

НАУКА И ТЕХНИКА ТРАНСПОРТА



И
С
С
Н
2
0
7
4
-
0
9
2
5

125-летие
Российского
университета
транспорта
РУТ (МИИТ)

70-летие
Российской открытой
академии транспорта
РОАТ РУТ (МИИТ)

● Транспорт

● Информатика, вычислительная техника и управление

● Безопасность деятельности человека

2021 3

Поздравляем с Юбилеем!



В.И. Апатцев

Уважаемые читатели!

В 2021 году исполняется 125 лет Российскому университету транспорта (РУТ (МИИТ)) и 70 лет Российской открытой академии транспорта (РОАТ), которая является структурным подразделением университета.

Во второй половине XIX века с развитием железнодорожной сети России потребовалось расширение подготовки инженеров железнодорожного транспорта. Единственный в то время институт инженеров путей сообщения в Санкт-Петербурге не мог в полной мере решить эту проблему. Нехватка специалистов особенно почувствовалась с началом строительства Великого Сибирского пути. Поэтому Министерство путей сообщения внесло в правительство предложение о создании еще одного высшего учебного заведения, которое готовило бы инженеров для нужд ведомства.

В 1896 году по повелению Государя Императора Николая II было учреждено Императорское Московское инженерное училище. В 1913 году училище преобразовано в Московский институт инженеров путей сообщения Императора Николая II, а ныне Российский университет транспорта.

А история Российской открытой академии транспорта началась с образования в 1951 году в Москве Всесоюзного заочного института инженеров железнодорожного транспорта (ВЗИИТ). Распоряжение о создании ВЗИИТа подписал председатель Совета министров Союза ССР Иосиф Сталин.

Необходимость создания института определялась огромными масштабами работ по техническому перевооружению железнодорожного транспорта в послевоенный период – необходимо было электрифицировать железные дороги, внедрять на них новые виды тяги и подвижного состава, автоматизировать производственные процессы.

Нехватка квалифицированных инженерных кадров была в то время одной из основных проблем железнодорожного транспорта. В 1951 году практики, не имевшие высшего и среднего специального образования, составляли около 50% инженерно-технического состава. Между тем требовались специалисты, способные грамотно эксплуатировать новую технику, создавать и внедрять новые технологии. И ВЗИИТ должен был включиться в решение этой задачи.

За короткий срок ВЗИИТ на деле показал не только жизнеспособность и полноценность заочной подготовки кадров, но и ряд её преимуществ. Знания, получаемые студентами в процессе учёбы, сразу же использовались ими на производстве. Многие студенты осуществляли реальное курсовое и дипломное проектирование, решая тем самым практические задачи производства. В 1995 году ВЗИИТ становится Российским государственным открытым техническим университетом путей сообщения (РГОТУПС).

В 2009 году в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации РГОТУПС был реорганизован путём присоединения к Московскому государственному университету путей сообщения (МИИТ). В результате на базе МИИТа появилось новое структурное подразделение – Российская открытая академия транспорта. Важным направлением деятельности коллектива РОАТ в рамках университета стала информатизация учебного процесса, отвечающая требованиям подготовки современных кадров, способных работать в новом информационном поле и применять в системе управления новые технологии.

На всех этапах истории Российский университет транспорта вносил существенный вклад в подготовку специалистов для железнодорожного транспорта и других отраслей народного хозяйства. Сегодня это ведущий политехнический транспортный вуз страны, который гордится своими учёными и выпускниками.

Юбилейные даты всегда заставляют чаще биться сердца и освежают воспоминания давно минувших дней.

От всей души поздравляю коллектив университета, академии и их выпускников с юбилейными датами!

Желаю всем авторам и читателям журнала творческих успехов, профессиональных достижений и новых свершений на ниве научного познания!

*С уважением,
от лица редакции научно-технического
и производственного журнала
«Наука и техника транспорта»,*

*Главный редактор журнала
доктор технических наук,
профессор, заслуженный работник
высшей школы Российской Федерации*



В.И. Анатцев

Научно-технический и производственный журнал

Входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по следующим научным специальностям:

- 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);
- 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);
- 05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки);
- 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог (технические науки);
- 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки);
- 05.22.08 – Управление процессами перевозок (технические науки);
- 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки).

Адрес редакции:

125315, г. Москва, ул. Часовая, д. 22/2
Тел.: (495) 649-19-00 доб. 385.
125315, Chasovaya Str., 22/2, Russia, Moscow
Tel.: (495) 649-19-00 ext: 385. Fax: (499) 151-18-37

E-mail: nttmag@rgotups.ru,
<http://ntt.rgotups.ru>

Подписной индекс в электронном каталоге агентства «Роспечать» – 69960.

Издатель: РУТ (МИИТ)
Тел.: (495) 649-19-00 доб. 385.
Журнал выходит 4 раза в год.
Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС77-48299 от 24 января 2012 г.
Выходит с 2002 года.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Редакция не несет ответственности за представленные материалы. Мнение редакции может не совпадать с мнением автора. Рукописи рецензируются и не возвращаются. Используются фотоматериалы из открытых источников.

Отпечатано РОАТ РУТ (МИИТ):
125315, Москва, Часовая ул., 22/2

Подписано в печать 29.09.2021.

Усл. печ. л. 14,5
Формат 60×90^{1/8}.

Тираж 60 экз.
Тип. зак. 8

© Наука и техника транспорта, 2021



Редакционный совет:

- д-р техн. наук, проф. Апатцев В.И. — председатель;
- д-р техн. наук, проф. Бугреев В.А. — зам.председателя;
- д-р техн. наук, проф. Горелик А.В.;
- д-р техн. наук, проф. Космодамианский А.С.;
- д-р техн. наук, проф. Безродный Б.Ф.;
- д-р техн. наук, проф. Никитин А.Б.;
- д-р ф.-м. наук, проф. Локтев А.А.;
- д-р техн. наук, доц. Сычев В.П.;
- д-р техн. наук, проф. Мондрус В.Л.;
- д-р техн. наук, проф. Мкртычев О.В.;
- д-р техн. наук, проф. Аксенов В.А.;
- д-р техн. наук, проф. Шварцбург Л.Э.;
- д-р техн. наук, проф. Николайкин Н.И.;
- д-р техн. наук, проф. Сидоренко В.Г.;
- д-р техн. наук, проф. Резер С.М.;
- д-р экон. наук, проф. Шкурина Л.В.;
- д-р экон. наук, проф. Мирошниченко О.Ф.;
- д-р экон. наук, проф. Белоусова Н.И.

Главный редактор

В.И. Апатцев

Ответственный редактор

В.А. Бугреев

Дизайн и верстка

В.А. Кочнев

Технический редактор

Д.Н. Тихонычев

Английский перевод

М.Л. Окулова

3' 2021

Транспорт



М.С. Громаков, С.В. Беспалько, О.И. Мироненко, А.В. Зяблов

Оценка сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных колебаниях кузова

10



О.И. Веревкина, О.Н. Попов, И.В. Мартынюк, А.И. Шевченко

Основы алгоритмизации анализа динамики рисков нарушений безопасности движения поездов для линейных предприятий хозяйства пути с учетом процессного подхода

14



А.Э. Юницкий, В.А. Гарах, М.И. Цырлин

Струнный транспорт для городских перевозок пассажиров

19



Ю.А. Кольцов, А.А. Воробьев, Д.И. Бодриков, В.П. Смирнов

Методика для оценки и определения ресурса оборудования локомотивов по замерам контролируемых параметров

26



Е.В. Маловецкая, Р.С. Большаков

Оценка особенностей колебаний вагонопотоков с использованием математических моделей прогноза на основе временного ряда

32



С.П. Вакуленко, Н.Ю. Евреенова, И.Ю. Федоров

Об особенностях специализации железнодорожного направления Центр—Юг

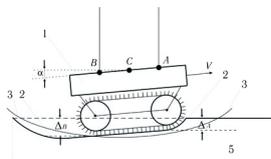
40



В.П. Сычев, Д.В. Овчинников, А.Ю. Абдурашитов, А.В. Сычева

Методика определения ресурса железнодорожного пути в зависимости от условий его эксплуатации

44



В.А. Ерошин, А.В. Бойко

Экспериментальное определение тяги гусениц при качении по поверхности воды

51



В.А. Богачев, А.С. Кравец, О.В. Игнатъева, Т.В. Богачев

Математические методы в оптимизации распределения зерновых грузопотоков, направленных в адрес малых портов Азово-Черноморского бассейна

56



В.Н. Алексеев

К вопросу о колебаниях упругой среды, вызванных действием равномерно распределенной сосредоточенной силы

64



А.А. Воробьев, В.А. Карпов, Д.М. Маяков

Расчет показателей безотказности оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М

71



Д.Г. Евсеев, А.В. Коробкин

Состояние и особенности экранной среды при движении высокоскоростной амфибии

77



Е.А. Середов

Использование теории нечетких множеств для определения потребного количества поездных единиц

81

Информатика, вычислительная техника и управление



Е.П. Балакина, Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко

Сценарный подход в обучении оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем

87

Безопасность деятельности человека



А.А. Локтев, П.В. Сычев, В.А. Аксенов, А.С. Пикалов, В.П. Сычев

Обеспечение безопасности персонала путевых машинных комплексов с учетом моделирования их жизненного цикла

93

СОДЕРЖАНИЕ



О.И. Поддаева

Возможности прогнозирования появления опасных зон при аэродинамическом воздействии на большепролетные мостовые конструкции

100



М.В. Графкина

Некоторые аспекты статистики производственного травматизма на транспорте

107



**А.М. Сазонова, Д.П. Гурт, М.В. Квиткина,
Е.В. Стасева**

Исследование и анализ травматизма в сфере дорожного строительства

111

Transport

- M.S. Gromakov, S.V. Beshpal'ko, O.I. Mironenko, A.V. Zyablov**
Estimation of liquid pressure forces on the tank boiler side at bogie frame swaying **10**
- This article provides a method for estimating the liquid pressure forces on the side of a tank boiler at the swaying.
- Key words:* car, tank, vibrations, liquid consignment, swaying, railway, dynamics
- O.I. Verevkina, O.N. Popov, I.V. Martynyuk, A.I. Shevchenko**
Algorithmization fundamentals of risk dynamics analysis of train operation safety violations for line departments of track facilities under process approach **14**
- This article covers the principles of the algorithm elaboration for the line departments of track facilities as a stage of automation of risk decrease measures taking into account the development of optimal measures of life cycle infrastructure. The authors describe the problems related to the regulatory documentation underlying the risk assessment.
- Key words:* risk, dynamics, algorithm, digitalization, scheme, process approach
- A.E. Yunitskiy, V.A. Garakh, M.I. Tsyrlin**
SkyWay string transport for urban passenger transportation. **19**
- The article explains the string transport distinctive features. The authors give the description of various types of string transport for urban passenger transportation and the advantages over classic kinds of transport.
- Key words:* string transport, passenger transportation, urban transport, uniwind, unibike, unilight, unibus, unicar
- Yu.A. Kol'tsov, A.A. Vorobyov, D.I. Bodrikov, V.P. Smirnov**
Procedure for evaluating and determining of locomotive equipment operational life by monitored parameter measurement **26**
- At present, the state of traction rolling stock is of particular importance. This article gives a simpler method for practical application of analysis, evaluation and determination of equipment operational life by samples of monitored parameters. The method is based on groupings of specific parameters of the selected equipment.
- Key words:* railway, parametric reliability, operational life, wheelset, durability indicators
- E.V. Malovetskaya, R.S. Bol'shakov**
Estimation of railway car flow fluctuation characteristics using prediction mathematical models based on time series **32**
- The authors propose an unconventional approach to assess the seasonal unevenness of railway car flows based on the construction of mathematical forecast models. The identification of models of the time series of fluctuations of car flows delivered at the junction points of railways is carried out based on a systematic approach with the possibility of predicting their volumes. The histograms and correlograms are obtained.
- Key words:* mathematical model, time series of car flows, system approach, fluctuation of railway car flows, prediction model
- S.P. Vakulenko, N.Yu. Evreenova, I.Yu. Fedorov**
On specialization features of Center—South railway direction **40**
- The authors consider the problem of high-speed railway traffic organization between the Center and the South of Russia. This article assesses the possible technological effects of the introduction of specialization technology in the Center-South direction and the proposals on the main areas of further research in the field of specialization of railway directions.
- Key words:* specialization of railway directions, classification of railway lines, traffic organization

V.P. Sychev, D.V. Ovchinnikov, A.Yu. Abdurashitov, A.V. Sycheva
Procedure for determining railway track life depending on its operating conditions **44**

A method of determining the railway track life depending on its operating conditions has been developed, taking into account not only the power parameters of the impact on the track from the rolling stock but also the rail deflected mode during loading directly at the point of contact with the wheels, as well as flexural stresses in the rail base.

