга при посадке шестерни на вал двигателя электровоза 2ЭС6 / А. П. Буйносов, А. Т. Шарапов, Е. В. Федоров, М. С. Чепижко // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 6(96). С. 7–13. ISSN 1997-0722.
3. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Долгих Е. А. Совершенствование расчета коэффициентов скольжения и имитационное моделирование зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6 // Транспорт: наука, техника, управление : Научный информационный сборник. 2023. № 8. С. 17–25. ISSN 0236-1914.
4. ГОСТ 16532–70 (дата актуализации текста: 06.04.2015). Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет геометрии. Введ. 01.01.1972. М. : Изд-во стандартов, 1983. 43 с.
5. ГОСТ 21354–87 (дата актуализации текста: 06.04.2015). Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Введ. 01.01.1989. М. : Изд-во стандартов, 1993. 129 с.
6. Буйносов А. П. Использование нестандартного исходного контура при проектировании тяговой зубчатой передачи / А. П. Буйносов, А. Т. Шарапов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : М-лы VI Всеросс. научн.-техн. конф. с международн. участием, Омск, 12 ноября 2021 года. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2021. С. 131–134.
7. Butov E. S., Butakova M. A., Butov A. E. Optimization of the geometry of engagement of a heavily loaded tooth gear using the criteria of wear and score resistance of teeth // Journal of Friction and Wear. 2001. Vol. 22, No. 4. P. 394–399. ISSN 0202-4977.
8. Голованев В. А. Применение оптимизационных методов и интерактивного блокирующего контура при выборе коэффициентов смещения (корректировки) цилиндрических эвольвентных зубчатых передач внешнего зацепления // САПР и графика. 2014. № 11 (217). С. 89–93. ISSN 1560-4640.
9. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / под ред. В. В. Брексона. – Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. 328 с. ISBN 978-5-89277-120-7.
10. Протокол испытаний № 24ЛМ-18-22. Проведение испытаний колеса зубчатого чертеж 2ЭС6.31.110.002 на изгибную усталостную прочность зубьев. Коломна : АО «ВНИКТИ», 2022. 14 с.
11. Протокол испытаний №24ЛМ-29-22. Проведение испытаний колеса зубчатого чертеж 2ЭС6.31.110.002 на контактную усталостную прочность зубьев. Коломна : АО «ВНИКТИ», 2022. 23 с.
12. Буйносов А. П., Шарапов А. Т., Чепижко М. С. Совершенствование методики расчета качественных показателей зацепления тяговой зубчатой передачи электровоза // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 10. С. 98–101. ISSN 2079-5920.

References

1. Buinosov A. P., Sharapov A. T., Chebakov S. A. Checking the Quality of the Engagement of the Traction Gear Transmission of Electric Locomotive 2ES6 [Proverka kachestva zacepleniya tyagovoj zubchatoj peredachi ehlektrovoza 2EHS6] // Vestnic of Ural State University of Railway Transport. 2020. № 4(48). P. 13–20. ISSN 2079-0392.
2. Buinosov A. P. Determination of Permissible Values of Tension When Setting a Pinion on the Engine Shaft of Electric Locomotive 2ES6 [Opredelenie dopustimykh znachenij natyaga pri posadke shesterni na val dvigatelya ehlektrovoza 2EHS6] / A. P. Buinosov, A. T. Sharapov, E. V. Fedorov, M. S. Chepizhko // Vestnic of Povolzhie Region. 2022. № 6 (96). P. 7–13. ISSN 1997-0722.
3. Buinosov A. P., Sharapov A. T., Dolgih E. A. Modernization of Calculation of Friction Coefficient and Imitation Modelling of a Gear Transmission of Electric Freight locomotive 2ES6 [Sovershenstvovanie rascheta koehfficientov skol'zheniya i imitacionnoe modelirovanie zubchatoj peredachi gruzovogo ehlektrovoza 2EHS6] // Transport: Science, technics, management : Scientific informative journal. 2023. № 8. P. 17–25. ISSN 0236-1914.
4. GOST 16532–70 (date of access: 06.04.2015). Tooth cylindrical involute transmissions of external engagement. Geometry calculation. Introduced 01.01.1972. [Peredachi zubchatye

- cilindricheskie ehvol'ventnye vneshnego zacepleniya. Raschet geometrii. Vved. 01.01.1972]. M. : Publishing house of standards, 1983. 43 p.
5. GOST 21354–87 (date of access: 06.04.2015). Tooth cylindrical involute transmissions of external engagement. Durability calculation. Introduced 01.01.1989. [Peredachi zubchatye cilindricheskie ehvol'ventnye vneshnego zacepleniya. Raschet na prochnost'. Vved. 01.01.1989.]. M. : Publishing house of standards, 1993. 129 p.
 6. Buinosov A. P. The Use of Non-Standard Initial Circuit When Correcting Traction Gear Transmission / A. P. Buinosov, A. T. Sharapov // Exploitation Safety of Locomotive Park and Increase of Traction Effectiveness of Trains [Ispol'zovanie nestandartnogo iskhodnogo kontura pri proektirovanii tyagovoj zubchatoj peredachi / A. P. Bujnosov, A. T. Sharapov // Ehspluatacionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie ehffektivnosti tyagi poezdov] : Materials of VI Russian Scientific-Technical Conference with International Participation, Omsk, November 12, 2021. – Omsk : Omsk State University of Railway Transport, 2021. P. 131–134.
 7. Butov E. S., Butakova M. A., Butov A. E. Optimization of the geometry of engagement of a heavily loaded tooth gear using the criteria of wear and score resistance of teeth // Journal of Friction and Wear. 2001. Vol. 22, No. 4. P. 394–399. ISSN 0202-4977.
 8. Golovanev V. A. The Use of Optimization Methods and Interactive Blocking Circuit When Choosing Displacement Ratios (corrections) of Cylindrical Involute Gear Transmissions of External Engagement [Primenenie optimizacionnykh metodov i interaktivnogo blokiruyushchego kontura pri vybore koehfficientov smeshcheniya (korrigirovanii) cilindricheskikh ehvol'ventnykh zubchatykh peredach vneshnego zacepleniya] // SAPR and Graphics. 2014. № 11 (217). P. 89–93. ISSN 1560-4640.
 9. Locomotive 2ES6 «Sinar» [Ehlektrovoz 2EHS6 «SinarA»] / edited by V. V. Berkson. – Verkhnyaya Pyshma : LLC «Ural Locomotives», 2015. 328 p. ISBN 978-5-89277-120-7.
 10. Test Report № 24LM-18-22. Testing gearwheel Sketch 2ES6.31.110.002 to Bending Fatigue Strength of Teeth. [Protokol ispytaniy №24LM-18-22. Provedenie ispytaniy kolesa zubchatogo chertezh 2EHS6.31.110.002 na izgibnuyu ustalostnuyu prochnost' zub'ev]. Kolomna : JSC «VNIKTI», 2022. 14 p.
 11. Test Report №24LM-29-22. Testing gearwheel Sketch 2ES6.31.110.002 to Contact Fatigue Strength of Teeth. [Protokol ispytaniy №24LM-29-22. Provedenie ispytaniy kolesa zubchatogo chertezh 2EHS6.31.110.002 na kontaktную ustalostnuyu prochnost' zub'ev]. Kolomna : JSC «VNIKTI», 2022. 23 p.
 12. Buinosov A. P., Sharapov A. T., Chepizhko M. S. Modernization of Methods of Calculation of Qualitative Indicators of the Engagement of an Electric Locomotive Traction Gear Transmission. [Sovershenstvovanie metodiki rascheta kachestvennykh pokazatelej zacepleniya tyagovoj zubchatoj peredachi ehlektrovoza]. // Scientific and Technical Vestnic of Povolzhie. 2021. № 10. P. 98–101. ISSN 2079-5920.

Статья сдана в редакцию 9 февраля 2024 года

В. В. Орехов

Оценка трансмиссионных масел, применяемых при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов

UDC 656.1/5

V. V. Orekhov

Evaluation of transmission oils, used in the operation of hydro mechanical bus gearboxes

Аннотация

В статье рассмотрена проблема периодичности замены трансмиссионных масел в гидромеханических коробках передач автобусов при регламентированных заводом-изготовителем сроках проведения технологических работ. Установленные сроки отрицательно влияют на эксплуатационную надёжность, эффективность и экономичность автобусов в городских условиях. Определены основные показатели физико-химических свойств трансмиссионных масел, применяемых при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов.

Проведен анализ применяемых трансмиссионных масел при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов. Рассмотрены требования технической документации при

эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов. Сведён список рассматриваемой технической документации гидромеханических коробок передач автобусов. По результатам лабораторных испытаний основных показателей физико-химических свойств свежих трансмиссионных масел, применяемых на автотранспортном предприятии, оценены полученные данные. Результаты подтверждены протоколами испытательного центра филиала АО «СЖС Восток Лимитед» (Санкт-Петербург).

Представлены ключевые графики основных показателей физико-химических свойств анализируемых масел и сравнительный график инфракрасных спектров рассматриваемых масел. Изложен научно-технический задел на дальнейшие

перспективные исследования в данной области.

Ключевые слова: автобус, гидромеханическая коробка передач, трансмиссионное масло, физико-химические свойства, инфракрасный спектр.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-101-109

Abstract

The article has considered the problem of the frequency of replacement for transmission oils in the hydromechanical gearboxes of buses with the terms of technological work regulated by the manufacturer. The established deadlines have a negative impact on the operational reliability, efficiency and economy of buses in urban conditions. The main indicators of the physico-chemical properties of transmission oils used in the operation of hydromechanical

Статья рекомендована к публикации В. Г. Назаркиным, канд. техн. наук, профессором Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. E-mail: nazarkin@lan.spbgasu.ru.

Виталий Владимирович Орехов, аспирант; кафедра «Технической эксплуатации транспортных средств» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vitalik.orehov95@mail.ru. ORCID 0000-0003-1604-6903.

© В. В. Орехов, 2024

The article has been recommended for publication by V.G. Nazarkin, Ph.D in Technical Sciences, Professor; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU). E-mail: nazarkin@lan.spbgasu.ru.

Vitalij Vladimirovich Orekhov, postgraduate student; Department of «Technical operation of vehicles», Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg, Russia. E-mail: vi-talik.orehov95@mail.ru. ORCID 0000-0003-1604-6903.

© V. V. Orekhov, 2024

transmission boxes of buses have been determined.

The analysis of the transmission oils used in the operation of hydromechanical transmissions of buses has been carried out. The requirements of the technical documentation for the operation of hydromechanical transmissions of buses have been considered. The list of considered technical documentation for hydromechanical transmissions of buses has

been summarized. The laboratory tests results of the main indicators for the physico-chemical properties of fresh transmission oils used at the automobile transport enterprise have been used to evaluate the obtained data. The results have been confirmed by the protocols of the testing center of the branch of JSC «SZHS Vostok Limited» (St. Petersburg).

The key graphs of the main indicators have been

presented physico-chemical properties of the analyzed oils and a comparative graph of the infrared spectra of the oils under consideration. The scientific and technical groundwork has been outlined for further promising research in this area.