Key words: railway track, rails, modelling, rail deflected mode, operational life

V.A. Eroshin, A.V. Boyko
Experimental determination of caterpillar traction during rolling on the water surface **51**

The article describes the rolling conditions of caterpillar systems with grousers on water. The authors simulated this phenomenon and obtained the dependence of draught and bearing capacity of wheel systems on the Froude number, and present the dependence of caterpillar traction on a dimensionless parameter equal to the ratio of absolute speeds of the lower part of the caterpillar and the surface part of the model.

Key words: ideal incompressible fluid, caterpillar, water rolling, hydrodynamic forces, physical simulation

V.A. Bogachev, A.S. Kravets, O.V. Ignat'eva, T.V. Bogachev
Mathematical methods in distribution optimization of grain freight flows directed to small ports of the Azov-Black Sea basin **56**

Within the framework of the egalitarian concept, a comprehensive approach has been developed in welfare theory in finding rational schemes for the distribution of freight flows in a multimodal transport and technological system. The authors propose an optimization model of a regional freight transportation process, and its mathematical implementation is an integer programming problem solved with a computer algebra system.

Key words: rail transport, freight traffic, multiagency, distribution of freight flows, Pareto criterion

V.N. Alekseev
On the question of vibrations of the elastic medium caused by the action of uniformly distributed concentrated force **64**

The article considers the plane-polarized wave motion of the elastic medium. The expressions for scalar and vector potentials of such motion are obtained, which allows determining the components of displacements and stresses arising in media.

Key words: isotropic-elastic medium, longitudinal and transverse waves, scalar and vector potentials, plane-polarized motion, Bessel and Hankel functions

A.A. Vorobyov, V.A. Karpov, D.M. Mayakov
Calculation of reliability indicators of 2TE25K^M diesel locomotive equipment **71**

The article describes the method of calculation of reliability indicators of the 2TE25K^M diesel locomotive equipment based on the results of operating time before and between failures. The test was carried out on the example of the results of a study of more than 3,000 failures of 145 2TE25K^M diesel locomotives operating on the Moscow and North Caucasus Railways from 2015 to 2018.

Key words: reliability, reliability indicators, traction rolling stock, failures, 2TE25K^M diesel locomotive, equipment

D.G. Evseev, A.V. Korobkin
Condition and features of screen medium (ground effect) when moving a high-speed amphibious aircraft **77**

The article first proposes and justifies the hypothesis about the characteristics of the screen environment, the knowledge of which allows more consciously designing high-speed amphibious aircraft and on this basis optimizing the design features of the ekranoplan.

Key words: high-speed amphibious aircraft, screen medium (ground effect), underlying surface, condensed medium

E.A. Seredov
Using fuzzy set theory to determine the required number of train units **81**

This article considers the determination of the required number of train units on a particular section of the railway, taking into account the preferences of passengers and the cost estimates of trains by the method of paired

comparisons. The method used is based on the theory of fuzzy sets and makes it possible to switch to the general scale of measurements while preserving the values of the criteria.

Key words: train unit, method of paired comparisons, fuzzy sets

Computer science and control

E.P. Balakina, L.A. Baranov, V.G. Sidorenko

Scenario approach in the training of operational personnel of urban rail transport systems **87**

The basis of the transition to a scenario approach is the concept of traffic operation using situational management. The classification of the parameters of the situational approach to the metro line is given. The authors consider the scenario approach in the training of operational personnel of urban rail transport systems on the example of the underground system and describe the methodology for scenarios development of operational personnel training.

Key words: training simulators, training of operational personnel, situation management, learning scenarios

Safety of human activity

A.A. Loktev, P.V. Sychev, V.A. Aksyonov, A.S. Pikalov, V.P. Sychev

Ensuring the safety of personnel of track machine complexes taking into account their life cycle modelling **93**

The article discusses particulars of mathematical modelling of life cycle stages of track machine complexes with different technologies of track operations formed from different units of special rolling stock. The model takes into account the features of special rolling stock operations in terms of the impact on increasing its level of safe operation and reducing injuries.

Key words: modelling, special rolling stock, railway track, reliability, safety, labour protection

O.I. Poddaeva

Predictability of dangerous areas during aerodynamic impact on large-span bridge structures **100**

The article deals with issues related to ensuring the safety of workers operating on large-span bridge structures, taking into account the wind impact. The main approaches to solving the problem of the dynamic interaction of bridge structures and wind flow are presented, including experimental studies and numerical modelling, with subsequent identification of dangerous areas of workers on the structure. Based on the results of the study, the need was identified to determine the parameters of dangerous areas for workers and to finalize labour protection standards.

Key words: bridge structure, vibrations, wind tunnel, experimental modelling, numerical procedures, CFD

M.V. Grafkina

Some aspects of industrial injury statistics in transport **107**

The article presents some aspects of statistics of industrial injuries in transport based on the Rostrud (Federal Service for Labour and Employment) data analysis. The impact on statistics on injuries of classification by types of economic activity, inspection measures of authorized bodies, modes of transport is shown. Statistical analysis is necessary to make informed decisions on occupational health management to minimize accidents at work.

Key words: industrial injuries, transport, statistics, road transport, causes of injuries

A.M. Sazonova, D.P. Gurt, M.V. Kvitkina, E.V. Staseva

Research and analysis of injuries in road construction. **111**

The authors carried out the research and ranking of accidents at the road construction facilities according to the types of work performed dangerous factors and causes of their occurrence to identify general trends and develop preventive measures.

Key words: road construction, industrial injuries, causes of injuries, working conditions, safety

ОЦЕНКА СИЛ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА БОКОВУЮ СТЕНКУ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ КУЗОВА



М.С. Громаков



С.В. Беспалько

В данной статье приведен метод оценки сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных боковых колебаниях.

Ключевые слова: вагон, цистерна, колебания, жидкий груз, боковой относ, железная дорога, динамика

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_10

Колебания жидкого груза происходят при проходе вагоном кривых участков пути, а также при наезде на стыки и неровности рельса. Жидкость, набегая на боковую стенку кузова, создает давление. Это непосредственно воздействует на общую динамику вагона.

Определение силы давления жидкости на боковую стенку вагона позволит учесть ее в построении математической модели колебания вагона и при оценке его устойчивости в случае прохождения кривых участков пути. Приведенный ниже метод предполагает определение сил давления жидкостей исходя из значений гидростатического давления жидкости в направлении, заданном ускорением кузова вагона. В таком случае давление будет определено следующим образом [4]:

$$P = \rho a h, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости; a — заданное ускорение жидкости; h — высота столбика жидкости в плоскости действия силы давления.

Определенное давление жидкости в каждый момент времени определяет силу давления R_x , которая будет определена как интеграл по поверхности боковой стенки котла цистерны:

$$R_x = L \int_0^s \rho a h dy, \quad (2)$$

где L — длина котла цистерны.

К отысканию значения данной силы и сводится поставленная задача. На рис. 1 изображена искомая сила давления жидкости на стенку котла цистерны.

Громаков Максим Сергеевич, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика цистерны с учетом колебаний жидкого груза. Автор одной научной работы.

Беспалько Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: строительная механика вагона, динамика вагона, вопросы безопасности перевозки опасных грузов. Автор 60 научных работ.

Мироненко Олег Игоревич, старший преподаватель кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: динамика систем, организация вагонной отрасли, ДОТ. Автор 12 научных работ.

Зяблов Александр Вячеславович, аспирант кафедры «Нетяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)), дежурный по железнодорожной станции Бирюлево-Товарная (ОАО «РЖД»). Область научных интересов: оптимизация методов ремонта вагонов, динамика вагонов. Автор двух научных работ.

Ниже будет рассмотрена и приведена методика отыскания силы R_x .

Вследствие боковых колебаний кузова жидкость в котле движется под действием возмущающей силы и занимает смещенное положение, а при движении по кривой вагон находится под углом к горизонтальной поверхности (рис. 2).

Таким образом, вследствие вышеперечисленных факторов гидростатическое давление создает силу R_x под некоторым углом α к горизонтальной поверхности (см. рис.2).

Ускорение a , определяющее силу R_x , состоит из горизонтального и вертикального ускорений жидкости a_x и a_y и является их векторной суммой. Таким образом величина этих ускорений и будет определять угол α , который можно будет вычислить по следующей формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{a_y + g}{a_x}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения.

Высота столбика жидкости, определяется, как расстояние по линии действия силы R_x до поверхности жидкости. Точка пересечения линии действия силы R_x с линией поверхности жидкости имеет параметр уровня свободной поверхности h_i , который определяется динамическими параметрами жидкости [2]. Схема определения параметра h показана на рис. 3.

Чтобы вычислить значение силы R_x необходимо определить все значения h по уровню жидкости. Для этого разделим все поле жидкости на множество точек на расстоянии dy друг от друга по вертикали и dx по

горизонтали. Двигаясь по оси y в диапазоне от 0 до h с шагом dy определим значения всех столбиков h и выведем формулу:

$$h = \frac{h_x - y_i}{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где y_i – высота по оси y на каждом шаге расчета.

На рис. 4 показано изображение определения параметров h , необходимых для дальнейшего расчета.

Высоту уровня h_x , соответствующую точке на оси y необходимо определять для каждого шага расчета исходя из следующего условия:

$$h_x = h_i, \text{ при } (y - \alpha x) = h_i, \quad (5)$$

где x – точка на оси абсцисс, относительно которой ведется расчет каждого шага.

Данное условие справедливо для расчета силы давления на правую стенку котла цистерны, когда для левой стенки данное условие примет вид:

$$h_x = h_i, \text{ при } (y + \alpha x) = h_i. \quad (6)$$

Далее силу давления жидкости на стенку котла цистерны можно определить, проинтегрировав уравнение (1) методом прямоугольников, тогда вышеприведенное уравнение примет вид:

$$R_x = \sum \rho L a h d y. \quad (7)$$

Ускорение a , определяющее силу R_x вычисляется, как векторная сумма ускорений a_x и a_y :

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}. \quad (8)$$

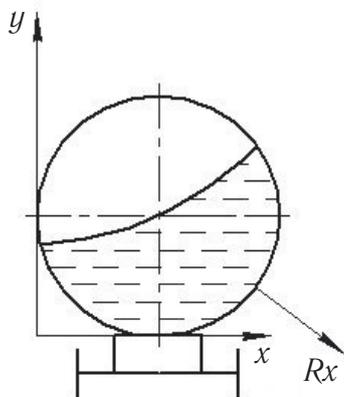


Рис. 1. Сила давления жидкости на стенку котла цистерны

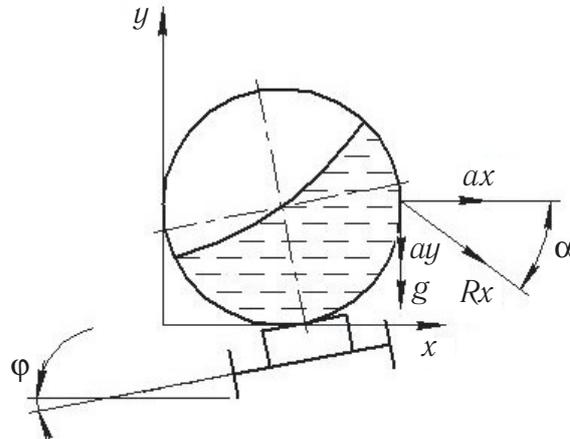
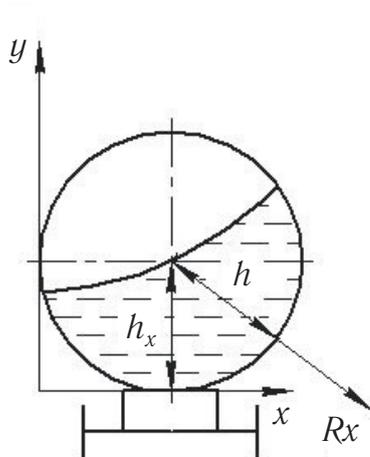
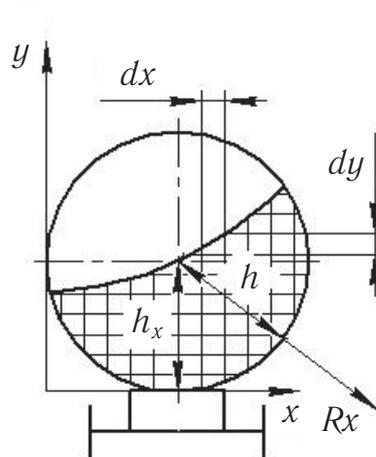


Рис. 2. Положение вагона при движении в кривом участке пути

Рис. 3. Параметры определения столбика h Рис. 4. Определения высоты столбика h

Данный расчет можно реализовать в виде компьютерной программы. Результатом расчета будет график зависимости от времени силы давления жидкости на правую и левую стенки котла цистерны в зависимости от направления ускорения $a_x - Rx(t)$.