Keywords: bus, hydromechanical transmission, transmission oil, physico-chemical properties, infrared spectrum.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-101-109

Для проведения исследований по оценке физико-химических свойств трансмиссионных масел гидромеханических коробок передач (ГМКП) автобусов определены основные показатели физико-химических свойств трансмиссионных масел ГМКП автобусов (таблица 1).

Оценка физико-химических свойств трансмиссионных масел ГМКП проводилась на базе подвижного состава СПб ГУП «Пассажиравтотранс» (ГУП ПАТ).

Подвижной состав исследуемого предприятия СПб ГУП «Пассажиравтотранс» состоит из автобусов различных марок, моделей и классов: среднего класса (СК), большого класса (БК) и особо большого класса (ОСБ), оборудованными различными марками и моделями ГМКП.

Спецификация масел для ГМКП автобусов ГУП ПАТ представлена в таблице 2.

В ГУП ПАТ эксплуатируется четыре марки различных ГМКП, но модельный ряд составляет 16 разновидностей. Для их эксплуатации применяются три марки масла, однако сервисный интервал замены масла варьируется от 60 до 240 тыс. км, и тут возникает вопрос: какое значение сервисного интервала замены масла рационально при равных условиях эксплуатации этого агрегата трансмиссии для его эффективной и надёжной работы?

Сервисный интервал замены масла для определенной ГМКП зависит от того, к какой классификации оно относится. Документацию об исследованиях сроков службы одобренных масел к применению при эксплуатации ГМКП автобусов в условиях мегаполиса заводы-изготовители ГМКП и заводы-производители масел не предоставляют из-за их отсутствия или коммерческой тайны. Следовательно, рациональность регламентированных сроков замены масел для ГМКП автобусов (таблица 2) требует проверки (длительные ресурсные исследования: мониторинг процесса изменений показателей физико-химических и триботехнических их свойств при подконтрольной эксплуатации).

Результаты лабораторных испытаний основных показателей физико-химических свойств масел без наработки, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов в ГУП ПАТ, представлены в таблице 3.

Эти масла имеют приближённо одинаковые индексы вязкости, что характеризует их равные вязкостно-температурные зависимости, однако лучшие вязкостные показатели содержит масло Shell Spirax S6 ATF295. Оно обладает хорошей кинематической вязкостью при 40 и 100 °С, а также при отрицательной температуре, имеет наименьшую динамическую вязкость, что говорит о меньшей нагрузке для прово- рачивания вращающихся деталей ГМКП

Таблица 1

Основные показатели физико-химических свойств трансмиссионных масел
ГМКП автобусов

Показатель	Характеристика
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	Вязкость является мерой жидкостного сопротивления потоку и характеризуется текучестью масла при заданной температуре [1]
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	Снижение вязкости может быть связано с разжижением масла. Увеличение вязкости может быть связано с перегревом масла или попаданием охлаждающей жидкости (гликоля) в масло
Индекс вязкости	Эмпирический безразмерный показатель, который оценивает зависимость вязкости жидкости от температуры Чем выше значение показателя, тем меньше зависимость вязкости жидкости от температуры, значит, лучше вязкостно-температурные свойства. С повышением числа индекса вязкости наклон кривой более пологий [2]
Вязкость динамическая при -40 °С (мПа · с)	Динамическая вязкость характеризуется текучестью масла в экстремальных условиях, то есть при низкой температуре, применительно к условиям холодного пуска трансмиссии, когда скорости сдвига слоёв масла близки к реальным. Данная вязкость обозначает потерю давления за единицу времени. Этот параметр снижается при росте температуры (т.е., когда среда нагревается, она течет легче) и повышается при отрицательной температуре, отрицательно влияя на давления в системе смазки [1]
Кислотное число (мгКОН/г)	В трансмиссионном масле содержатся кислотные компоненты, содержание которых определяется как в новом, так и работающем масле. Кислотные компоненты нового масла имеют особую кислотность, которая не оказывает значительного воздействия на коррозию металлов Данный показатель выражается через количество гидроксида калия (мгКОН), необходимого для нейтрализации слабых кислот в 1 г масла [2] В работающих маслах ГМКП он характеризует образование кислот при окислении масел, значение данного показателя увеличивается
Температура застывания, °С	Температура потери текучести масла при самых низких температурных пределах, но при которых масло еще обладает способностью течь и прокачиваться в каналах системы смазки агрегата. Показатель должен быть на ±5 °С выше действительной температуры затвердевания, при которой масло полностью теряет способность течь и прокачиваться
Температура вспышки в открытом тигле, °С	Наименьшая температура, при которой пары летучего вещества над его поверхностью вспыхивают в воздухе под воздействием источника зажигания. Характеризует огнеопасность масла, дает представление о характере углеводородов в нем, позволяет оценить степень разжижения масла и узнать о наличии примесей легкоиспаряемых компонентов
Плотность 15 °С, кг/м ³	Плотность влияет на количество циркулирующей жидкости в системе и напряжённость работы насоса, создающего давление жидкости в системе. С понижением плотности увеличивается риск интенсивного пенообразования, но стабильность пены уменьшается и наоборот, однако комплекс присадок может увеличить склонность к пенообразованию [1]

Окончание табл. 1

Показатель	Характеристика
Содержание воды (метод Фишера), %	Наличие воды выше допустимой нормы в трансмиссионном масле может привести к потенциальным проблемам (появление осадка, коррозия, быстрое окисление масла, гидролиз элементов присадок), что приведет к интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию и задирам пар трения. Наличие воды выше нормы усилит риск пенообразования [3]
Массовая доля механических примесей, % масс	Показатель дает количественную оценку, показывает чистоту масла по наличию в нём твердых частиц, которые вызывают износ деталей и участвуют в образовании отложений и шлама. Механические примеси удерживаются фильтром, однако частицы размером менее 25–40 мкм накапливаются в масле и участвуют в процессе износа
Массовая доля серы, %	Количество серы, содержащейся в масле Содержание серы частично говорит о природе нефти, из которого изготовили базовое масло с определенной степенью чистоты, и разновидности примененного пакета присадок, из которых произведено масло Типично для масла с присадками на салицилатах кальция (эффективный детергент), содержащих 0,2–0,26 % серы, (присадки на сульфонатах кальция содержат около 0,4 % серы). По высокому содержанию серы 0,5–0,6 % и выше можно предположить, что в масле есть минеральное масло первой группы (такое содержание серы характерно для полусинтетических масел) [3]
Коррозия медной пластинки, балл	Коррозия цветных металлов, применяемых в деталях ГМКП, оценивается на пластинках при выдерживании их в течение установленного времени в горячем масле с последующей визуальной оценкой повреждения поверхности и изменения цвета или структуры поверхности [1]
Элементная спектроскопия (21 химический элемент: Al, Ba, B, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, K, P, Na, Si, Ag, Sn, Ti, V, Zn), мг/кг	Анализ фокусируется на исследовании очень мелких частиц (< 5 мкм), определяя фактическое количественное наличие элементов присадок, частиц износа металлов и загрязняющих веществ при эксплуатации ГМКП [4]
Инфракрасная спектроскопия Фурье (поглощение), см ⁻¹	Анализ основан на воздействии инфракрасного света на различные молекулы масла, которые из-за своих типичных химических структур поглощают инфракрасный свет в разной степени и с определенными длинами волн. Метод позволяет оценить деградацию работающего масла. Проводится сравнительный мониторинг полученных спектров с эталонным спектром свежего масла для интерпретации степени деградации функциональных компонентов [5]

Таблица 2

Спецификация масел для ГМКП автобусов ГУП ПАТ

Обозначение спецификации трансмиссионного масла	Марка, модель/серия ГМКП	Маркировка	Сервисный интервал замены масла, тыс. км
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T310w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T325w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T375w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.3E	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.5	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.6	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D864.3E	RosneftKinetik ATF III	60
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1000B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1200B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 2 6AP1220B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1400B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1700B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 2 6HP502C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 4 6HP504C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 4 6HP594C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
Руководство по эксплуатации и обслуживанию FC6A145/185	FastGear FC6A145RB	Shell Spirax S6 ATF A295	60

и тем быстрее масло сможет прокачаться по масляным каналам к трущимся деталям, что не приведёт к локальному дефициту масла и форсированному износу, в частности, из-за питинковых перегревов.

Следует отметить, что это масло имеет наиболее высокую температурную стойкость к застыванию. Сильный состав противоизносных: фосфор (P), цинк (Zn), бор (B), противозадирных (фосфор (P), цинк (Zn), бор (B), сера (S), моющих или диспергирующих (кальций), антиокислительных (цинк (Zn), фосфор (P)), антикоррозионных (цинк (Zn), фосфор (P) присадок, и неплохое содержание модификатора трения (сера (S) и фосфор (P) для фрикционных дисков

(пакетов сцепления и тормозов). Снижаются случаи проскальзывания фрикционных дисков при прижатии их друг к другу (включение пакетов), шум, вибрация, повышается плавность работы всех узлов ГМКП.

Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой масел без наработки, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов в ГУП ПАТ, представлены на рис. 1.

Можно предположить, что сохраняемость ресурса функциональных свойств масла Shell Spirax S6 ATF A295 в течение эксплуатации намного дольше, чем у масел Shell Spirax S6 ATF ZM и Rosneft Kinetik ATF III. Однако

Таблица 3

Показатель		Стандарт метода испытаний	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF A295	Rosneft Kinetik ATF III
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с		ASTM D445-06 (ГОСТ Р 53708–2009)	10,12	7,374	7,748
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с			56,46	37,01	40,01
Индекс вязкости		ASTM D2270-10 (ГОСТ 32500–2013)	169,23	169,83	164,5
Вязкость динамическая при –40 °С, мПа·с		ASTM D 2983-21/ DIN 51398-83	25500	8040	12750
Кислотное число, (мг КОН/г)		ASTM D664-18 (ГОСТ 32327–2022)	0,74	0,9	0,56
Температура застывания, °С		ГОСТ 20287–91 Б	–57	–69	–48
Температура вспышки в открытом тигле, °С		ASTM D92-18	232	225	212
Плотность 15 °С, кг/м ³		ASTM D4052-22 (ГОСТ Р 57037–2016)	838,5	861,3	869,8
Содержание воды (метод Фишера), %		ASTM D6304-07 (ГОСТ Р 54281–2010)	0,0348	0,0077	0,0231
Массовая доля механических примесей, % масс		ASTM D473-2022	0	0	0
Массовая доля серы, %		ASTM D 4294-10 (ГОСТ 32139–2013)	0,082	0,082	0,045
Коррозия медной пластинки, балл		ASTM D 130-10 (ГОСТ 32329–2013)	1a	1a	1a
Элементная спектрометрия (массовая доля химического элемента)	фосфор P, мг/кг	ASTM D 5185-18	174	540	324
	кальций Ca, мг/кг		29	176	30
	цинк Zn, мг/кг		3	10	263
	бор B, мг/кг		76	5	78

о каком-то конкретном значении срока службы масла по рассмотренным показателям без проведения подконтрольных ресурсных испытаний в реальных условиях эксплуатации системы «среда – агрегат – масло» говорить нельзя.

Также проведена оценка базовых масел, входящих в общий состав масел, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов в ГУП ПАТ. Оценка проведена с помощью метода инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье по стандарту ASTM E2412-2023.