На рис. 5 показан алгоритм программы расчета силы давления на правую стенку котла цистерны. 

Литература

1. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган; Под ред. М.Ф. Вериго. — Москва: Транспорт, 1986. — 559 с. — Текст: непосредственный.
2. Громаков, М.С. Математическая модель колебаний жидкого груза в котле цистерны при боковом отношении / М.С. Громаков. — Текст: электронный // Современные проблемы железнодорожного транспорта: сборник трудов по результатам международной интернет-конференции 21–22 марта 2019 г. — Москва: Российский университет транспорта, 2019. — С. 268–273. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37601-584> (дата обращения: 05.08.2021).
3. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Текст: непосредственный // Теоретическая физика: т. VI. — 3-е изд., испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 736 с.
4. Чугаев, Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. — 4-е изд., доп. и перераб. — Л.: Энергоиздат: Ленингр. отд.-ние, 1982. — 672 с. — С. 72–74. — Текст: непосредственный
5. Райков, Г.В. Моделирование технологических процессов в повышении эффективности работы вагоноремонтных предприятий / Г.В. Райков, К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.П. Бомбардиров. — Текст: непосредственный // Транспортное дело России. — 2019. — №3. — С. 143–144.
6. Лапшин, В.Ф. Методика построения моделей техпроцессов ремонта кузовов, ходовых частей, автотормозов и автосцепных устройств вагонов / В.Ф. Лапшин, К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.А. Петров. — Текст: непосредственный // Инновации и инвестиции. — 2019. — №6. — С. 211–213.
7. Сергеев, К.А. Комплексная оценка технического состояния электрооборудования пассажирских вагонов при деповском ремонте / К.А. Сергеев, О.Ю. Кривич, А.С. Антоновский. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2016. — №4. — С. 8–11.
8. Назаров, О.Н. Нормативное регулирование процессов создания нового подвижного состава железных дорог / О.Н. Назаров, К.А. Сергеев. — Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт. — 2014. — №10. — С. 34–42.
9. Сергеев, К.А. Информационное и программное обеспечение технолога вагоноремонтного предприятия / К.А. Сергеев, И.В. Гундаев, Е.С. Сидоров. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2011. — №2. — С. 97–101.

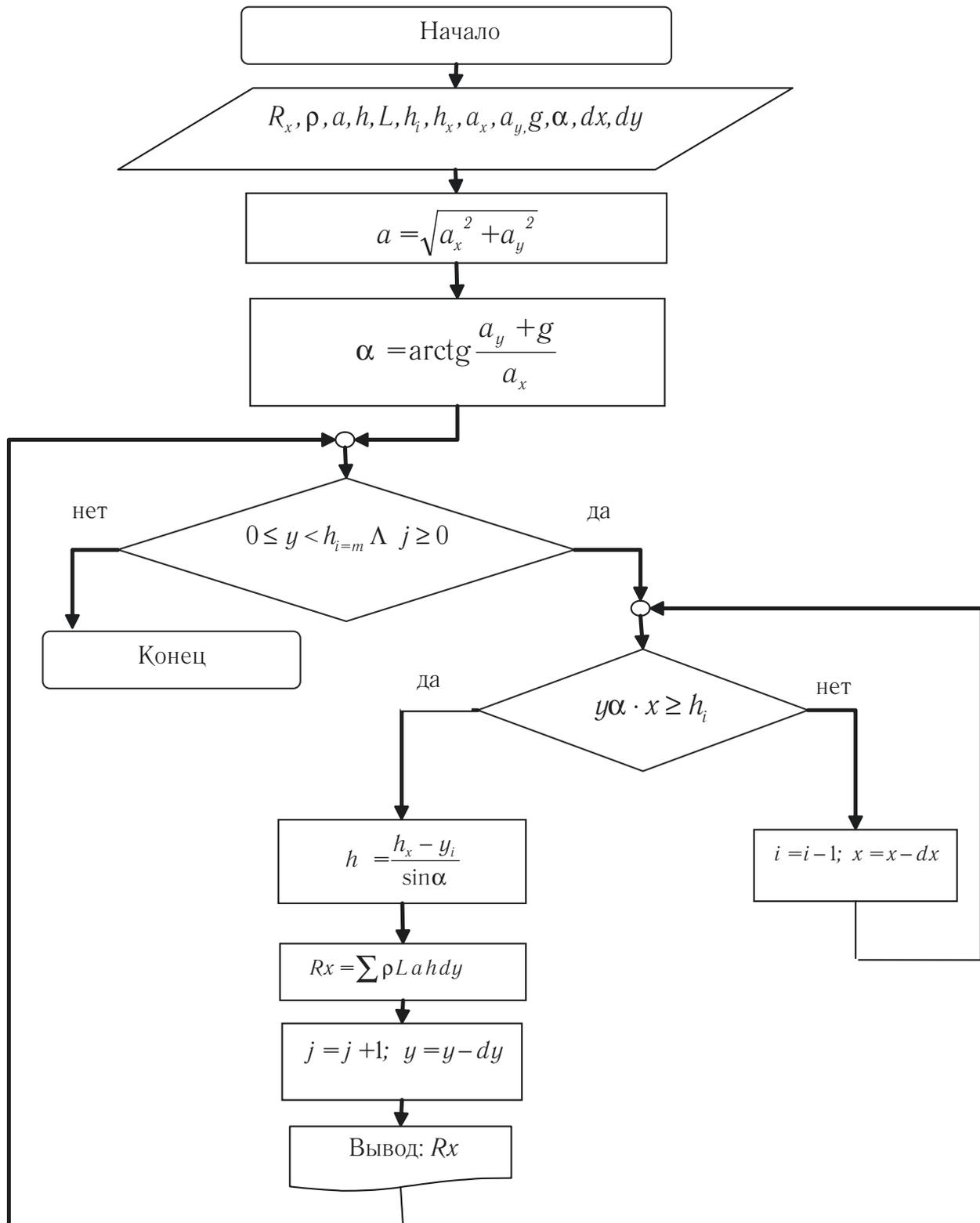


Рис. 5. Алгоритм программы расчета

ОСНОВЫ АЛГОРИТМИЗАЦИИ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ РИСКОВ НАРУШЕНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ХОЗЯЙСТВА ПУТИ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА



О.И. Веревкина



О.Н. Попов

Данная статья освещает принципы разработки алгоритмов для анализа динамики рисков нарушений безопасности движения поездов для линейных предприятий хозяйства пути как этапа автоматизации выбора мероприятий по снижению рисков с учетом выработки оптимальных с точки зрения жизненного цикла инфраструктуры мероприятий. Описаны проблемы, связанные с нормативной документацией, лежащей в основе оценки риска.

Ключевые слова: риск, динамика, алгоритм, цифровизация, схема, процессный подход

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_14

Задачи по цифровизации процессов функционирования предприятий, поставленные для линейных предприятий железнодорожного транспорта касаются непосредственно такой области как безопасность движения поездов и в частности автоматизации выбора мероприятий по снижению рисков нарушений безопасности движения (НБД) поездов. Одной из подзадач является анализ динамики риска, который позволяет учесть как сезонные колебания, так и объемы применяемых видов ремонта, тем самым увязать разрабатываемые меры в схему оптимального управления жизненным циклом инфраструктуры.

Оценка рисков на инфраструктуре производится как с целью улучшения показателей безопасности движения, так и с целью оптимизации управления безопасностью,

оптимизацией мер по снижению рисков. Управление для линейных предприятий железнодорожного транспорта является многокритериальным, поэтому управление с учетом рисков, неизбежно приходит к тому же, несмотря на попытку привести анализ рисков к анализу скалярной величины с единственным критерием. В данном случае рассматриваются следующие критерии:

1. Определяющие уровень допустимых рисков по подсистемам (по факторам) управления рисками (нормативные величины).
2. Определяющие фактический уровень самих рисков.
3. Позволяющие выбрать эксплуатационные показатели, определяющие прогноз показателей фактора риска.

Веревкина Ольга Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: исследования по обеспечению безопасности движения на железнодорожном транспорте. Автор 59 научных работ.

Попов Олег Нестерович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Техногенная безопасность» научно-исследовательского и испытательного центра (НИИЦ) «Криотрансэнерго» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: оценка рисков нарушений безопасности движения поездов, расчёты конструкций, математические модели. Автор 20 научных работ.

Мартынюк Игорь Владимирович, кандидат технических наук, директор, заведующий лабораторией «Техногенная безопасность» научно-исследовательского и испытательного центра (НИИЦ) «Криотрансэнерго» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: обеспечение безопасности движения. Автор 61 научной работы. Имеет один патент и одно свидетельство на программу ЭВМ.

Шевченко Анатолий Иванович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Комплексная безопасность и специальные программы» Российской академии путей сообщения Российского университета транспорта (РАПС РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: обеспечение безопасности и устойчивости перевозок в чрезвычайных ситуациях. Автор 39 научных работ.

4. Позволяющие осуществлять выбор значений параметров, управления эксплуатационными показателями, в соответствии с принципами оптимизации жизненного цикла верхнего строения пути.

5. Сохранения устойчивости перевозочного процесса при реализации неблагоприятных факторов и возникновения НБД с тяжелыми последствиями [1–2].

6. Разделения в оценке величины риска частоты и размера ущерба.

Последнее (п.6) демонстрирует замаскированное стремление в эксплуатации скалярного показателя – величины риска, что позволяет вернуться к двум первоначальным величинам – частоте нежелательных событий и размеру ущерба, порождает систему оценивания рисков с помощью матриц рисков и подчеркивает ограниченность системы оценки рисков при попытке ввести единственный критерий.

Является ли матрица рисков, столь популярная в настоящее время, уникальным инструментом, позволяющим учесть многокомпонентность риска с одной стороны и идею одного критерия с другой? В связи с формальной невозможностью идти по двум критериям одновременно, разделение критериев в матрице риска происходит путем назначения областей значимости, а эти области определяются в [3], уже с учетом двухкомпонентности вектора, определяющего риск. Законность определения значимости областей матрицы риска с помощью этой процедуры на данный момент не обоснована ничем, хотя и узаконены в нормативном документе [3].

Существует несколько вариантов оценивания областей значимости в матрице риска, более близких к принципу единого критерия, и они дают другие области значимости в матрице рисков. Таким образом, вопрос алгоритмизации формирования областей матриц риска на данный момент так же можно считать открытым.

Переходя к решению многокритериальной задачи (пп.1–6) в целом, нужно учитывать то, что удовлетворение сразу многим критериям – задача всегда трудно формализуемая. Усложняет задачу то, что управленцы экономисты и управленцы выполнения фактической работы на инфраструктуре по разному представляют себе понятие «оптимизация жизненного цикла верхнего строения пути», примером чему является, например, планирование выполнения выправки пути (адресно) и, очень часто, невыполнение этих планов в связи с фактически складывающейся обстановкой на линейном предприятии.

Кроме того, есть кластеры в оценке риска, связанные с оценкой риска при эксплуатации искусственных сооружений, оценкой риска на участках повышенного

влияния природных факторов (примерно 5% инфраструктуры), реализация общих схем анализа риска на которых без сложных экспертных оценок в сочетании с оценкой грузоподъемности, в ряде случаев невозможна.

В связи с вышеизложенным, целесообразно рассматривать схемы алгоритмов анализа динамики рисков на участках, где риски по технической составляющей определяются следующим набором факторов:

- нарушения геометрии рельсовой колеи (ГРК), третьего и четвертого уровней;
- дефектность рельсов;
- неисправность стрелочных переводов;
- нарушения норм содержания бесстыкового пути.