Пример сравнительного графика спектров нефтяного и синтетического масел представлен на рис. 2 [6].

Из рис. 2 видно, что пики поглощения инфракрасного света в диапазоне волновых чисел от 1390 до 1090 см⁻¹ характеризуют основу примененного в рецептуре базового масла (нефтяная или синтетическая основа); по характерным значениям единиц поглощения в определенном спектре, образующих графическое описание, можно определить его группу по API 1509-22 [7].

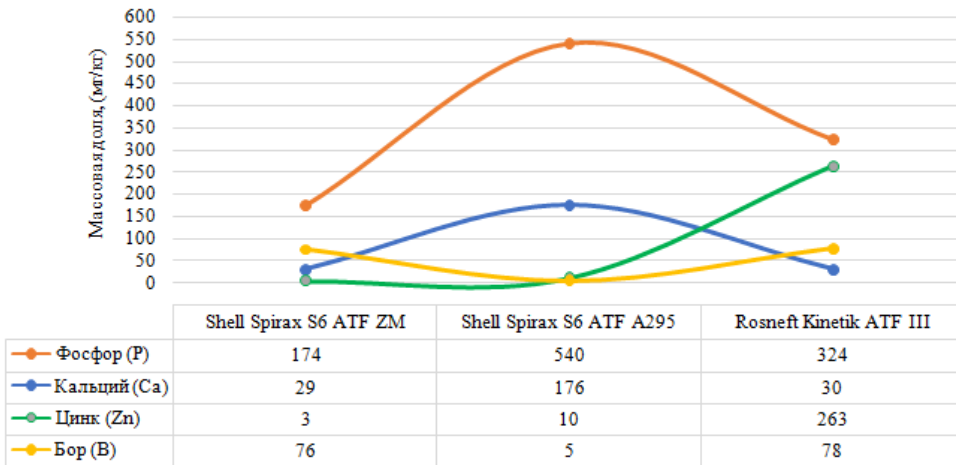


Рис. 1. Результаты атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой масел без наработки, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов в ГУП ПАТ

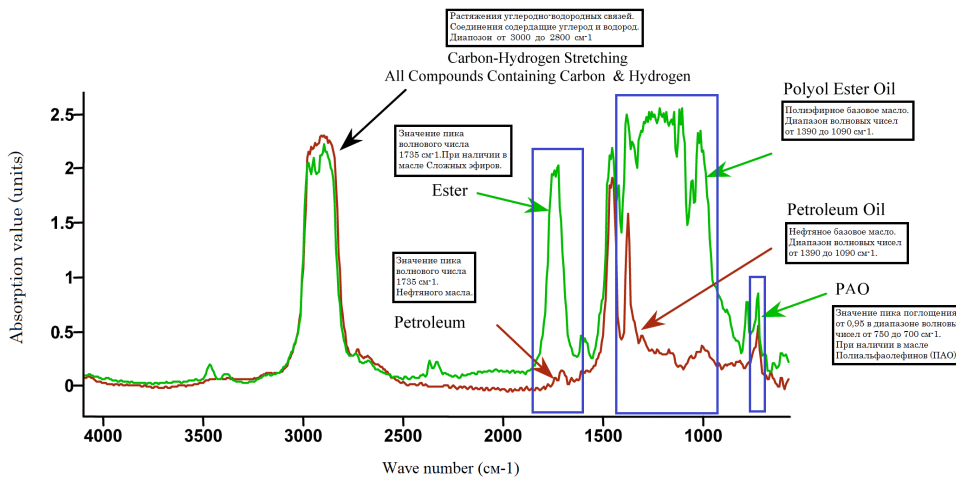


Рис. 2. Сравнительный график спектров нефтяного и синтетического масел

От того, к какой группе относится примененное в рецептуре базовое масло, зависит итоговое качество всего смазочного продукта и, следовательно, срок его службы в процессе конкретных условиях эксплуатации.

График сравнения инфракрасных спектров оцениваемых масел без наработки представлен на рис. 3.

Итак, оцениваемые марки масел имеют практически равные базовые масла, которые относятся к нефтяной основе третьей группы по стандарту

API 1509, в которую относят масла, полученные из нефти с помощью гидрокрекингового метода очистки с применением катализаторов [8].

Однако на графике масла Shell Spirax S6 ATF ZM есть отметка пика спектра выше 0,5 ед. поглощения на волновом числе 1735 см^{-1} , что говорит о минимальном наличии сложных эфиров в составе (улучшаются его смазывающие свойства и прочностные свойства масляной пленки).

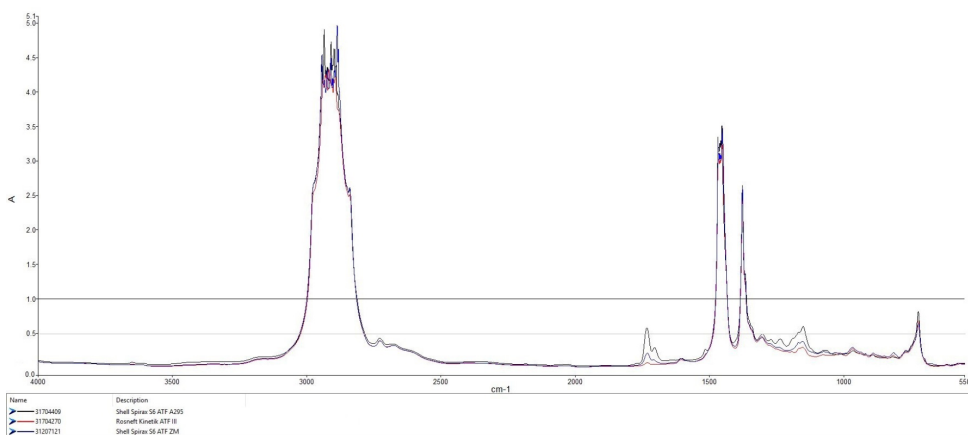


Рис. 3. График сравнения инфракрасных спектров оцениваемых масел без наработки

В результате проведенных исследований получены показатели физико-химических свойств (вязкость кинематическая и динамическая, кислотное число, температура застывания, температура вспышки в открытом тигле, массовая доля механических примесей, плотность, массовая доля химических элементов присадок) трансмиссионных масел S6 ATF A295, Shell Spirax S6 ATF ZM и Rosneft Kinetik ATF III без наработки, применяемых при эксплуатации

ГМКП автобусов. Также определены их базовые масла, которые относятся к нефтяной основе.

Таким образом, необходимо объективно корректировать срок сервисного интервала исходя из фактического состояния масла и реальных условий эксплуатации ГМКП. Для корректировки требуется разработать корректирующий коэффициент, который позволит в процессе эксплуатации автобусов повысить надёжность ГМКП. ▣

Литература

1. Джерихов В. Б. Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие. Ч. II. Масла и смазки. – Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т. – СПб, 2009. – 256 с. ISBN 978-5-9227-0135-8.
2. Балтенас Р. Моторные масла / Р. Балтенас, А. С. Сафонов, А. И. Ушаков, В. Шергалис. – М.-СПб : Альфа-Лаб, 2000. – 272 с. ISBN 5-7713-0028-4.
3. Балтенас Р. Трансмиссионные масла. Пластичные смазки / Р. Балтенас, А. С. Сафонов, А. И. Ушаков, В. Шергалис / СПб : ООО «Изд-во ДНК», 2001. – 208 с. ISBN 5-7624-0056-5.
4. Фитч Дж. Анализ масел. Основы и применение / Дж. Фитч, Д. Тройер ; Пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. Е. А. Новикова, М. В. Кирюхина. – СПб : Профессия, 2015. – 166 с. ISBN 978-5-91884-064-1.
5. Смирнова Н. Н. Инфракрасная спектроскопия в химии высокомолекулярных соединений : учеб. пособие / Н. Н. Смирнова, В. Ю. Чухланов ; Владимирский гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 84 с. ISBN 978-5-9984-1406-0.
6. ASTM E2412-23 Стандартная методика мониторинга состояния смазок, находящихся в эксплуатации, методом анализа трендов с помощью инфракрасной спектроскопии на основе преобразования Фурье (FT-IR).
7. Nicodom ir Oils and Lubricants (1038 IR transmission + 538 ATR spectra). URL: http://www.ir-spectra.com/2012/indexes/index_p.htm (дата обращения: 13.11.2023).
8. Богомолов А. И. Химия нефти и газа : учеб. пособие / А. И. Богомолов, А. А. Гайле, В. В. Громова, А. Е. Драбкин [и др.] ; Под ред. В. А. Проскурнякова, А. Е. Драбкина. – СПб : Химия. – 3-е изд., доп. и испр. 1995. – 448 с. ISBN 5-7245-1023-5.

Referens

1. Dzherihov V. B. Automotive performance materials [Avtomobil'nye ekspluatatsionnye materialy]: tutorial. V. II. Oils and lubricants. – Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering – St. Petersburg, 2009. – 256 p. ISBN 978-5-9227-0135-8.
2. Baltenas R. Motor oils [Motornye masla] / R. Baltenas, A. S. Safonov, A. I. Ushakov, V. Shergalis. – M.-St. Petersburg: Alfa-Lab, 2000. – 272 p. ISBN 5-7713-0028-4.
3. Baltenas R. Transmission oils. Plastic lubricants [Transmissionnye masla. Plastichnye smazki] / R. Baltenas, A. S. Safonov, A. I. Ushakov, V. Shergalis / St. Petersburg : DNA Publishing House LLC, 2001. – 208 p. ISBN 5-7624-0056-5.
4. Fitch J. Oil analysis. Base and substitution [Analiz masel. Osnovy i primeneniye] / J. Fitch, D. Troyer; translated from English. the 2nd ed., edited by E. A. Novikova, M. V. Kiryuhina. – SPB Proffesia, 2015. – 166 p. ISBN 978-5-91884-064-1.
5. Smirnova N. N. Infrared spectroscopy in the chemistry of high molecular weight compounds: tutorial [Infrakrasnaya spektroskopiya v himii vysokomolekulyarnykh soedineniy] / N. N. Smirnova, V. Yu. Chukhlanov; Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletov. – Vladimir : Publishing House of the All-Russian State University, 2021. – 84 p. ISBN 978-5-9984-1406-0.
6. ASTM E2412-23 The standard technique for monitoring the condition of lubricants in operation by trend analysis using infrared spectrometry based on the Fourier transform (FT-IR).
7. Nicodom ir Oils and Lubricants (1038 IR transmission + 538 ATR spectra). URL: http://www.ir-spectra.com/2012/indexes/index_p.htm (data accessed: 13.11.2023).
8. Bogomolov A. I. Oil and gas chemistry [Himiya nefti i gaza]: tutorial/ A. I. Bogomolov, A. A. Geile, V. V. Gromova, A. E. Drabkin, etc.; edited by V. A. Proskurnyakova, A. E. Drabkina. – St. Petersburg : Chemistry. – 3rd ed., revised and enlarged. 1995. – 448 p. ISBN 5-7245-1023-5.