Далее подробно рассмотрим совокупность факторов, связанных с первым из перечисленных факторов.

Алгоритмизация оценки динамики рисков производится на основе оценки рисков НБД, общих и частных выражений для этих рисков, факторного анализа рисков. Этапы формирования таких оценок описаны в [4–8].

Оценка риска нарушения НБД выбранного вида (схода в поезде) производится по формуле:

$$R = \lambda \cdot f(x_i) \cdot \omega, \quad (1)$$

где λ – прогнозная интенсивность проявления факторов риска по технической составляющей;

$f(x_i)$ – функция вероятности возникновения НБД на 1 случай проявления фактора риска по технической составляющей – отклонения геометрии рельсовой колеи;

ω – средний ущерб от схода в поезде по статистическим данным;

x_i – показатели, характеризующие степень развития фактора риска.

Способ формирования компонент, входящих в (1) λ и $f(x_i)$ представлен на схеме (рис. 1).

После того, как сформирован алгоритм расчета компонент (1), динамика риска во времени может оцениваться для разных временных промежутков, при формировании входных данных по факторам риска в соответствии с длиной рассчитываемых промежутков. При этом имеет значение динамика самих входных данных. Например, при анализе фактора риска – неисправность ГРК 3,4-й степени поквартально, очевиден сезонный характер колебаний фактора, что видно из статистики как сетевой, так и на уровне дорог.

Графики, иллюстрирующие сезонность колебаний данного фактора риска представлены на рис. 2,3.

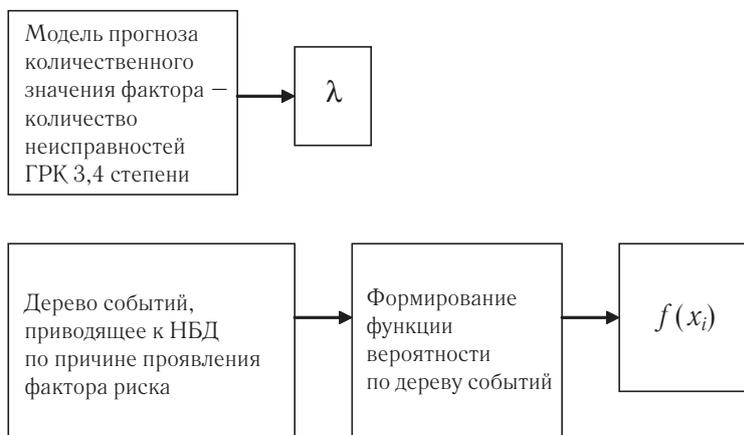


Рис. 1. Схема формирования компонент оценки риска

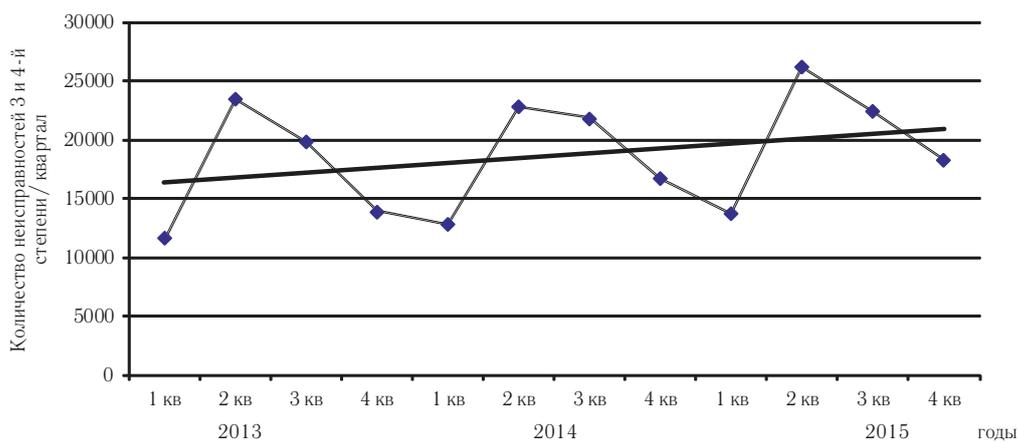


Рис. 2. Сезонность колебаний фактора риска в 2013–2015 гг. по сети ОАО «РЖД»

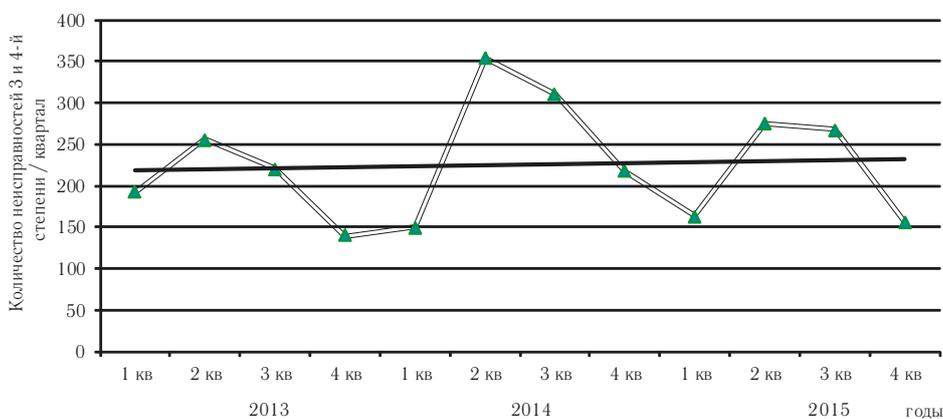


Рис. 3. Сезонность колебаний фактора риска в 2013–2015 гг. по Юго-Восточной железной дороге – филиалу ОАО «РЖД»

Указанный сезонный характер изменения фактора риска непосредственно влияет на риски возникновения НБД и влечет применение целого ряда предупреждающих мер, позволяющих компенсировать сезонность так, что на уровне фактического количества НБД отсутствует заметное проявление сезонности.

Несмотря на то, что сезонность в динамике фактора по сети и по отдельным дорогам проявляется по-разному, безусловное наличие этой динамической особенности требует дополнительного внимания и оценки.

Еще одним важным аспектом алгоритмизации рисков является расчет нормативных и фактических рисков в одних и тех же единицах. Внешне очевидная истина, к сожалению, нарушается в отраслевой нормативной документации по нормированию и оцениванию рисков. Например, узаконен расчет фактических рисков на диспетчерских участках в одних единицах, а нормативные значения рассчитываются в других. Естественно, что данный документ, несмотря на ряд бесспорных положений, содержащихся в нем, не может быть положен в основу алгоритмизации оценки динамики риска. Подробно данный вопрос рассмотрен в [10], где предложен вариант оценки нормированных и фактических рисков, позволяющий рассчитывать риски НБД в одних единицах.

Учет и анализ динамики рисков должен производиться также:

1. Хранением в памяти результатов оценки рисков за последние 3 года.
2. Графическим сопоставлением этих значений в единицах времени как год, так и квартал.

3. Отображением этих значений на матрице риска, с указанием направления изменения этих показателей.

4. Сопоставлением динамики входных данных об изменениях факторов риска с динамикой выходных данных.

5. Графическим отображением изменения тех рисков по классификатору, которые вносят наибольший вклад в итоговое значение риска.

6. Сравнением прогнозных значений с фактическими рисками (апостериорный анализ) и идентификацией причин расхождения этих величин в период пробной эксплуатации программного обеспечения, которое будет обеспечивать оценку рисков.

Выводы

1. Несмотря на предпринимаемые попытки продвинуться в направлении цифровизации, ряд вопросов в алгоритмах требует анализа и оценки научного сообщества. Попытки получить результат на неверных алгоритмах сродни строительству замков на песке. Поэтому вопрос оценки зон значимости матрицы риска остается открытым.

2. Актуальным при алгоритмизации оценок рисков является учет сезонности проявления факторов риска.

3. Алгоритмы расчета величин рисков и нормативных величин безусловно должны проводиться в единых экономических единицах.

4. Представлены схемы формирования основных компонент функциональных рисков НБД и виды анализа динамики риска, которые должны присутствовать в специализированном программном обеспечении. 

Литература

1. Шевченко, А.И. Повышение устойчивости перевозочного процесса на железнодорожном транспорте в условиях чрезвычайных ситуаций: специальность 05.26.02 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт) (технические науки)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шевченко Анатолий Иванович: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). – Москва. – 2008. – 16 с. – Текст: непосредственный.
2. Шевченко, А.И. Современные подходы к проблеме обеспечения безопасности и устойчивости перевозочного процесса в чрезвычайных ситуациях безопасности перевозок в чрезвычайных ситуациях / А.И. Шевченко, И.В. Мартынюк. – Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2018. – №4. – С. 91–99.
3. Методические рекомендации по построению матрицы рисков. – Москва: ОАО «РЖД», 2016. – 73 с. – Текст: непосредственный.
4. Вережкина, О.И. О системе оценки рисков в области функциональной безопасности движения поездов / О.И. Вережкина. – Текст: непосредственный // Мир транспорта. – 2017, Т.15. – №6 (73). – С. 206–221.

5. Веревкина, О.И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода / О.И. Веревкина. – Текст: непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017, Т.14, №4. – С. 615–627.
6. Методика идентификации рисков в области функциональной безопасности движения поездов на инфраструктуре ОАО «РЖД» для управления пути и сооружений. (Распоряжение ОАО «РЖД» от 01.12.2016 г. №4246р.). – Москва, 2016. – Текст: непосредственный.
7. Методика оценки рисков в области функциональной безопасности движения на инфраструктуре ОАО «РЖД». – Москва: ОАО «РЖД», 2016. – 72 с. – Текст: непосредственный.
8. Веревкина, О.В. Применение гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения в хозяйстве пути / О.В. Веревкина. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – №1(61). – С. 55–64.
9. Методика нормирования риска безопасности движения в зависимости от эксплуатационных характеристик диспетчерских участках; ОАО «РЖД». – Москва, 2014. – 41 с. – Текст: непосредственный.
10. Веревкина, О.И. О соблюдении принципа единства измерений в нормативной документации по оценке рисков для ОАО «РЖД»./ О.В. Веревкина. – Текст: непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – №3 (54). – С. 9–13.

СТРУННЫЙ ТРАНСПОРТ ДЛЯ ГОРОДСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ

Указаны особенности струнного транспорта. Дано описание различных видов струнного транспорта для городских перевозок пассажиров. Представлены преимущества перед классическими видами транспорта.

Ключевые слова: струнный транспорт, пассажирские перевозки, городской транспорт, юнивинд, юнибайк, юнилайт, юнибус, юникар

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_19



А.Э. Юницкий



В.А. Гарах

В настоящее время перспективным видом транспорта, готовым осуществлять грузопассажирские перевозки, стал струнный транспорт UST (Струнный транспорт Юницкого), признанный инновационным Министерством транспорта России в 2017 г. [1]. В нем беспилотные навесные и подвесные транспортные средства со стальными колесами перемещаются за счет электрической тяги по неразрезной предварительно напряженной рельсо-струнной путевой структуре. Данная технология воплощается ЗАО «Струнные технологии» в ЭкоТехноПарке (Марьина Горка, Республика Беларусь) и в Инновационном центре SkyWay (Шарджа, Объединенные Арабские Эмираты).

Транспорт UST, включающий подвижной состав в виде рельсовых электромобилей на стальных колесах, рельсо-струнную предварительно напряженную эстакаду и инфраструктуру второго уровня (станции, терминалы, депо, автоматизированную систему управления, энергообеспечение, связь, иное) характеризуется высокой скоростью движения, комфортом, безопасностью, а также низкой материалоемкостью и высокой энергоэффективностью [1;2].

Струнный транспорт является перспективным по ряду причин:

- используется в качестве энергии электричество, а не дизельное, бензиновое или иное топливо, загрязняющее окружающую среду;

Юницкий Анатолий Эдуардович, генеральный конструктор ЗАО «Струнные технологии». Область научных интересов: струнный транспорт, безракетная индустриализация ближнего космоса. Автор более 200 научных работ.

Гарах Виктор Александрович, заместитель генерального конструктора по конструированию ЗАО «Струнные технологии». Область научных интересов: пассажирский струнный транспорт. Автор пяти научных работ.

Цырлин Михаил Иосифович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование» Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ). Область научных интересов: перспективные технологии обработки материалов, струнный транспорт. Автор 62 научных работ.