Статья сдана в редакцию 4 декабря 2023 года

УДК 625.122

Ю. С. Меркурьев

Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Динамический расчет по акселерограмме

UDK 625.122

Yu. S. Merkuryev

Modelling of a seismic impact on a roadbed with a damping layer. Dynamic calculations according to an accelerogram

Аннотация

Рассмотрена проблема математического моделирования сейсмического воздействия на земляное полотно железной дороги; моделирование проводилось с применением сгенерированной акселерограммы. Расчеты напряженно-деформированного состояния земляного полотна при землетрясении проведены в программном комплексе GEO5 МКЭ.

Приведены значения напряжений и деформаций в конструкции земляного полотна при различных геометрических параметрах расчетной схемы, физико-механических и динамических свойствах грунтов. Определен характер влияния этих факторов на напряженно-деформированное состояние при землетрясении.

Обоснована эффективность применения метода конечных элементов для динамических расчетов грунтового сооружения с учетом сейсмического воздействия.

Рассчитаны конструкции земляного полотна с демпфирующим слоем, введенным для снижения негативного влияния сейсмике. Определены зависимости напряжений и деформаций в земляном полотне от параметров демпфирования. Установлена возможность уменьшения деформаций и напряжений в земляном полотне при сейсмическом воздействии с помощью устройства демпфирующего слоя или использования в качестве материала для насыпи грунта с определенными динамическими и физико-механическими характеристиками.

Ключевые слова: земляное полотно, сейсмическое воздействие, акселерограмма, демпфирующий слой, напряженно-деформируемое состояние.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-110-119

Abstract

The problem of modelling of a seismic impact on a railway roadbed is examined. The modelling was conducted with the use of a generated accelerogram. Calculations of the stress-strain state of the roadbed during an earthquake are made with the GEO5 FEM program complex.

The stress and deformation values in the construction of the roadbed considering several geometric parameters of the calculation scheme, physical and dynamical properties of soil are presented. The nature of the impact of these factors on the stress-strain state during an earthquake is detected.

The effectiveness of the use of the finite-element method for the dynamic calculations of a soil construction considering the seismic impact is reasoned.

The soil constructions with a damping layer serving to reduce the seismic negative effect are calculated. The dependences of stresses and deformations in the roadbed on the damping parameters are detected. The possibility to reduce the deformations and stresses in the roadbed during a seismic impact with the use of the damping layer or the use into the qualities of the material for the soil mounds with definite dynamical and physical characteristics is established.

Keywords: roadbed, seismic impact, accelerogram, damping layer, stress-strain state.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-110-119

Статья рекомендована к публикации А. Ф. Колосом, канд. техн. наук, доцентом; Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. E-mail: kolos@pgups.ru.

Юрий Сергеевич Меркурьев, ведущий инженер-проектировщик отдела путей и сооружений, АО «Ленгипрострой»; Санкт-Петербург, Россия. E-mail: merku50@mail.ru. ORCID 0009-0004-2891-2818.

© Ю. С. Меркурьев, 2024

The article is recommended for publication A. F. Kolos, PhD, associate professor; Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. E-mail: kolos@pgups.ru.

Yuriy Sergeevich Merkuryev, leading design engineer, Department of track and structures, JSC «Lengiprostroy»; St. Petersburg, Russia. E-mail: merku50@mail.ru. ORCID 0009-0004-2891-2818.

© Yu. S. Merkuryev, 2024

Землетрясение – динамический процесс, при котором сейсмическая волна постепенно проходит от места образования (в гипоцентре) к основанию и далее, к железнодорожному пути (состоящему из земляного полотна, верхнего строения пути, противодеформационных и других сооружений [1]). Принципиальная особенность землетрясения заключается в его волновом характере, что требует учета при расчётах напряженно-деформированного состояния (НДС) земляного полотна.

Псевдостатический подход метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования воздействия землетрясения на земляное полотно дорожной насыпи недостаточен [2], также недостаточен и аналитический метод расчёта (закрепленный в нормативных документах [3–5]).

Для адекватного отражения природы сейсмического воздействия необходимо корректно учитывать процесс последовательного перехода энергии волны от нижних слоев схемы к верхним (основание – земляное полотно – верхнее строение пути). Такой учёт возможен при проведении динамического расчёта МКЭ, принцип моделирования землетрясения в котором состоит в приложении к нижней границе схемы соответствующих интенсивности землетрясения ускорений и далее постепенной передаче этого воздействия к вышележащим слоям.

Общие положения.

Исходные данные расчета

Для расчетов принята конструкция насыпи высотой 15 м с бермами шириной 4 м и крутизной откосов 1:1,5–1:1,75–1:2. В качестве грунта основания и насыпи земляного полотна принят песок средней крупности. Грунт задаётся через модель Мора – Кулона с основными характеристиками из [2] (таблица 1).

Для динамического анализа требуется задать дополнительные динамические параметры грунта: динамический модуль упругости $E_{\text{дин}} = 200$ МПа (определяется по [6]) и коэффициент относительного затухания $\xi = 5\%$ (методика определения описана в работе [7]).

На поверхности основной площадки земляного полотна (ОПЗП) действуют нагрузки 90 кН/м (от подвижного состава) шириной 3 м и 15 кН/м (от верхнего строения пути) шириной 5 м. Сетка конечных элементов принята с длиной ребра 3 м.

Очень важен размер расчетной схемы при динамическом расчёте, т.к. ускорение по акселерограмме прикладывается к нижней границе всей расчетной схемы. При увеличении размера расчетной схемы (т.е. приближении её к реальному размеру) увеличивается не только время одного расчёта, но и изменяются значения выходных показателей, формы изоповерхностей перемещений (потенциальных поверхностей

Таблица 1

Исходные характеристики материала земляного полотна и основания

Показатель, обозначение, ед. измерения	Величина показателя
Удельный вес грунта, γ , кН/м ³	18,0
Угол внутреннего трения, φ , град	36
Удельное сцепление грунта, c , кПа	3,0
Коэффициент Пуассона, ν , д.е.	0,3
Модуль деформации, $E_{\text{деф}}$, МПа	32,0
Модуль разгрузки, $E_{\text{уз}}$, МПа	100,0
Угол дилатансии, ψ , град	6

скольжения). Оптимальный размер расчетной схемы определяется расчетом.

Граничное условие задается фиксированным, т.е. нижняя граница модели отражает волну обратно в модель, что соответствует обстоятельству, когда модель усекается на разделе между относительно податливым слоем грунта и твердым скальным основанием. На боковых границах модели используются так называемые граничные условия свободного поля, которые предотвращают отражение исходящих механических волн обратно в модель [8].

В исследовании используется синтезированная акселерограмма землетрясения интенсивностью 7 баллов. Для синтеза акселерограммы вводится основной параметр

землетрясения: ускорение в уровне основания $1,0 \text{ м/с}^2$ [9]. Задаётся только горизонтальная составляющая сейсмического воздействия [2]. Сгенерированная акселерограмма приведена на рис. 1.

При динамическом расчете землетрясения в программе ГЕО5 МКЭ нет возможности оценивать степень устойчивости конструкции в какой-либо критический момент. Однако во время динамического расчёта отсековой модели аналитическим методом коэффициент устойчивости снижается менее единицы (рис. 2) [10]. Но это вовсе не означает, что сооружение может быть разрушено: во-первых, процесс землетрясения длится несколько секунд, во-вторых, коэффициент устойчивости – это условная инженерная оценка.

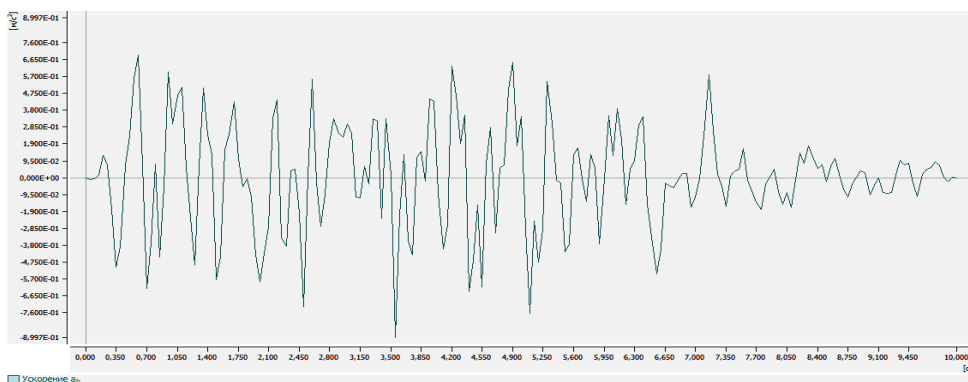


Рис. 1. Сгенерированная акселерограмма для землетрясения 7 баллов

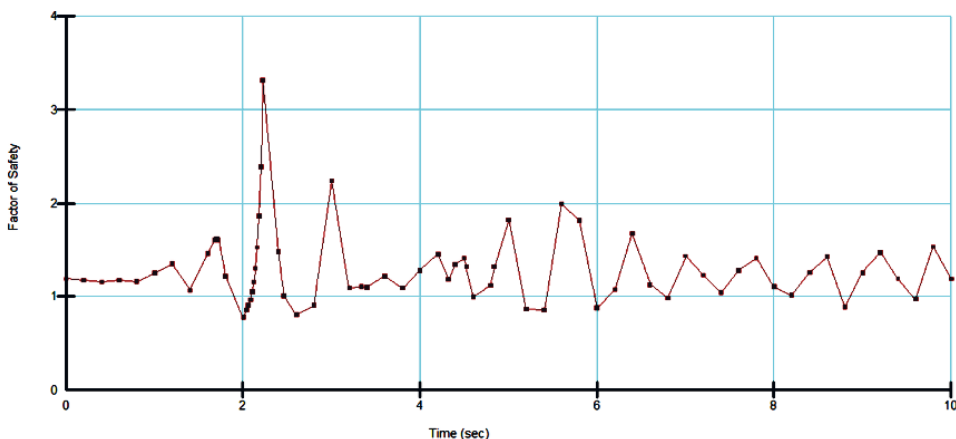


Рис. 2. Пример изменения коэффициента устойчивости $K_{уст}$ при динамическом расчете (аналитический метод Ньюмарка)

На рис. 2 видно, что $K_{уст}$ до и после расчета примерно одинаковый; минимальные значения зафиксированы в процессе динамического расчёта.

Таким образом, полностью динамический расчёт пригоден, скорее, для оценки второго предельного состояния, которое тоже имеет допустимые значения: перемещения и напряжения в конструкции.

В настоящем исследовании для анализа выбраны результирующее перемещение d , мм (данные приводятся для зоны ОПЗП) и полное главное напряжение σ_1 , кПа (приводятся максимальные значения в пределах поперечного сечения земляного полотна).

По результатам динамического расчёта видно, что окончательные абсолютные значения перемещений ОПЗП (до 15 мм) значительно меньше получаемых в момент пиковых значений (50–70 мм). Это означает, что при землетрясении конструкция земляного полотна может сильно деформироваться, но в итоге сохранить целостность и не разрушиться.

Исходная конструкция без демпфирующего слоя с учетом сеймики

Результаты динамического моделирования землетрясения интенсивностью

7 баллов для исходной конструкции с разными размерами слоя основания в виде максимальных значений перемещений в уровне основной площадки и напряжений в уровне подошвы насыпи приведены в таблице 2.

Отдельно стоит пояснить методику определения величин перемещений в уровне основной площадки. При анализе промежуточных изоповерхностей перемещений видно, что вся расчетная схема имеет довольно большие смещения: 43 мм на нижней границе и 60 мм в уровне основания насыпи, т. е. при динамическом анализе перемещается вся расчетная схема (рис. 3). Таким образом, следует учитывать не абсолютные перемещения основной площадки (74 мм), а значения относительно основания (74 – 60 = 14 мм) – фактическое изменение геометрии только насыпи.

При анализе полученных в таблице 2 результатов трудно однозначно выявить чёткую зависимость получаемых параметров НДС от размеров и пропорций расчетной схемы. Однако можно сказать, что с увеличением высоты расчетной области увеличиваются итоговые абсолютные перемещения самого верхнего сечения – основной площадки земляного полотна. Также есть сдвиг по моменту времени достигаемых максимумов.

Таблица 2

Результаты динамического расчета НДС исходной конструкции

Показатель НДС			Время по акселерограмме t , с	Размеры расчетной схемы (ширина/глубина)					
				100/1	100/30	100/50	200/1	200/30	200/50
Результирующие перемещения в уровне ОПЗП (абс/отн)	ldl	мм	2,2	49/4	74/14	54/3	48/3	76/16	53/3
			3,6	40/4	52/12	52/3	40/3	62/18	54/3
			4,5	46/5	61/11	71/8	45/4	68/14	74/8
			5,3	50/5	63/11	66/4	45/4	86/23	72/6
			10	4/4	5/5	4/4	4/4	16/16	7/3
Полное главное напряжение в основании	$\sigma_{1,tot}$	кПа	2,2	210	200	120	40	225	120
			3,6	210	200	120	42	225	120
			4,5	180	175	160	40	200	160
			5,4	150	150	160	40	225	160
			10	50	125	120	32	125	120

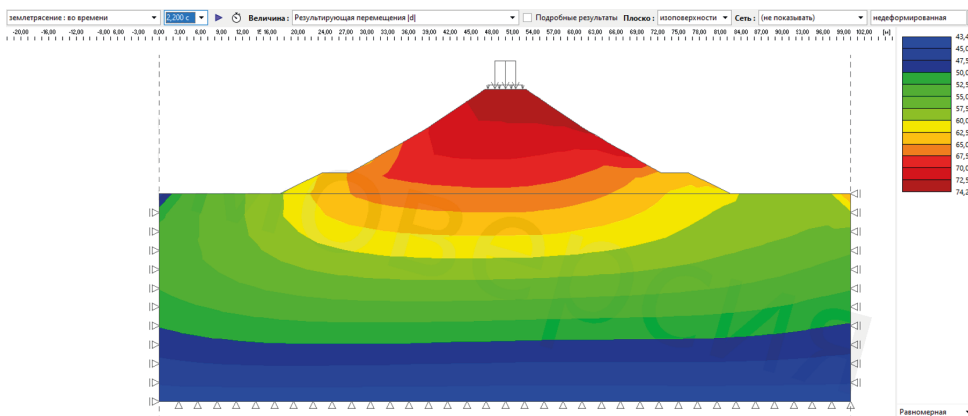


Рис. 3. Промежуточное ($t = 2,2$ с) деформированное состояние схемы 100×30 м. Изоповерхности результирующих перемещений, мм

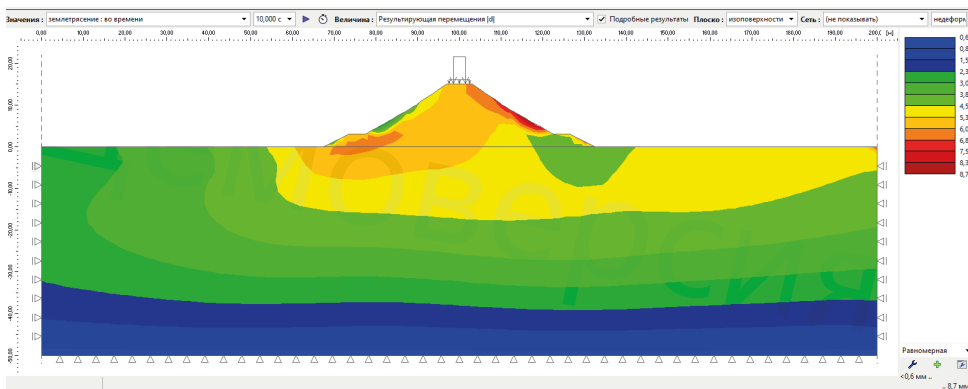


Рис. 4. Конечное ($t = 10$ с) деформированное состояние схемы 200×50 м. Изоповерхности результирующих перемещений, мм

Здесь очень важна корректность отображения перемещений в поперечном сечении расчетной схемы (рис. 4). Наглядно видна сформированная поверхность скольжения. А при исключении из расчета слоя основания (схемы 100/1 и 200/1) не формируется поверхность скольжения, которая, очевидно, должна иметь очертания, получаемые в ходе аналитического и псевдостатического МКЭ расчетов (схемы 100/30, 100/50 и 200/30, 200/50).

Для дальнейших расчетов принимается схема с основанием шириной 100 м и глубиной 30 м, потому что: а) формируется поверхность скольжения, б) моделируется слой основания, в котором генерируется прохождение

сейсмической волны от жесткого скального основания к земляному полотну, в) размеры схемы принимаются относительно минимальными для ускорения расчётов.

Демпфирование земляного полотна. Изменение физико-механических характеристик материала всей насыпи

На этом этапе моделирования всей конструкции насыпи присваиваются соответствующие свойства грунта. Выявляются зависимости перемещений и напряжений от свойств материала (удельного веса, угла внутреннего трения и сцепления) при моделировании землетрясения акселерограммой.

Таблица 3

Результаты динамического расчета при различных физико-механических характеристиках материала земляного полотна

Показатель	t	Основные характеристики материала земполотна							
		$\gamma = 18$ $\varphi = 36$ $c = 3$	$\gamma = 16$ $\varphi = 36$ $c = 3$	$\gamma = 20$ $\varphi = 36$ $c = 3$	$\gamma = 18$ $\varphi = 30$ $c = 3$	$\gamma = 18$ $\varphi = 40$ $c = 3$	$\gamma = 18$ $\varphi = 36$ $c = 10$	$\gamma = 18$ $\varphi = 36$ $c = 20$	$\gamma = 16$ $\varphi = 40$ $c = 20$
Результатирующие перемещения в уровне ОПЗП, d , мм	2,2	74/14	74/14	75/15	80/24	74/14	74/14	74/14	74/14
	3,6	52/12	50/11	56/21	100/66	42/11	53/15	49/11	53/15
	4,5	61/11	60/10	66/16	137/87	60/10	61/11	60/10	61/11
	5,3	63/11	72/10	72/18	151/106	66/11	66/11	66/11	66/9
	10	5/5	5/5	12/12	180/180	3/3	0	0	0
Полное главное напряжение в основании, $\sigma_{1,tot}$, кПа	2,2	200	200	210	200	200	200	210	225
	3,6	200	200	240	200	175	200	210	210
	4,5	175	175	180	175	175	150	150	175
	5,4	150	150	175	175	175	175	120	175
	10	125	125	150	150	125	100	150	125

Результаты расчётов сведены в таблицу 3. В первом столбце (со значениями $\gamma = 18$, $\varphi = 36$ и $c = 3$) приводятся показатели НДС, полученные для исходной конструкции насыпи без демпфирования.

При анализе таблицы 3 видно, что сцепление грунта не оказывает столь значимого влияния на перемещение и напряжение, как на устойчивость. Уменьшение удельного веса грунта снижает деформацию и напряжения. Увеличение угла внутреннего трения существенно ослабляет деформацию сооружения; совмещение всех позитивных влияний (столбец со значениями $\gamma = 16$, $\varphi = 40$ и $c = 20$) не даёт существенного улучшения относительно исходного материала земляного полотна.

Демпфирование земляного полотна. Изменение динамических характеристик насыпи

Произведены динамические расчёты для выявления зависимости НДС земляного полотна от динамических

характеристик, задаваемых в модели Мора – Кулона: модуль деформации $E_{\text{деф}}$, модуль разгрузки/нагрузки $E_{\text{ур}} \approx 3E_{\text{деф}}$, динамический модуль упругости $E_{\text{дин}} \approx 2E_{\text{ур}}$, коэффициент относительного затухания ξ .

Несмотря на то, что модули деформации $E_{\text{деф}}$ и разгрузки $E_{\text{ур}}$ являются механическими параметрами при статической (условно моментальной) нагрузке, они взаимосвязаны с динамическим модулем упругости $E_{\text{дин}}^*$.

Результаты расчётов сведены в таблицу 4. В «шапке» таблицы представлены значения только изменяющихся показателей.

По результатам анализа таблицы 4 можно сделать следующие выводы.

1. На НДС сильнее всего влияет коэффициент относительного затухания ξ . При его увеличении снижаются и абсолютные, и относительные перемещения основной площадки, меньшими становятся и напряжения.

2. Модуль деформации $E_{\text{деф}}$, модуль разгрузки $E_{\text{ур}}$ и динамический модуль $E_{\text{дин}}$ в связке уменьшают перемещения

* Эти параметры изменяются одновременно с соблюдением ориентировочного соотношения $E_{\text{дин}} \approx 2E_{\text{ур}} \approx 6E_{\text{деф}}$.

Таблица 4

Результаты динамического расчета при различных динамических характеристиках материала земляного полотна

Показатель	t, с	Исходные показатели	Динамические характеристики материала земляного полотна					Комбинированные характеристики		
			$\xi = 50$	$\xi = 100$	$E_{деф} = 50$ $E_{ур} = 150$ $E_{дин} = 300$	$E_{деф} = 100$ $E_{ур} = 300$ $E_{дин} = 600$	$\xi = 100$ $E_{деф} = 100$ $E_{ур} = 300$ $E_{дин} = 600$	$\gamma = 16$ $\varphi = 40$ $c = 20$ $\xi = 100$ $E_{деф} = 100$ $E_{ур} = 300$ $E_{дин} = 600$	$\varphi = 40$ $c = 20$ $\xi = 100$	
Результирующие перемещения в уровне ОПЗП, d, мм (абс/отн)	2,2	$\gamma = 18$ $\varphi = 36$ $c = 3$ $\xi = 5$ $E_{деф} = 32$ $E_{ур} = 100$ $E_{дин} = 200$	62/6	57/5	72/12	69/9	57/4	59/2	59/4	
	3,6		42/7	37/5	51/12	48/8	44/2	38/3	35/5	
	4,5		56/8	49/7	60/10	60/8	50/5	50/3	50/3	
	5,3		58/7	56/4	60/10	59/9	55/5	56/2	56/4	
	10		0	0	10/10	7/7	0	1/0	0	
Полное главное напряжение в основании, $\sigma_{1,гор}$, кПа	2,2		125	125	225	250	200	150	150	
	3,6		150	125	225	200	175	175	150	
	4,5		125	125	175	200	175	150	150	
	5,4		150	125	175	225	175	150	150	
	10		100	100	100	125	150	150	100	

(так же, как и ξ), но при этом напряжения сохраняются примерно теми же.