- низкий уровень энергопотребления транспортными средствами SkyWay благодаря применению пары «стальное колесо — стальной рельс» и высоким аэродинамическим характеристикам подвижного состава, в том числе благодаря отсутствию эффекта экрана;

- сравнительно низкий расход строительных материалов на транспортную эстакаду благодаря предварительному натяжению струнных рельсов и неразрезной по длине конструкции путевой структуры (отсутствию деформационных температурных швов);

- малый расход конструкционных материалов на подвижной состав благодаря простоте конструкции рельсовых электромобилей; отсутствие массивных приводов, мощных рам, тяжелых ходовых тележек и колесных пар не требует больших затрат на их производство;

- минимальный объем земляных работ и точечный землеотвод под строительство слабонагруженных (в сравнении с традиционными транспортными эстакадами) опор ажурной путевой структуры;

- земля под дорогами может быть использована для разбивки парков, ведения сельского хозяйства и иной деятельности, т.к. путевая структура располагается на любой требуемой высоте, определяемой безопасностью этой деятельности [2].

Грузопассажирский струнный транспорт предназначен для внутригородских перевозок, для парков и мест отдыха, для сообщений с городами-спутниками. Транспорт UST для городских пассажирских перевозок представлен такими транспортными сред-

ствами, как юнивинд, юнибайк, юнилайт, юнибус и юникар [3]. Они разработаны в ЭкоТехноПарке, проходят испытания и сертификацию на двух указанных выше испытательных полигонах.

Юнивинд — монорельсовый подвесной легкий электромобиль малой вместимости, оборудованный двумя местами для сидения. Приводится в движение тяговым электроприводом, который питается от контактной сети или бортового накопителя энергии. Двигается по суперлегкой рельсо-струнной эстакаде. Благодаря максимально функциональной конструкции, простоте и низкой стоимости исполнения, минимальным энергетическим затратам, юнивинд является одним из самых доступных решений для организации сообщения в малонаселенных и отдаленных районах, а также в местностях со сложным рельефом. Модульная конструкция данного транспортного средства позволяет не только легко персонализировать изделие в виде линейки комплектаций, но и поставляться сразу с несколькими функциональными модулями (грузовой, грузопассажирский, пассажирский), при этом имея только один тяговый модуль, что значительно повышает рентабельность системы при малых, но систематических и стратегически важных грузопассажирских перевозках, учитывая основную стоимость транспортного средства (стоимость системы управления и тягового привода, которые конструктивно выполнены в тяговом модуле).

Общий вид юнивинда представлен на рис. 1. Технические характеристики даны в табл. 1 [3].



Рис. 1. Общий вид юнивинда

Таблица 1

Технические характеристики юнивинда U4-651

Параметры	Значение
Количество пассажиров, чел.	2
Снаряженная масса, кг	830
Полная масса, кг	1040
Габаритные размеры, ДхШхВ, м	0,74×0,985×3,50
Конструктивная скорость, км/ч	150
Максимальная производительность транспортного комплекса, пасс./ч в обе стороны	3600
Расход электроэнергии при скорости 100 км/ч, кВт×ч / пасс.×100 км	1,47
Пробег в автономном режиме при скорости 100 км/ч, км	250
Максимальное количество юнивиндов в жесткой или электронной сцепке, шт.	7

Юнибайк — бирельсовый, подвесной, легкий пассажирский электромобиль. Совмещает возможности высокоэффективного маломестного (индивидуального) электромобиля, транспорта второго уровня и спортивно-развлекательного объекта. В дополнение к бортовым (и внешним) источникам энергии имеется велогенератор, благодаря чему юнибайк может приводиться в движение мускульной силой пассажиров. В будущем — альтернатива легковому автомобилю, велосипеду, мотоциклу.

Общий вид юнибайка представлен на рис. 2.

Технические характеристики юнибайка приведены в табл. 2 [4].

Юнилайт — транспортное средство, перемещаемое по монорельсовой путевой структуре на высоте, предназначенное для отдельных категорий пользователей, имеющих хобби, желающих проводить активный отдых за городом, на природе. Пользователями транспортного средства могут быть рыбаки, лыжники, гольфисты. В юнилайте размещаются до 6 человек, предусмотрены держатели инвентаря для рыбалки,



Рис. 2. Общий вид юнибайка

Таблица 2

Технические характеристики юнибайка U4-621

Параметры	Значение
Количество пассажиров, чел.	2
Снаряженная масса, кг	900
Полная масса, кг	1100
Габаритные размеры, ДхШхВ, м	4,23×0,80×2,09
Конструктивная скорость, км/ч	150
Пробег в автономном режиме при скорости 100 км/ч, км	100
Расход электроэнергии при скорости 100 км/ч, кВт×ч / пасс.×100 км	1,66
Максимальная производительность транспортного комплекса, пасс./ч в обе стороны	3600
Максимальное количество юнибайков в жесткой или электронной сцепке, шт.	7

лыж или гольфа. Транспортное средство может быть выполнено с сиденьями и без.

Общий вид одиночного юнилайта представлен на рис. 3. Технические характеристики в табл. 3 [5].

Юнибус — пассажирский электромобиль вместимостью от 10 до 90 пассажиров. Предназначен для движения по городским и пригородным маршрутам. Возможны различные варианты исполнения транспортного средства (навесной/подвесной, монорельсовый/бирельсовый/квадрорельсовый); конструктив и планировка определяются особенностями проекта и пожеланиями заказчика. Юнибус может быть оди-

ночным (типа легкового автомобиля или автобуса), а также в виде состава (поезда) с различным количеством и типом составных единиц, связанных друг с другом механически или электронной сцепкой. Это беспилотный рельсовый электромобиль, управление которым осуществляется в автоматическом режиме без присутствия оператора в транспортном средстве. Юнибус рассчитан на эксплуатацию при безгаражном хранении. В транспортном средстве предусмотрены места для инвалидов. Общий вид одного из юнибусов представлен на рис. 4.



Рис. 3. Общий вид юнилайта

Таблица 3

Технические характеристики юнилайта U4-830

Параметры	Значение
Количество пассажиров, чел.	6
Снаряженная масса, кг	500
Полная масса, кг	950
Эксплуатационная скорость, км/ч	30
Мощность двигателя, кВт	3
Количество двигателей привода	8

Юнибус состоит из тягового и пассажирского модуля, соединенных между собой. Модуль тяговый предназначен для обеспечения движения транспортного средства с возможностью изменения скорости, направления и ускорения. Пассажирский модуль юнибуса имеет пылеводонепроницаемую сборную конструкцию, в которую входят: кузов с внутренней обшивкой, сиденьями и поручнями, остеклением, дверями, задним обтекателем; оборудование (компоненты климатической системы, компоненты системы освещения, компоненты системы звукового и видеоинформирования, компоненты системы дуплексной речевой связи, компоненты системы управления, иное). Для обеспечения должного комфорта пассажиров юнибуса применена подвеска, включающая направляющий аппарат, упругие и диссипативные компоненты [6].

Основные технические характеристики юнибуса приведены в табл. 4 [7].

Юникар – бирельсовый подвесной электромобиль для перевозки пассажиров по рельсо-струнной эстакаде. Малогабаритный и комфортный, содействует значительной разгрузке городских улиц. Юникар оборудован только сидячими местами. Он обеспечит более существенную пропускную способность транспортной системы, чем внушительные по размерам, стоимости и вместимости железнодорожные поезда и автобусы, которые именно из-за своих габаритов не могут следовать друг за другом с большой частотой.

Юникар является беспилотным транспортным средством, управление которым осуществляется в автоматическом режиме без присутствия водителя (оператора), как и в юнибусе.



Рис. 4. Общий вид 14-ти местного подвесного бирельсового юнибуса

Юникар является составным транспортным средством, имеет модульную конструкцию. Одиночный электромобиль состоит из активного транспортного модуля с передними и задними обтекателями. Юникары могут быть также составными с 3, 5 или 7 транспортными модулями.

Общий вид одиночного юникара представлен на рис. 5. Технические характеристики приведены в табл. 5 [8].

Струнный транспорт UST имеет все необходимые качества транспортно-инфраструктурного комплекса будущего, способного повлиять на ход развития цивилизации, как это сделали в свое время железнодорожный, авиационный и автомобильный транспорт. 

Таблица 4

Технические характеристики юнибуса U4-210

Параметры	Значение
Количество пассажиров, чел.	14
Количество мест для сидения, чел.	2
Снаряженная масса, кг	2450
Полная масса, кг	3500
Габаритные размеры, ДхШхВ, м	5,11×1,34×3,195
Конструктивная скорость, км/ч	150
Эксплуатационная скорость, км/ч	100
Пробег в автономном режиме при скорости 100 км/ч, км	250
Расход электроэнергии при скорости 100 км/ч, кВт×ч / пасс.×100 км	0,47
Максимальная производительность транспортного комплекса, пасс./ч в обе стороны	20160
Максимальное количество юнибусов в жесткой или электронной сцепке, шт.	7



Рис. 5. Общий вид юникара

Таблица 5

Технические характеристики юникара U4-430

Параметры	Значение
Количество мест для сидения, чел.	6
Снаряженная масса, кг	2440
Полная масса, кг	2940
Габаритные размеры, ДхШхВ, м	4,69×1,65×2,38
Конструктивная скорость, км/ч	150
Эксплуатационная скорость, км/ч	100
Пробег в автономном режиме при скорости 100 км/ч, км	300
Расход электроэнергии при скорости 100 км/ч, кВт×ч / пасс.×100 км	0,84
Максимальная производительность транспортного комплекса, пасс./ч в обе стороны	8640
Максимальное количество юникаров в жесткой или электронной сцепке	7

Литература

1. Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе / А.Э. Юницкий. – Минск, Силакросс: ПНБ принт, 2019. – 576 с. – ISBN 978-985-90498-1-1. – Текст: непосредственный.
2. Юницкий, А.Э. Экологические аспекты струнного транспорта / А.Э. Юницкий, М.И. Цырлин. – Текст: непосредственный // Инновационный транспорт. – 2020. – №2. – С. 7–9.
3. Юницкий, А.Э. Инновационные транспортно-инфраструктурные технологии SkyWay: альбом / А.Э. Юницкий. – Минск, 2019. – 89 с. – Текст: электронный. – URL: https://unitsky.engineer/assets/files/shares/2019/2019_53ru.pdf (дата обращения: 04.08.2021).
4. Юницкий, А.Э. Свидетельство на товарный знак «Юнибайк Unibike» / А.Э. Юницкий. – Текст: непосредственный // Национальный центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 2 с.
5. Средство транспортное Юнилайт U4-830. Описание устройства. – Минск, 2020. – 52 с. – Текст: непосредственный.
6. Средство транспортное Юнибус U4-210. Руководство по эксплуатации. – Минск, 2019. – 81 с. – Текст: непосредственный.
7. Юницкий, А.Э. Свидетельство на товарный знак «Юнибус Unibus» / А.Э. Юницкий. – Текст: непосредственный // Национальный центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. – Минск, 2018. – 2 с.
8. Средство транспортное Юникар U4-430. Руководство по эксплуатации. – Минск, 2018. – 114 с. – Текст: непосредственный.

МЕТОДИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ ПО ЗАМЕРАМ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ



Ю.А. Кольцов



А.А. Воробьев

В настоящее время особое значение имеет состояние тягового подвижного состава. В данной статье приведена более простая для практического применения методика анализа, оценки и определения ресурса оборудования по выборкам контролируемых параметров. Методика основана на группировках конкретных параметров выбранного оборудования.

Ключевые слова: железная дорога, параметрическая надежность, ресурс, колесная пара, показатели долговечности

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_26

В процессе эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС), в конкретных условиях эксплуатации, фиксируется большое количество информации, характеризующей изменение технического состояния оборудования по мере увеличения его наработки [1]. Эта информация может быть получена в виде: контролируемых параметров, измеряемых различными приборами и устройствами; наработок оборудования до отказа и между его отказами; параметров диагностирования, получаемых с помощью бортовых и стационарных средств диагностирования.

С целью решения задач, направленных на повышение надежности оборудования ТПС, увеличения его межремонтных пробегов и, соответственно, снижения

затрат на техническое содержание, наибольший интерес представляет оборудование, которое лимитирует межремонтные пробеги ТПС [2;3].

В настоящее время к такому оборудованию относятся колесные пары и тяговые электродвигатели. Так пробег до текущего ремонта ТР-3 лимитирует минимальная величина толщины бандажа (диаметра колеса для цельнокатаных колес) и техническое состояние изоляции обмоток тяговых электродвигателей. Это оборудование в первую очередь требует восстановления работоспособности.

Важнейшей составляющей для достоверной оценки показателей безотказности и долговечности оборудования является обеспечение качества и эффективно-

Кольцов Юрий Александрович, преподаватель кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), начальник участка по гарантийному обслуживанию электропоездов ООО «Уральские локомотивы». Область научных интересов: организация и совершенствование системы ремонта и технического обслуживания подвижного состава, надежность подвижного состава. Автор десяти научных работ.

Воробьев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность и совершенствование системы ремонта и эксплуатации тягового подвижного состава. Автор более 190 научных работ, в том числе одной монографии, двух учебников и более десяти учебных пособий.

Бодриков Денис Игоревич, ассистент кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), начальник отдела Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала ОАО «РЖД». Область научных интересов: имитационное моделирование, оптимизация работы станции стыкования, организация системы эксплуатации и ремонта. Автор 11 научных работ.

Смирнов Валентин Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: повышение надежности локомотивов. Автор 150 научных работ. Имеет три патента на изобретения.

сти исходной информации [4–7], которые определяются следующими факторами: представительность и достоверность исходных данных, полученных в конкретных условиях эксплуатации ТПС; применение эффективных современных методов обработки исходных данных, позволяющих при оценке показателей надежности «извлечь» максимальную достоверность полученных результатов.

Выполняя расчет показателей надежности оборудования, следует понимать, что значения контролируемых параметров колесных пар невозможно отслеживать непрерывно в виде непрерывных реализаций. Обычно замеры осуществляют при проведении очередного осмотра и замеров колесных пар в установленные для этого сроки.

При отслеживании наработок подвижного состава и проведении качественных замеров контролируемых значений колесных пар от их полного восстано-

вления, то на выходе мы получим реализацию контролируемого параметра. При выходе контролируемого параметра за допуск, происходит отказ и браковка колесной пары. На практике контролируемые параметры колесных пар разделяют на две категории: увеличивающийся (прокат); уменьшающийся (толщина бандажа, толщина гребня бандажа) [8].

Реализация контролируемых параметров приведена на рис. 1.

Проведение периодических замеров параметров колесных пар позволяет определить показатели их надежности, а также сделать выводы об их техническом состоянии.

В настоящее время замеры параметров бандажей колесных пар локомотивов производят с периодичностью, не превышающей одного раза за тридцать календарных дней. На графике, по оси абсцисс, отмечается контролируемый параметр пробега локомотива.

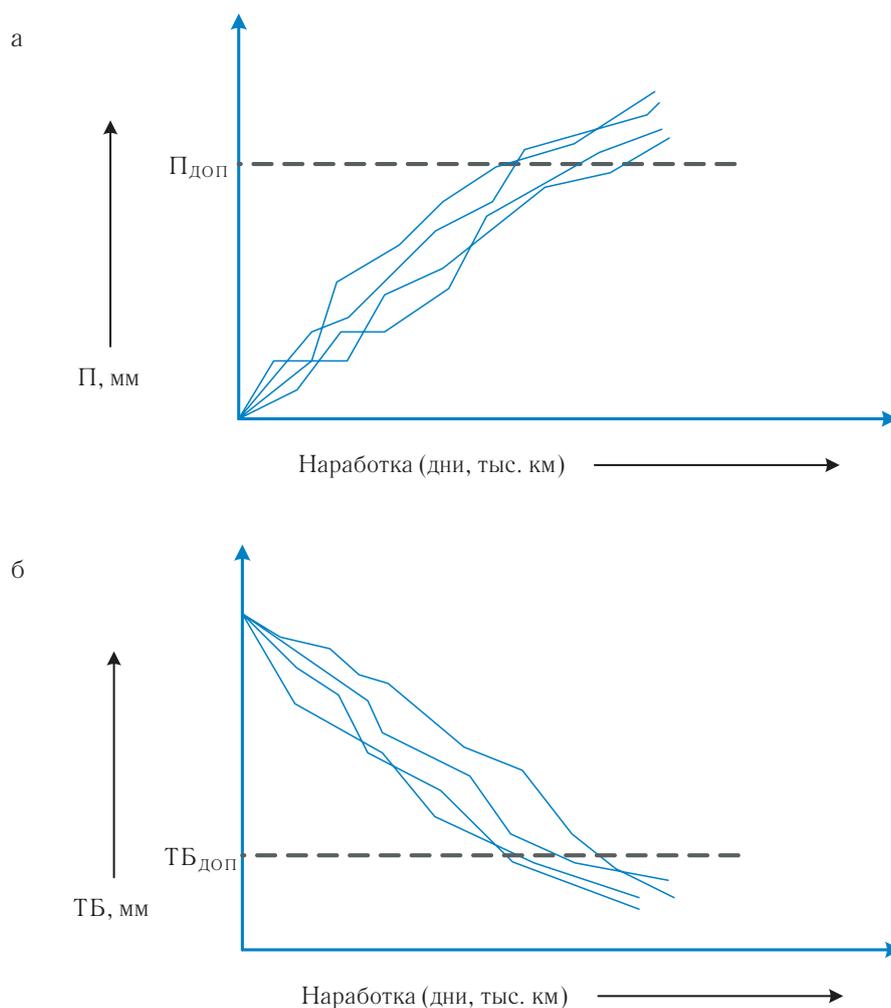


Рис. 1. Реализация контролируемых параметров:
а – увеличение проката бандажа; б – уменьшение толщины бандажа

Известно, что за одинаковый промежуток времени локомотивы могут преодолеть различное расстояние, в силу тех или иных причин. Однако разбросом значений пробега различных локомотивов можно пренебречь и при расчетах определять пробеги локомотивов до очередного осмотра и замера параметров бандажей колесных пар, как одинаковые. При этом значения измерений будут формировать эквидистантные ряды наблюдений [9].

В настоящее время для расчетов показателей безотказности применяется методика, основанная на группировке наработок бандажей, представленной в [10]. Но у этого решения есть некоторые минусы. Например, при смене бандажей колесных пар разброс замеров не получится контролировать в любых пределах измерения.

С целью получения максимальной достоверности оценок показателей надежности, в данной работе предложена новая методика систематизации и обработки данных контролируемых параметров оборудования, характеризующих его техническое состояние по мере увеличения наработки.

План необходимых действий по данной методике приведен ниже.

1. Формируется поле допуска контролируемого параметра, которое разбивается на интервалы такой величины, чтобы выборки наработок, при которых получены значения контролируемых параметров, были представительными.

2. В соответствующих интервалах формируются выборки значений контролируемых параметров, находящиеся в пределах рассматриваемого интервала разбиения поля допуска ($x_{\text{ном}} - x_{\text{доп}}$). Реализация формирования выборок значений контролируемых параметров представлена на рис. 2.

3. Формируются выборки наработок, при которых получены соответствующие значения контролируемых параметров в пределах рассматриваемого интервала разбиения: $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{n_j}$, где t_i – наработка, соответствующая i -му замеру в пределах рассматриваемого j -го интервала разбиения поля допуска; n_j – величина выборки значений наработок для j -го интервала, соответствующая выборке значений контролируемого параметра.

Соответствующая выборка значений контролируемого параметра будет представлять собой: $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{n_j}$.

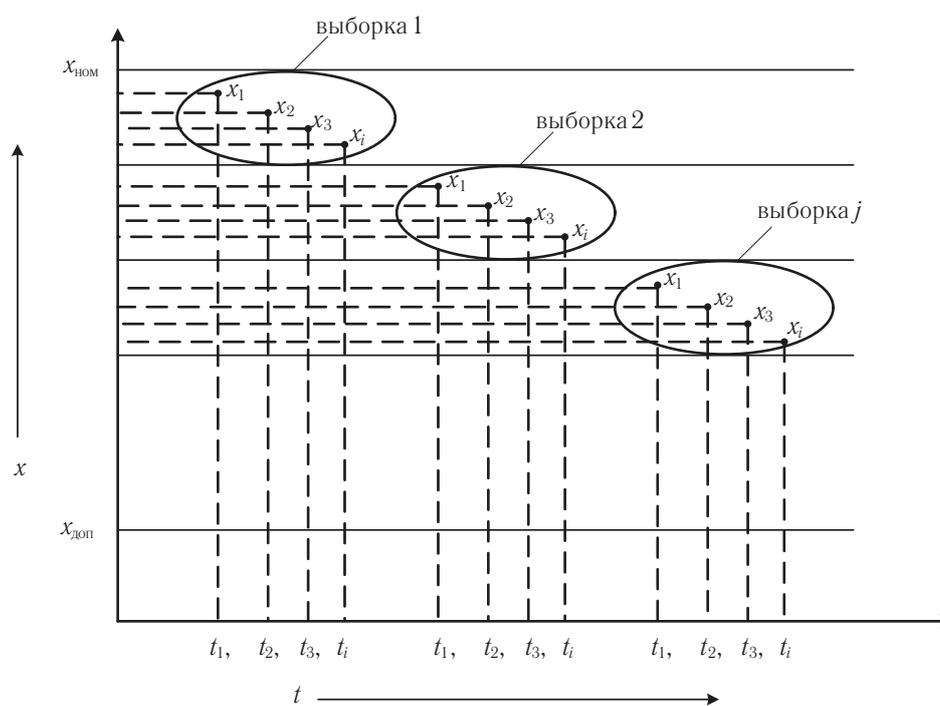


Рис. 2. Реализация формирования выборок значений контролируемых параметров в пределах поля допуска (для уменьшающегося контролируемого параметра)

Методика расчета показателей безотказности

Наработка — непрерывная случайная величина и ее закон распределения описывается соответствующей плотностью распределения.

Закон распределения выбирается в зависимости от физического процесса, который влияет на изнашивание агрегатов и узлов.

Установлено, что случайная величина наработки описывается нормальным законом распределения, что соответствует действию закона больших чисел.

В соответствии с этим законом, каждый из большого числа случайных факторов оказывает одинаковое влияние на значение случайной величины, что соответствует распределению её по нормальному закону.

Для прогнозирования изменения наработки бандажей колесных пар с целью оценки показателей долговечности, определяются параметры и значения числовых характеристик контролируемого параметра. Числовые характеристики наработки и вид закона распределения позволяют прогнозировать процесс изменения величин наработки по мере увеличения пробега ТПС, для определения показателей долговечности (гамма-процентного ресурса) бандажей. Для этой цели определяют математическое ожидание m_i и среднеквадратическое отклонение σ_i наработки.

Эту зависимость в общем виде можно представить, как нелинейную функцию $y=f(a_1, a_2, \dots, a_s, t_i)$ аргумента t_i , в состав которой входит s параметров $a_1, a_2, \dots, a_s, t_i$. Используя эту функцию, нужно аппроксимировать практическую регрессию, заданную в виде N

точек (t_i, y_i) при $i=1, 2, \dots, n$, где y — какой-либо параметр наблюдаемого закона распределения.

Параметры экспоненциального, равномерного и гамма распределения выражаются через математическое ожидание и дисперсию. Они же являются и параметрами нормального закона распределения.

Метод наименьших квадратов используется для нахождения параметров функции y :

$$z(a_1, a_2, \dots, a_s) = \sum_{i=1}^n (f(a_1, a_2, \dots, a_s, x_i) - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Зависимости $m_i(x)$ и $\sigma_i(x)$ изнашиваемых бандажей электроподвижного состава, представляются в виде линейных функций. Чем меньше толщина бандажа, тем больше среднее значение наработки (рис. 3).

На практике полученные значения толщины бандажей представляют зону нормальной эксплуатации (линейную), что представлено на рис. 4, 5.

Эмпирические зависимости характеристик $m_i(x)$ и $\sigma_i(x)$, согласно рис. 4, 5 изнашиваемых бандажей колесных пар, аппроксимируются функцией вида:

$$y = ax + b. \quad (2)$$

В соответствии с методом наименьших квадратов будет:

$$\sum_{i=1}^n ([y_i - (ax_i + b)]^2) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $y_i = \begin{cases} m_i \\ \sigma_i \end{cases}$ при аппроксимации зависимостей $\begin{cases} m(x) \\ \sigma(x) \end{cases}$.