3. Совмещение позитивных влияний всех динамических характеристик менее эффективно, чем увеличение только коэффициента относительного затухания; сохраняется снижение перемещений, но напряжения в некоторые моменты увеличиваются.

Как в аналитической постановке, так и при псевдостатическом подходе в МКЭ невозможно определить влияние динамических характеристик ($E_{дин}$, ξ) на устойчивость. В обоих случаях эти показатели не участвуют в расчёте устойчивости, и получаемый коэффициент не изменен при любых значениях $E_{дин}$ и ξ .

Определение оптимальных параметров демпфирования

По результатам моделирования МКЭ выявлено, что в условиях сейсмического воздействия сильнее всего на НДС земляного полотна влияет коэффициент относительного затухания ξ .

В зависимости от характера расположения демпфирующих слоев в конструкции земляного полотна определены параметры НДС. Слои заданы разной мощностью и расположены на разной

высоте от основания. Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

При анализе результатов расчёта видно, что чем ближе к нижней границе расчетной схемы (т.е. к источнику сейсмического воздействия) находится демпфирующий слой, тем меньше итоговые перемещения на её верхней границе (т.е. на основной площадке земляного полотна). Здесь очевидна обратная зависимость величины перемещений и деформаций от мощности демпфирующего слоя.

Но чем ниже в конструкции располагается слой демпфирования, тем больше его объем. Следовательно, необходимо определять оптимальное положение демпфирующего слоя для одновременного достижения безопасных показателей НДС и минимальных объемов работ в каждом конкретном случае (в зависимости от инженерно-геологических характеристик основания и физико-механических характеристик материала насыпи).

Выводы по динамическим расчётам методом конечных элементов с применением акселерограммы

МКЭ позволяет учесть различия в поведении материала при нагрузке

Таблица 5

Результаты динамического расчета земляного полотна при различной мощности и расположении демпфирующего слоя

Показатель	t, c	Исходная конструкция	Отметки расположения демпфирующего слоя $\xi = 100 \%$						
			0–3	3–6	6–9	0–6	3–9	0–9	0–3, 6–9
Результирующие перемещения в уровне ОПЗП, d , мм (абс/отн)	2,2	74/14	67/9	68/10	69/11	64/6	65/9	62/5	64/8
	3,6	52/12	45/9	45/9	48/8	43/8	43/8	40/5	47/8
	4,5	61/11	59/9	59/9	59/9	46/7	56/8	53/7	52/8
	5,3	63/6	63/9	63/8	66/11	60/8	60/12	60/7	60/10
	10	5/5	4/4	4/4	4/4	3/3	0	0	0
Полное главное напряжение в основании, $\sigma_{1,тол}$, кПа	2,2	200	175	200	200	150	175	125	175
	3,6	200	150	175	175	150	150	125	150
	4,5	175	150	150	150	125	150	125	150
	5,4	150	150	175	175	150	175	150	150
	10	125	75	75	125	100	100	100	100

и разгрузке, что важно в циклическом нагружении (сейсмическом воздействии). Нелинейные модели помимо упругой (восстанавливаемой) описывают развитие пластической (необратимой) деформации материала. Размер расчетной схемы сильно влияет на значения всех выходных показателей, в т.ч. и на формирование поверхности скопления.

Динамические характеристики ($E_{\text{дин}}$, ξ) не влияют на коэффициент устойчивости, следовательно, динамический расчёт пригоден для оценки второго предельного состояния по перемещениям и напряжениям в конструкции. Для корректной оценки следует учитывать не абсолютные значения перемещений основной площадки, а перемещения относительно основания земляного полотна, т.к. при динамическом анализе колебаниям подвержена вся расчетная схема.

На НДС при сейсмическом воздействии сильней всего влияет коэффициент относительного затухания ξ . Чем ближе демпфирующий слой расположен к источнику сейсмического воздействия, тем эффективней его применение.

Заключение

Учёт действия землетрясения в аналитической постановке возможен только псевдостатическим методом. Оценка производится по первому предельному состоянию через определение коэффициента устойчивости и последующее сравнение с нормативным критерием; динамические характеристики грунта никак не учитываются.

МКЭ позволяет оценить надежность конструкции земляного полотна как по первому, так и по второму предельному состоянию в одной расчетной схеме. Коэффициенты устойчивости, получаемые в МКЭ, коррелируют с аналитическими значениями. Одновременно с этим надежность конструкции оценивается через определение перемещений и напряжений; учитываются динамические свойства грунта, что позволяет осуществлять демпфирование.

Добиться большей надежности сооружения можно через укладку демпфирующих слоёв в основании земляного полотна. Допустимо как существенно снижать временные колебания поверхности основной площадки, так и исключать деформации по завершении сейсмического воздействия. ■

Литература

1. ГОСТ 34530-2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167867> (дата обращения: 02.08.2023).
2. Меркурьев Ю. С. Моделирование сейсмического воздействия на земляное полотно с демпфирующим слоем. Сравнение аналитического и конечно-элементного методов // Вестник УрГУПС. 2023, № 4 (60). – С. 122–134. ISSN 2079-0392.
3. СП 238.1326000.2015. Железнодорожный путь. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124323> (дата обращения: 01.08.2023).
4. СП 472.1325800.2019. Арматурные системы мостов и подпорных стен на автомобильных дорогах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564543318> (дата обращения: 01.08.2023).
5. ОДМ 218.2.053-2015. Рекомендации по оценке сейсмического воздействия при определении устойчивости оползневых участков автомобильных дорог. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200125032> (дата обращения: 01.08.2023).
6. ГОСТ Р 56353-2022. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923> (дата обращения: 02.08.2023).
7. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Engin H. K. Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands // Conference 7th Numerical methods in geotechnical engineering. At Trondheim, Norway. 2010. P. 137–142.
8. Ezzatyazdi P., Jahankhah H. Practical suggestions for 2d finite element modeling of soil-structure interaction problems // Second European conference of earthquake engineering and seismology, Istanbul. Aug. 25–29, 2014. URL: <https://www.researchgate.net/>

- publication/308120333_practical_suggestions_for_2d_finite_element_modeling_of_soil-structure_interaction_problems. (дата обращения: 31.07.2023).
9. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (дата обращения: 01.08.2023).
 10. Расчёт устойчивости после динамического расчёта. URL: <https://plaxisrussia.notion.site/de26c8c38cfa4684bfec54cfcc27b54> (дата обращения: 31.07.2023).

References

1. GOST 34530-2019. Railway transport. Main definitions. [Transport zheleznodorozhnyj. Osnovnye ponyatiya]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200167867> (date of access: 02.08.2023).
2. Merkuriev Y. S. Modelling of a seismic impact on a roadbed with a damping layer. Comparison of analytical and finite-element method. [Modelirovanie sejsmicheskogo vozdeystviya na zemlyanoe polотно s dempfiroyushchim sloem. Sravnenie analiticheskogo i konechno-elementnogo metodov] // Vestnik USURT. 2023, № 4 (60). – С. 122–134. ISSN 2079-0392.
3. SP 238.1326000.2015. Railway. [Zheleznodorozhnyj put]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124323> (date of access: 01.08.2023).
4. SP 472.1325800.2019. Armagrandi systems of bridges and automobile roads retaining walls. [Armogruntovye sistemy mostov i podpornykh sten na avtomobil'nykh dorogakh]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564543318> (date of access: 01.08.2023).
5. ODM 218.2.053-2015. Recommendations for valuation of a seismic impact during the detection of sustainability of roads landslides. [Rekomendacii po ocenke sejsmicheskogo vozdeystviya pri opredelenii ustojchivosti opolznevnykh uchastkov avtomobil'nykh dorog] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200125032> (date of access: 01.08.2023).
6. GOST R 56353-2022. Soils. Methods of the laboratory detection of the dynamic features of dispersed soils. [Gruntы. Metody laboratornogo opredeleniya dinamicheskikh svoystv dispersnykh gruntov]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200183923> (date of access: 02.08.2023).
7. Brinkgreve R. B. J., Engin E., Engin H. K. Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands // Conference 7th Numerical methods in geotechnical engineering. At Trondheim, Norway. 2010. Pp. 137–142.
8. Ezzatyazdi P., Jahankhah H. Practical suggestions for 2d finite element modeling of soil-structure interaction problems // Second European conference of earthquake engineering and seismology, Istanbul. Aug. 25–29, 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/308120333_practical_suggestions_for_2d_finite_element_modeling_of_soil-structure_interaction_problems. (date of access: 31.07.2023).
9. СП 14.13330.2018. Building in seismic areas. [Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonakh]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (date of access: 01.08.2023).
10. Valuation of sustainability after dynamic calculation. [Расчёт устойчивости после динамического расчёта]. URL: <https://plaxisrussia.notion.site/de26c8c38cfa4684bfec54cfcc27b54> (date of access: 31.07.2023).

Статья сдана в редакцию 8 августа 2023 года

М. А. Попова

Участие профессиональных сообществ в подготовке новых кадров железнодорожной отрасли в России

М. А. Popova

Participation of professional communities in the training of new personnel in the railway industry in Russia

Аннотация

Рассмотрены вопросы участия профессиональных сообществ в развитии кадрового резерва железнодорожной отрасли; анализируется развитие деятельности профессиональных сообществ железнодорожной отрасли в России и их вклад в развитие кадрового потенциала. Предложена авторская классификация задач профессиональных сообществ, которые необходимо развивать для усовершенствования кадрового потенциала железнодорожного транспорта у нас в стране. Дана оценка роли человеческого капитала для развития как кадрового потенциала, так и железнодорожной отрасли в целом.

Проведен анализ экономической литературы, по результатам которого выявлены основные аспекты деятельности профессиональных сообществ железнодорожной отрасли для разработки продукта деятельности профессиональных

сообществ, также в работе выделяются отдельные примеры влияния профессиональных сообществ на развитие кадрового потенциала посредством участия человеческого капитала в их деятельности.

Дополнительно проведен анализ экономической литературы для уточнения необходимости исследований профессиональных сообществах, в том числе приведены примеры профессиональных сообществ железнодорожного транспорта в РФ. Рассмотрена деятельность некоторых профессиональных сообществ железнодорожной отрасли, дана краткая характеристика их деятельности с указанием вклада для подготовки кадров железнодорожной отрасли.

Определено, что программа развития человеческого капитала ОАО «РЖД» на период до 2025 года – инструмент, позволяющий профессиональным сообществам решать задачи кадрового потенциала отрасли.

Выявлено, что участие человеческого капитала, которое поддерживается деятельностью профессиональных сообществ, благоприятно сказывается не только на развитии железнодорожной отрасли, но и на экономике страны в целом.

Предпринята попытка разработки термина эффективности деятельности профессиональных сообществ.

Ключевые слова: профессиональные сообщества, железнодорожный транспорт, человеческий капитал, развитие железнодорожной отрасли, экономическое развитие.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-120-126

Abstract

The author has considered participation issues of professional communities in the development of the personnel reserve in the railway industry. The development of the activities of professional communities in the Russian railway industry and their

Статья рекомендована к публикации М. Б. Петровым, д-ром техн. наук, Институт экономики УрО РАН. E-mail: petrov.mb@uiec.ru.