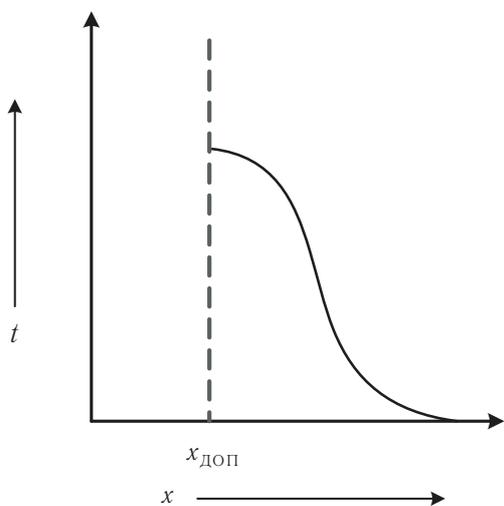


Рис. 3. Зависимость толщины бандажа от наработки

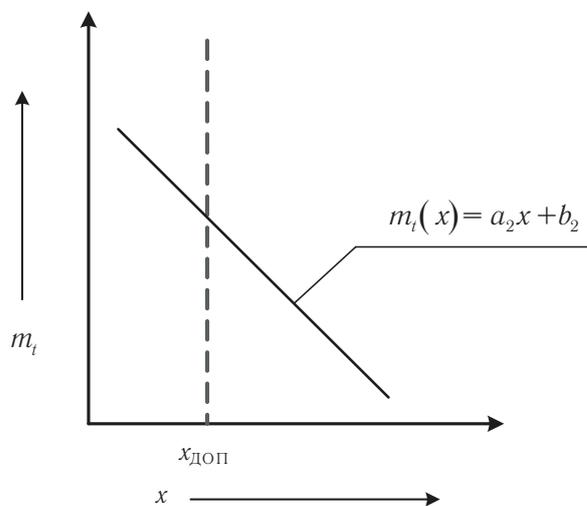


Рис. 4. Зависимость математического ожидания наработки от толщины бандажа в заданном интервале

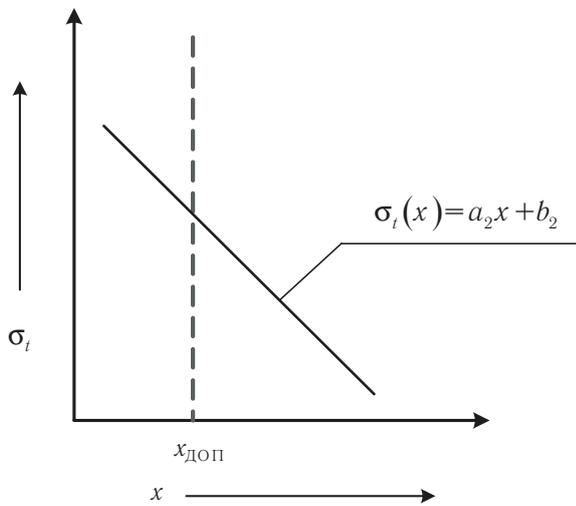


Рис. 5. Зависимость среднеквадратического отклонения наработки от толщины бандажа в заданном интервале

Коэффициент a линейной функции по методу наименьших квадратов определяется как:

$$a = r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}, \quad (4)$$

где r_{yx} — коэффициент корреляции случайных величин y и x ;

σ_y, σ_x — среднеквадратические отклонения, соответственно, y и x , находящиеся по формулам:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - m_y)^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2}, \quad (6)$$

где m_x — среднее значение пробега, $m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$;

m_y — среднее значение величины y , $m_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$.

Коэффициент b в уравнении регрессии определяется:

$$b = m_y - a m_x. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции r_y характеризует тесноту линейной связи между случайными величинами y и t , что представлено в формуле:

$$r_{yt} = \frac{k_{yt}}{\sigma_y \sigma_t} = \frac{\alpha_{11}(y,t) - m_y m_t}{\sigma_y \sigma_t}, \quad (8)$$

где $\alpha_{11}(y,x)$ — второй смешанный начальный момент

случайных величин y и x , $\alpha_{11}(y,x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i x_i$.

Исходя из зависимостей $m(x)$ и $\sigma(x)$, можно сделать анализ процесса изнашивания бандажей колесных пар и определить значения показателей долговечности.

Для того, чтобы спрогнозировать процесс изнашивания бандажей, необходимо экстраполировать зависимости $m(x)$ и $\sigma(x)$ в область больших наработок.

Далее рассчитываются характеристики $m_t(x)$ и $\sigma_t(x)$ распределения толщин бандажей в зоне экстраполяции, путем подстановки в выражения значений пробега x . После чего строят функцию распределения для известного значения допуска на толщину бандажа ($x_{\text{доп}} = 45$ мм).

Выводы

1. Предложена методика для анализа показателей безотказности и долговечности оборудования ТПС.

2. В дальнейшем, по результатам расчета показателей безотказности при группировке толщин бандажей колесных пар ТПС, имеется возможность сравнения данной методики с методикой, основанной на группировке наработок бандажей.

3. Расчеты по данной методике имеют преимущества над методикой группировки наработок бандажей, т.к. при смене бандажей колесных пар разброс замеров можно контролировать в любых пределах измерения.

4. Приведенная методика позволит оценить параметрическую надежность элементов различного оборудования ТПС и при ограниченном количестве одноименного оборудования на одном локомотиве. Помимо бандажей колесных пар по данной методике можно оценить, к примеру, надежность контактных вставок токоприемников. 

Литература

1. Скребков, А.В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электропоездов в конкретных условиях эксплуатации: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скребков Алексей Валентинович; Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. — Москва, 2003. — 137 с. — Текст: непосредственный.

2. Воробьев, А.А. Оценка ресурса оборудования ТПС / А.А. Воробьев, А.В. Скребков. – Текст: непосредственный // Мир транспорта / МИИТ. – М. – 2012. – № 5. – С. 38–42.
3. Воробьев, А.А. Рационализация системы ремонта ТПС / А.А. Воробьев, А.В. Горский, А.В. Скребков. – Текст: непосредственный // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 64–68.
4. Данковцев, В.Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов : учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта / В.Т. Данковцев, В.И. Киселев, В.А. Четвергов. – Москва: Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2007. – 556 с. (Высшее профессиональное образование. Локомотивы); – ISBN 978-5-89035-531-7. – Текст: непосредственный.
5. Надежность подвижного состава: учебник / А.А. Воробьев, А.В. Горский, А.Д. Пузанков и др. – Москва: Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2017. – 301 с. – ISBN 978-5-89035-978-0. – Текст: непосредственный.
6. Горский, А.В. Надежность электроподвижного состава: учебник для вузов ж.-д. транспорта / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – Москва: Маршрут, 2005. – 303 с. ISBN 5-89035-170-2. – Текст: непосредственный.
7. Галкин, В.Г. Надежность тягового подвижного состава: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – Москва: Транспорт, 1981. – 184 с. – Текст: непосредственный.
8. Кольцов, Ю.А. Оценка ресурса колесных пар электровозов по информации о замерах контролируемых параметров / Ю.А. Кольцов, А.В. Скребков. – Текст: непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – №4 (63). – С. 49–52.
9. Исаев, И.П. Выбор измерителя наработки электровоза для определения ресурса изнашиваемых деталей / И.П. Исаев, А.В. Горский, А.А. Воробьев. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1980. – №2.
10. Анализ процесса изнашивания и определения ресурса узлов электроподвижного состава: учебное пособие по дисциплине «Эксплуатация и ремонт ЭПС» / А.А. Воробьев, А.В. Горский, И.К. Лакин, С.В. Володин. – Москва: МИИТ, 2001. – 35 с. – Текст: непосредственный.

ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВАГОНПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА



Е.В. Маловецкая



Р.С. Большаков

Предлагается нетрадиционный подход для оценки сезонной неравномерности вагонопотоков, основанный на построении математических моделей прогноза. Идентификация моделей временного ряда колебаний вагонопотоков, сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог, производится на основе системного подхода с возможностями прогнозирования их объемов. Получены графики временных рядов и коррелограмм.

Ключевые слова: математическая модель, временной ряд вагонопотоков, системный подход, колебание вагонопотоков, модель прогноза

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_32

В современных условиях работы неравномерность в погрузке и перевозках грузов все более увеличивается, что вызывает существенные потери на железнодорожном транспорте. Одной из причин этого является переход от системы глобального государственного планирования к рыночным методам составления планов. Ряд исследований показывает, что за годы реформирования отрасли внутригодовая неравномерность перевозок возросла в среднем на 7–10%, а суточная — на 50% [2]. Представленный в статье материал затрагивает вопросы сезонной (годовой) неравномерности вагонопотоков, изучению которой не уделялось столь значительного внимания, как суточной, рассмотренной всесторонне в работах таких авторов как В.В. Повороженко, А.К. Угрюмов, В.И. Бодюл.

Особо актуальна проблема неравномерности по пунктам стыкования железных дорог и при погрузке вагонов в направлении портов Дальнего Востока,

функционирование которых характеризуется колебаниями объемов работы в значительных пределах. Возможность прогнозирования неравномерности перевозочного процесса, а также неравномерности погрузки с установлением соответствующих показателей — ключевой вопрос в ритмичности работы транспорта [1–5]. При оценке сезонной неравномерности вагонопотоков классическими методами возникают значительные погрешности. В качестве альтернативного решения данного вопроса авторы предлагают к рассмотрению обновленный методический инструментарий, позволяющий в последующем оценивать и прогнозировать неравномерность вагонопотоков.

В представленной статье проведен анализ структуры временных рядов колебаний вагонопотоков по пунктам стыкования железных дорог с целью дальнейшего построения модели прогноза колебаний вагонопотоков и в дальнейшем погрузки грузов в адрес портов Дальнего Востока.

Маловецкая Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: организация движения длинносоставных поездов, математическое моделирование изменения перевозочных процессов, системный анализ. Автор более 30 научных работ.

Большаков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: организация движения поездов, динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, системный анализ. Автор более 180 научных работ, в том числе двух монографий. Имеет более 30 патентов на изобретения.

Также рассмотрен транзитный вагонопоток, проходящий стыковые пункты без переработки. В дальнейшем планируется исследование вагонопотока, подлежащего переработке на станциях проследования и рассмотрение вариантов пропуска данного вагонопотока в составах различных категорий групповых поездов с прикреплением к расписанию.

Исследования структуры временного ряда с целью построения в дальнейшем адекватной модели прогноза, а также, осуществления анализа других временных рядов, связанных с исследуемым, не представляется возможным без установления структуры исследуемого ряда и структуры рядов с ним связанных [6–8].

В процессе составления моделей прогноза на долгосрочный период крайне важно установить, к каким именно классам рядов относится исследуемый временной ряд. Это могут быть либо стационарные ряды – TS (trend stationary), либо ряды, которые приводятся к стационарному виду – DS (difference stationary) [9].

Поэтому первым шагом в ходе исследования ряда является построение автокорреляционной и частной автокорреляционной функций.

Данная методика основана на построении модели прогноза вагонопотоков, сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог и движущихся далее в направлении морских портов с последующим построением математической модели погрузки грузов, на основе которой в последующем можно будет спрогнозировать погрузку на предстоящий год.

Предложенный инструментарий позволяет разработать модели прогноза для оценки сезонной неравномерности погрузки грузов в направлении морских портов.

Все это будет давать возможность улучшить качество перевозочного процесса: возможность прогнозирования на перспективу и, как следствие, повысит качество принимаемых решений управленческим аппаратом холдинга «РЖД». Весь спектр мероприятий состоит в возможности построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», помимо этого появится возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети.

В настоящей работе рассматривается идентификация моделей временного ряда колебаний вагонопотоков и предложены модели для последующего построения прогноза, а также применен системный подход к решению проблемы прогнозирования объемов вагонопотоков. Возможность реализации прогнозов по средствам построения математических моделей является достаточно актуальной и является

особо необходимой в управленческом аппарате холдинга «РЖД».

Общие положения. Постановка задачи

Пусть даны последовательности $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$ и $y(t_{i+k}), y(t_{2+k}), \dots, y(t_{n+k})$, которые сдвинуты относительно друг друга на k моментов времени или, по-другому, с лагом k . Тогда можно определить уровень статистической зависимости между ними, вычислив оценку коэффициента автокорреляции $r(k)$ и построив коррелограмму [10]. Значение коэффициента автокорреляции вычисляется по следующей формуле:

$$r(k) = \frac{(n-k) \sum_{i=1}^{n-1} y_i y_{i+k} - \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_{i+k} \right)}{\sqrt{(n-k) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_i \right)^2} \sqrt{(n-k) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_{i+k} \right)^2}}. \quad (1)$$

«Последовательность коэффициентов корреляции $r(k)$, где $k=1, 2, \dots, n$, как функция интервала k между наблюдениями называется автокорреляционной функцией (ACF Autocorrelation function)» [11].