Мария Алексеевна Попова, Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: 463754147@rambler.ru. orcid 0000-0002-7558-1212.

© М. А. Попова, 2024.

The article is recommended for publication M. B. Petrov, the Dr.Sci.Tech., Institute of economy OURO RAHN. E-mail: petrov.mb@uiec.ru.

Maria Alekseevna Popova, Institute of economy OURO RAHN, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 463754147@rambler.ru. ORCID 0000-0002-7558-1212.

© М. А. Popova, 2024.

contribution to the development of human resources are analyzed. The author has proposed a classification of the tasks of professional communities that need to be developed to improve the personnel potential of railway transport in our country. The role of human capital for the development of both human resources and the railway industry as a whole has been assessed. An analysis of the economic literature has been carried out. The author has identified the main aspects of the activities in professional communities of the railway industry for the product development of

the activities in professional communities. The work also has highlighted individual examples of the impact of professional communities on the development of human resources through the participation of human capital in their activities. Additionally, an analysis of the economic literature has been carried out to clarify the need for research of professional communities, including examples of professional communities of railway transport in the Russian Federation. The activities of some professional communities in the railway industry have been consi-

dered, a brief description of their activities has been given. The Russian Railways human capital development program for the period up to 2025 is determined to be a tool that allows professional communities to solve the tasks of the human resources potential of the industry [1].

An attempt has been made to develop the term «efficiency of professional communities».

Keywords: professional communities, railway transport, human capital, development of the railway industry, economic development.

DOI: 10.20291/2079-0392-2024-1-120-126

В современных условиях, особенно в условиях санкционного давления на РФ именно профессиональные сообщества (ПС) становятся поддерживающим элементом, который помогает развитию кадровой составляющей любой отрасли, в т.ч. железнодорожной*.

В настоящее время в правовом поле нет не только термина «профессиональное сообщество», но и перечня инструментов, с помощью которых ПС участвуют в подготовке новых кадров и повышают эффективность действующих специалистов [2].

Для ПС очень важны дипломированные специалисты, соответствующие по уровню образования и квалификационным требованиям.

Подготовка квалифицированных кадров представляет собой совокупность мероприятий, которые направлены на систематическое повышение квалификации.

Профессиональное обучение – процесс непосредственной передачи новых профессиональных навыков или знаний

сотрудникам организации. Управление процессом профессионального обучения начинается с определения потребностей, которые формируются на основе развития персонала организации, а также оценки текущего состояния персонала, что позволяет видеть необходимый уровень работы по профобучению. Здесь широкие возможности участия ПС, которые аккумулируют и способны передать багаж знаний, по их оценке, необходимый для развития отрасли.

Таким образом, можно сделать вывод, что ПС являются современным аналогом института наставничества, который был ранее.

Для поддержания достаточного уровня квалификации таких специалистов необходимо соблюдать следующие аспекты в деятельности ПС: подготовка кадров, разработка специальных знаний, положений (методики развития), уставы, шаблоны договоров, инструкции по качеству, стандарты организаций, разработка учебных программ

* Примеры ПС железнодорожной отрасли: Совет по профессиональным квалификациям на железнодорожном транспорте, Роспрофжел, Сообщество железнодорожников «СЦБист», Союз операторов железнодорожного транспорта, МОО ВОЛЖД – Межрегиональная общественная организация «Общество любителей железных дорог», Корпоративный университет РЖД, Совет по железнодорожному транспорту государств-участников содружества, объединение «Желдортранс» и т.д.

и т.д.); создание условий для обмена знаниями (разработка проектов законодательных актов, экономических моделей, организация симпозиумов для обмена опытом как в рамках одной отрасли, так и в разных с учетом требований рынка и т.д.) [2].

Один из важнейших аспектов деятельности ПС, с помощью которых они влияют на развитие отрасли, – разработка продукта деятельности ПС.

Нами предлагается термин «продукт деятельности сообщества» – полезные результаты в нематериальном (материалы конференций, контент сайтов и т.п.) и в материальном виде – наполнение и развитие баз знаний (данных), публикации работ (сборники, журналы, статьи), а также деятельность экспертов ПС по созданию уникального продукта для развития отрасли/территории [2]. Уникальность конкретного продукта деятельности экспертов ПС состоит не в его материальном облике, а в идее, которая ложится в основу предлагаемого проекта.

Уточним термин с точки зрения развития кадрового потенциала: деятельность членов ПС для развития кадрового потенциала отрасли, которая направлена на подготовку новых кадров, разработку мотивационной политики, учитывающей специфику отрасли (тяжелые условия труда, ненормированные рабочие дни, возможные экстремальные и нестандартные условия труда, работа на улице, в том числе в темное время суток и холодное время года и т.д.).

Например, некоторым работникам железнодорожной отрасли за вредные условия труда в соответствии с [3] выдают определенный перечень продуктов, что еще раз доказывает наличие не только вредного фактора в их условиях труда, но и необходимость разработки мотивационной политики, методических указаний, инструментов, направленных на улучшение условий труда (если это возможно), повышение мотивации работников железнодорожной отрасли. Сделать это могут именно ПС как структура, которая выступает

своеобразным буфером между железнодорожной отраслью и ее персоналом.

Экспертная деятельность ПС также является результатом его работы, поэтому так важен уровень подготовки кадров, составляющих такие сообщества. А значит, вновь подготовленные либо прошедшие дополнительную подготовку кадры – еще один пример продукта деятельности сообщества [2]. Потенциал участвующих в разработке средств и методик, в проведении занятий, в организации нестандартных форм работы с персоналом накапливается в недрах ПС.

Наличие квалифицированных кадров влияет на развитие профессиональной отрасли, особенно в условиях территориального значения. Отсутствие необходимого кадрового состава определяет вектор развития места и те сферы деятельности, на которых стоит фокусироваться с учетом имеющихся ресурсов, включая человеческий фактор. Поэтому кадровый потенциал – важный инструмент для решения проблем социально-экономического развития территории и оказывает существенное влияние на восприятие привлекательности места [4].

Важная категория деятельности ПС – эффективность их деятельности в отрасли, показатель, характеризующий повышение работоспособности отрасли, улучшение качества ее деятельности при помощи подготовки новых кадров.

Оценить эффективность деятельности ПС можно сравнением достигнутых результатов с предполагаемыми. Так, например, ключевые достижения ОАО «РЖД» в кадровых вопросах: продолжена работа по совершенствованию тарифно-квалификационной системы, актуализированы десять профессиональных стандартов по основным профессиям и должностям железнодорожного транспорта, корпоративный университет РЖД реализует новые образовательные решения, направленные на развитие профессиональных компетенций руководителей ключевых производственных

филиалов, более 1,1 тыс. открытых курсов в системе дистанционного обучения ОАО «РЖД» (СДО), создано отдельное направление обучения с курсами для быстрой адаптации новых работников (к СДО подключилось семь отраслевых вузов), действует проект «Час знаний»: в СДО размещено более 750 курсов (обучаются 250 тыс. работников компании) [5].

В отличие от получения образования в университетах по ФГОСТ и сдачи государственных экзаменов, данная образовательная система позволяет не только решить вопрос с необходимостью повышения квалификации по узкому направлению, но и безотрывно от производства получать образование, что показывает уровень вовлеченности ПС в развитие отрасли.

Итак, профессиональное сообщество – это творческая среда, в которой взаимодействуют качества и интересы различных сторон. Такое взаимодействие обуславливает приращение человеческого капитала, в том числе и посредством подготовки кадров железнодорожной отрасли.

Вопрос о профессиональных сообществах также рассматривается, например, в [6–19].

Публикации российских ученых в общем понимании отражают влияние кадрового потенциала на развитие отрасли, но не уделяют должного внимания вопросам роли именно ПС в развитии кадрового потенциала.

В современных условиях человеческий капитал – определяющий ресурс для развития экономики в целом через развитие кадровых ресурсов.

Человеческий капитал – оценка воплощенной в индивидууме потенциальной способности приносить доход; включает врожденные способности и таланты, а также образование и приобретенную квалификацию [20].

Человеческий капитал – совокупность знаний, умений, навыков, используемых для удовлетворения многообразных потребностей человека и общества в целом [21].

Воспроизводство человеческого капитала – это реализация знаний, умений и навыков человека, что обуславливает развитие личностного роста как отдельного человека, так и группы людей в целом, в том числе ПС.

Для развития человеческого капитала необходимы как материальные, так и нематериальные ресурсы. При накоплении человеческого капитала увеличивается производительность человеческого ресурса, что в итоге положительно отражается как на развитии кадрового потенциала, так и на развитии отрасли в целом.

Одним из примеров внедрения человеческого капитала в свою деятельность являются ОАО «РЖД» и ПС железнодорожной отрасли.

ОАО «РЖД» – владелец инфраструктуры общего пользования и единственный перевозчик российской сети железных дорог. Так как компания – монополист, она также выступает крупнейшим работодателем России, который заинтересован в объемном штате профессионалов.

Деятельность ПС железнодорожной отрасли не только связана с непосредственной деятельностью ОАО «РЖД», но и направлена на развитие кадрового потенциала железнодорожной отрасли.

В ОАО «РЖД» функционирует целостная система непрерывного развития и обучения персонала – от линейного уровня до топ-менеджмента [22].

В ОАО «РЖД» существуют программы для молодых руководителей, новаторов, рабочих и добровольцев, например, целевая программа «Молодежь ОАО «РЖД» (2021–2025 гг.) [23]. Одна из программ направлена на привлечение сотрудников в возрасте до 35 лет – Молодежный конкурс проектов «Лучшие практики корпоративного волонтерства».

25 ноября 2009 года Совет директоров ОАО «РЖД» утвердил проект создания системы дополнительного корпоративного бизнес-образования руководящего состава ОАО «РЖД» [24].

Участие человеческого капитала поддерживает деятельность профессиональных сообществ, благоприятно сказывается не только на развитии железнодорожной отрасли, но и на экономике страны в целом.

Исходя из вышеизложенного ПС предлагаются реализовывать следующие задачи, выполнение которых позволит не только увеличить человеческий капитал в отрасли, но и развить отрасль в целом: участие в развитии профессиональных программ для повышения качества кадрового состава отрасли, обмен уже имеющимся опытом, разработка продуктов деятельности ПС, взаимодействие экспертов ПС

и кадров для выработки стратегий развития железнодорожной отрасли.

Богатое разнообразие форм и методов и наличие общего признака неформальности, дополнительный вклад в подготовку кадров дают возможность констатировать широчайшую востребованность и возможности применения в этом процессе институтов профессионального сообщества.

Таким образом, успех в построении эффективной системы основной и дополнительной подготовки кадров такой сложной и комплексной отрасли как ЖД требует максимального участия институтов ПС в этот процесс. ■

Литература

1. Корпоративный университет ОАО «РЖД». URL: <https://universitetrzd.ru/magazines/hr-partner-5-2020/sergey-saratov-nachalnik-departamenta-upravleniya-personalom-oao-rzhd-nam-nuzhny-rabotniki-kotorye-g/?ysclid=lsbyh5e09m361401519> (дата обращения: 08.01.2024).
2. Попова М. А. Профессиональные сообщества как ключевой участник развития отраслей и территорий / М-лы VIII Международн. научн.-практ. конф. «Стратегии развития социальных общностей, институтов и территорий». – Екатеринбург : УрФУ, 2022. – С. 436–441. ISBN 978-5-7996-3498-8.
3. Приказ Минтруда России от 12.05.2022 № 291н. URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.01.2024).
4. Федотова М. С. Профессиональные сообщества как инструмент развития кадрового потенциала территорий. URL: <gv2009.pdf> (naukavestnik.ru) (дата обращения: 28.12.2023).
5. Обучение и развитие персонала в ОАО «РЖД». URL: <https://sr2022.rzd.ru/ru/social-aspect/employee-development/training> (дата обращения: 28.12.2023).
6. Ostrom E. Collective Action and the Evolution of Social Norms // *Journal of Economic Perspectives*. – 2000. – Vol. 14, № 3. – P. 137–158.
7. Aligica P. D., Boettke P. J. Challenging Institutional Analysis and Development: The Bloomington School. – London: Routledge, 2009. – VIII. 168 p.
8. Погостинская Н. Н., Погостинский Ю. А. Контроллинг в системе стратегического управления. СПб : Изд-во МБИ. 2006. С. 115. ISBN 5-903028-02-0.
9. Хромова Т. С., Шевченко П. В. Роль профессионального сообщества в карьерном развитии молодого специалиста. URL: <https://mgpu-media.ru/issues/issue-33/psychopedagogical-science/role-professional-community.html> (дата обращения: 01.12.2023).
10. Чучкевич М. М. Основы управления сетевыми организациями. М. : Изд-во Института социологии РАН. 1999. С. 37. ISBN 5-89697-033-1.
11. Ерасов Г. В. Вопросы повышения эффективности деятельности предприятий с государственным участием с помощью профессиональных сообществ менеджеров URL: [https://www.hse.ru/data/2019/08/17/1483721163/%D0%91%D0%9E%D0%92%20%E2%84%962%20\(32\)%20-%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3.pdf](https://www.hse.ru/data/2019/08/17/1483721163/%D0%91%D0%9E%D0%92%20%E2%84%962%20(32)%20-%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3.pdf) (дата обращения: 01.01.2024).
12. Маслова Ю. В. Особенности профессиональных библиотечных коммуникаций в сетевом пространстве // Вестник Казанского государственного университета истории и искусств. – № 3. – 2020. С. 49–55. ISSN 1812-0547.
13. Шваб К. Четвертая промышленная революция / Пер. с англ. – М. : Эксмо, 2022. С. 208. ISBN 978-5-699-90556-0.

14. Кардел С. Стратегическое сотрудничество: креативный бизнес-курс / Пер. с англ. К. Ткаченко. – М. : ФАИР-пресс, 2005. С. 256. ISBN 5-8183-0831-6 (рус.) ; ISBN 0-340-85052-3 (англ.).
15. Zhuravskaya M., Tarasyan V. Forming of the regional core transport network taking into account the allocation of alternative energy sources based on artificial intelligence methods // Gliwice, Republic of Poland: Transport Problems. 2014. Т. 9 № 4. С. 121–130. ISSN 1896-0596 ; eISSN 2300-861X.
16. Ingaldi M., Zhuravskaya M. The 3X3 matrix as a tool for evaluation of technological position of the enterprise / Czestochowa, Poland. – В сб. : MATEC Web of Conference. Изд-во EDP Sciences. 2018. Т. 183. С. 1–6.
17. Naylor T. H., Willimon W. W., Osterberg R. V. The Search for Meaning in the Work place. Abigdon Press. 1996. 219 p.
18. Mintzberg, H. Rebuilding Companies as Communities. URL: <http://hbr.org/2009/07/rebuilding-companies-as-communities/>.
19. Heller K. The return to community. American Journal of Community Psychology, 1989, Vol. 17. Iss. 1. Pp. 1–15.
20. Добрынин А. И. Человеческий капитал в транзитивной экономике: формирование, оценка, эффективность использования : монография / А. И. Добрынин, С. А. Дятлов, Е. Д. Цыренов. – СПб : Наука, 1999. – 309 с. ISBN 5-02-028418-1.
21. Человеческий капитал. URL: <https://bigenc.ru/c/chelovecheskii-kapital-a962e1?ysclid=lsfz1nzbfbu687516108> (дата обращения: 29.12.2023).
22. Годовой отчет 2021/Отчет об устойчивом развитии ОАО «РЖД» URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/social-aspect/employee-development/training> (дата обращения: 02.01.2024).
23. Целевая программа «Молодежь ОАО «РЖД» (2021–2025 гг.). URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1811&ysclid=lr0wlvmhag724815351> (дата обращения: 30.12.2023).
24. Мячикова К. А., Селина О. В. Особенности формирования человеческого капитала компании ОАО «РЖД» / М-лы XI Уральского демографического форума: Международн. научн. конф. «Институты развития человеческого потенциала в условиях современных вызовов». – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – С. 77–85. ISBN 978-5-94646-636-3.

References

1. The Corporate University of JSC «Russian Railways». URL: <https://universitetrzd.ru/magazines/hr-partner-5-2020/sergey-saratov-nachalnik-departamenta-upravleniya-personalom-oao-rzhd-nam-nuzhny-rabotniki-kotorye-g/?ysclid=lsbyh5e09m361401519> (data accessed: 08.01.2024).
2. Popova M. A. Professional communities as a key participant in the development of industries and territories [Professional'nye soobshchestva kak klyuchevoy uchastnik razvitiya otraslej i territorij] / Materials of the VIIIth International Scientific practical conference «Strategies for the development of social communities, institutions and territories». – Ekaterinburg : UrFU, 2022. – С. 436–441. ISBN 978-5-7996-3498-8.
3. Order of the Labor Ministry of the Russian Federation dated 05/12/2022 No. 291n. URL: <https://www.consultant.ru> (data accessed: 05.01.2024).
4. Fedotova M. S. Professional communities as a tool for developing the human resources potential of territories. URL: <gv2009.pdf> (data accessed: 28.12.2023).
5. Training and development of personnel at JSC «Russian Railways». URL: <https://sr2022.rzd.ru/ru/social-aspect/employee-development/training> (data accessed: 28.12.2023).
6. Ostrom E. Collective Action and the Evolution of Social Norms // Journal of Economic Perspectives. – 2000. – Vol. 14, № 3. – P. 137–158.
7. Aligica P. D., Boettke P. J. Challenging Institutional Analysis and Development: The Bloomington School. – London: Routledge, 2009. – VIII. 168 p.
8. Pogostinskaya N. N., Pogostinsky Yu. A. Controlling in the strategic management system [Kontrolling v sisteme strategicheskogo upravleniya]. – St. Petersburg : MBI Publishing House. 2006. p. 115. ISBN 5-903028-02-0.
9. Khromova T. S., Shevchenko P. V. The role of the professional community in the career development of a young specialist. URL: <https://mgpu-media.ru/issues/issue-33/psychopedagogical-science/role-professional-community.html> (data accessed: 01.12.2023).

10. Chuchkevich M. M. Fundamentals of management of network organizations [Osnovy upravleniya setevymi organizatsiyami]. M. : Publishing House of the Institute of Sociology of the Russian Academy of Sciences. 1999. P. 37. ISBN 5-89697-033-1.
11. Erastov G. V. Issues of increasing the efficiency of enterprises with state participation with the help of managers' professional associations. URL: <https://www.hse.ru/> (data accessed: 01.01.2024).
12. Maslova Yu. V. Features of professional library communications in the network space [Osobennosti professional'nyh bibliotechnyh kommunikacij v setevom prostranstve] // Gerald of the Kazan State University of History and Arts. – № 3. – 2020. Pp. 49–55. ISSN 1812-0547.
13. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution [Chetvertaya promyshlennaya revolyuciya] / Translated from English – M. : Eksmo, 2022. P. 208. ISBN 978-5-699-90556-0.
14. Cardell S. Strategic cooperation: a creative business course [Strategicheskoe sotrudnichestvo: kreativnyj bizneskurs] / Translated from English by K. Tkachenko. – M. : FAIR Press, 2005. P. 256. ISBN 5-8183-0831-6 (рус.) ; ISBN 0-340-85052-3 (англ.).
15. Zhuravskaya M., Tarasyan V. Forming of the regional core transport network taking into account the allocation of alternative energy sources based on artificial intelligence methods // Gliwice, Republic of Poland: Transport Problems. 2014. T. 9 № 4. С. 121–130. ISSN 1896-0596 ; eISSN 2300-861X.
16. Ingaldi M., Zhuravskaya M. The 3X3 matrix as a tool for evaution of technological position of the enterprise / Czestochowa, Poland. – EDP Sciences. 2018. V. 183. Pp. 1–6.
17. Naylor T. H., Willimon W. W., Osterberg R. V. The Search for Meaning in the Work place. Abigon Press. 1996. 219 p.
18. Mintzberg, H. Rebuilding Companies as Communities. URL: <http://hbr.org/2009/07/rebuilding-companies-as-communities/> (data accessed: 20.12.2023).
19. Heller K. The return to community. American Journal of Community Psychology, 1989, Vol. 17. Iss. 1. Pp. 1–15.
20. Dobrynin A. I. Human capital in a transitive economy: formation, assessment, efficiency of use [Chelovecheskij kapital v tranzitivnoj ekonomike: formirovanie, ocenka, effektivnost' ispol'zovaniya] : monograph / A. I. Dobrynin, S. A. Dyatlov, E. D. Tsyrenov. – St. Petersburg : Nauka, 1999. – 309 p. ISBN 5-02-028418-1.
21. Human capital. URL: <https://bigenc.ru/c/chelovecheskii-kapital-a962e1?ysclid=lsfz1nzfbu687516108> (data accessed: 29.12.2023).
22. Annual Report 2021/Report on the Sustainable Development of Russian Railways URL: <https://sr2021.rzd.ru/ru/social-aspect/employee-development/training> (data accessed: 02.01.2024).
23. Target program «Youth of JSC Russian Railways» (2021–2025) URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1811&ysclid=lr0wlvmhag724815351> (data accessed: 30.12.2023).
24. Myachikova K. A., Selina O. V. Features of the formation of the human potential in the Russian Railways Company [Osobennosti formirovaniya chelovecheskogo kapitala kompanii OAO «RZhD»] / Materials of the XI the Ural Demographic Forum: International Scientific Conference «Institutes of human potential development in the context of modern challenges». – Ekaterinburg : USURT, 2020. – Pp. 77–85. ISBN 978-5-94646-636-3.

Статья сдана в редакцию 5 января 2024 года

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

$$\left(s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right] \right); \left(\frac{\sigma_a}{[n]} \right)$$

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. Список литературы/источников оформляется 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 301018109000000000795

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>301018109000000000795</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: «___» _____ 2024 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>301018109000000000795</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: «___» _____ 2024 г.</p>

ф. СП-1



АБОНЕМЕНТ

на ~~газету~~
журнал

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

ПВ	место	литер

на ~~газету~~
журнал

70070

(индекс издания)

Вестник УргУПС

(наименование издания)

Стоимость	подписки	_____ руб. _____ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	_____ руб. _____ коп.	

на 2024 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X	X	X	X	X	X						

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)