«Частной автокорреляцией называется автокорреляция, существующая между разделенными временем τ членами ряда $y(t)$ и $y(t+\tau)$ при устранении влияния на эту взаимосвязь всех промежуточных значений ряда. Величина τ называется порядком частной автокорреляции.» [12–15].

Частная автокорреляция второго порядка определяется по формуле:

$$r_{\text{частн}}(2) = \frac{r(2) - r^2(1)}{1 - r^2(1)}. \quad (2)$$

Значения частных автокорреляционных «функций» более высоких порядков могут быть подсчитаны аналогичным образом с использованием формулы» [6]

$$r_{\text{частн}}(2) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r(1) & \vdots & r(1) \\ r(1) & 1 & \vdots & r(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(m-1) & r(m-2) & \vdots & r(m) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & r(1) & \vdots & r(m-1) \\ r(1) & 1 & \vdots & r(m-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(m-1) & r(m-2) & \vdots & 1 \end{vmatrix}}. \quad (3)$$

«В настоящее время на Российских железных дорогах имеются 66 междорожных стыковых пункта. Они, в основном, отличаются объемами пропуска (обмена) грузовых поездов между железными дорогами. Работа стыковых станций осуществляется по одной общей технологии.» [16].

Особый интерес представляют железнодорожные стыковые пункты, расположенные в границах Восточного полигона [17], самого передового на сети дорог РФ и имеющего непосредственные выходы к морским портам Дальнего Востока.

В связи с этим был проанализирован статистический материал, характеризующий процессы приема и сдачи вагонов [18] по стыковому пункту Архара на Дальневосточной железной дороге, по стыковому пункту Петровский завод на Забайкальской железной дороге, по стыковому пункту Тайшет на Восточно-Сибирской железной дороге и по стыковому пункту Мариинск на Красноярской железной дороге.

На рис. 1 представлены графики исследуемых временных рядов.

Исходя из графиков, можно легко заметить изменчивый характер математического ожидания, который выражается в наличии тренда, имеющейся периодичности.

При этом отчетливо видно, что нет возможности разделения ряда на несколько частей, каждая из которых имела бы схожее среднее.

Таким образом, можно говорить о нестационарности рядов, представленных на графиках (см. рис. 1а–1г).

Оценка временных рядов

Анализ, осуществляемый по графикам — это начальная диагностика ряда. Еще одним из способов оценки ряда на стационарность является коррелограмма исследуемого временного ряда (ACF).

Графики коррелограмм исследуемых временных рядов представлены на рис. 2,3.

В случае, если исследуемый ряд стационарен, то его теоретическая ACF сходится к 0, при этом необходимо отметить, что сходится она постепенно. Поскольку исследование проходит с выборочными временными рядами, а, следовательно, и с выборочными автокорреляционными функциями, то сделать окончательный вывод только по коррелограмме сложнее.

Также необходимо отметить, что сложности диагностики по коррелограмме связаны еще и с тем, что анализируемые временные ряды являются достаточно короткими, поэтому фиксируется достаточно быстрое убывание ACF.

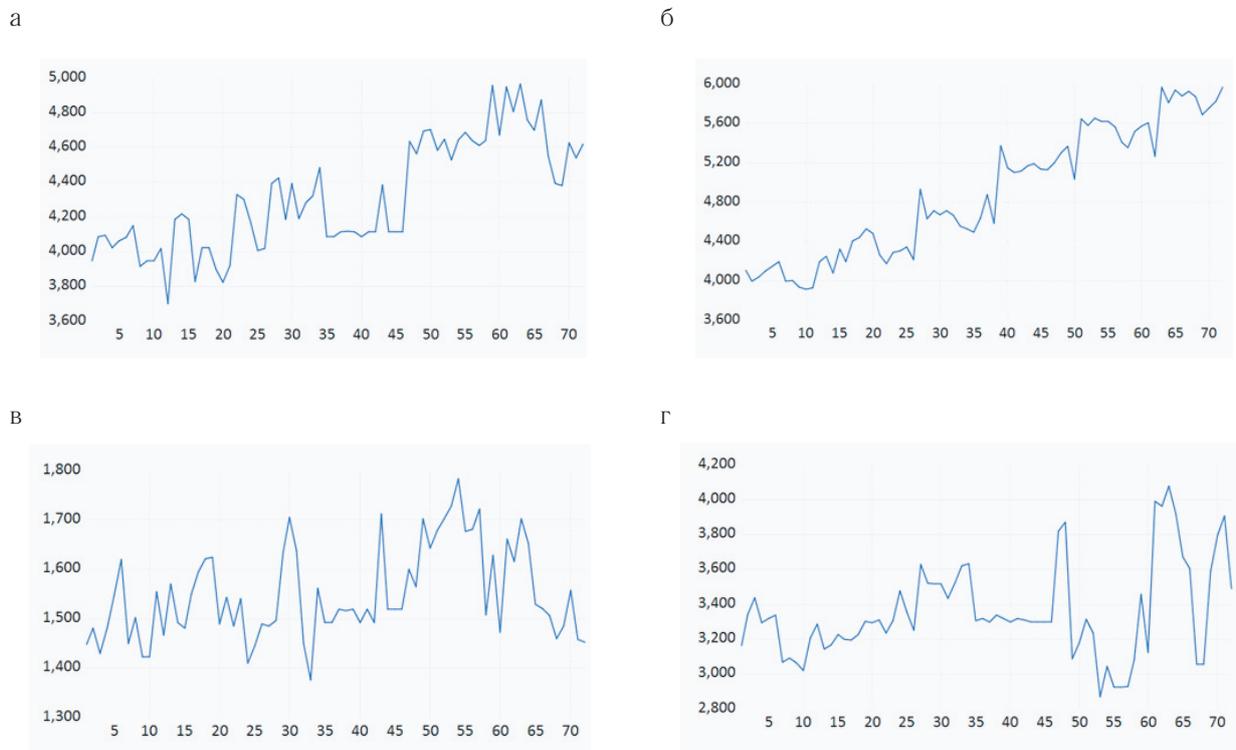


Рис. 1. Графики исследуемых временных рядов:
 а – стыковой пункт Петровский Завод; б – стыковой пункт Архара;
 в – стыковой пункт Тайшет; г – стыковой пункт Мариинск

«ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВАГОНПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА»

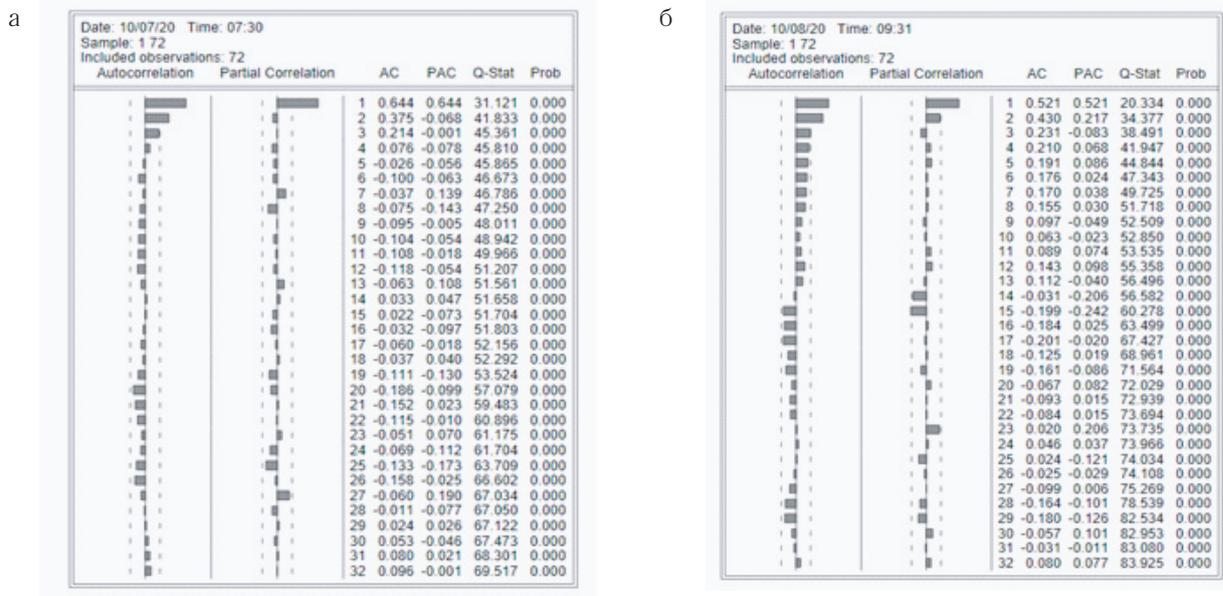


Рис. 2. Графики коррелограмм рядов: а – Тайшет; б – Мариинск

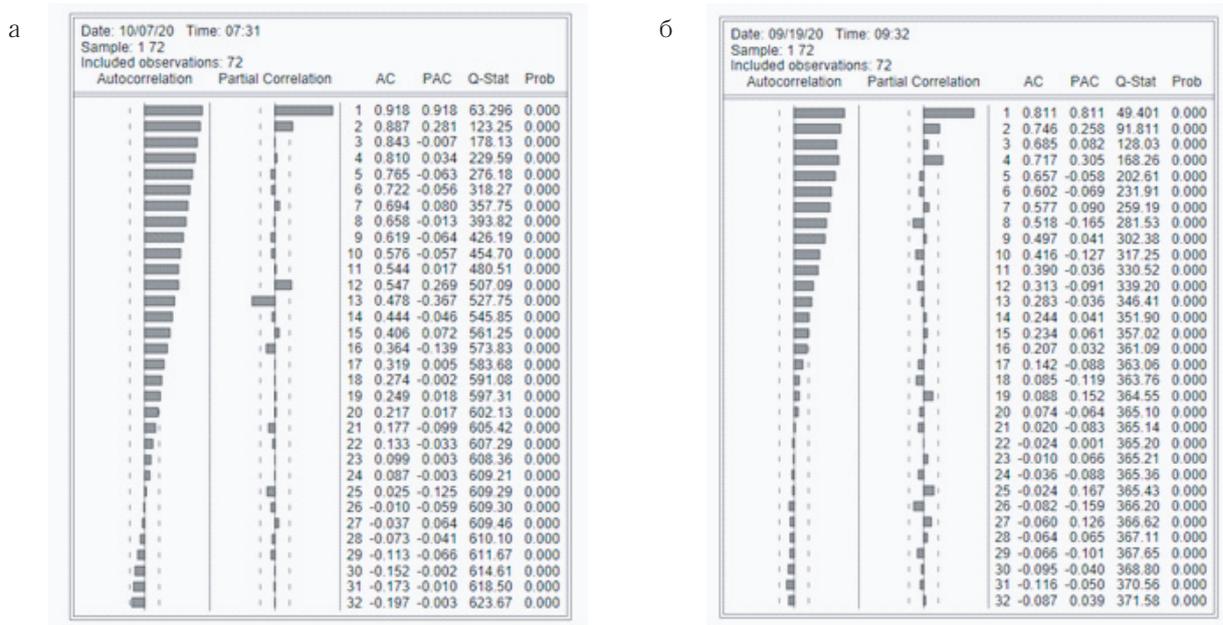


Рис. 3. Графики коррелограмм рядов: а – Петровский Завод; б – Архара

Также стационарность временного ряда можно проверить с помощью критериев по тесту Дики-Фуллера. Этот тест проверяет значение коэффициента a в авторегрессионном уравнении первого порядка $AR(1)$: $y_t = a \cdot y_{t-1} + \epsilon_t$.

Если процесс стационарен, то все корни не превосходят по модулю единицу, т.е. находятся в интервале $[-1; 1]$.

Анализ графиков коррелограмм

Проведем анализ исследуемых рядов согласно расширенному тесту Дики-Фуллера. Результаты анализа представлены на рис. 4,5.

В представленных на рис. 4,5 отчетах анализа исследуемых рядов гипотеза о нулевом корне отвергается на любом из приведенных уровней значимости.

а

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: Constant				
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-4.617099	0.0003	
Test critical values:	1% level	-3.525618		
	5% level	-2.902953		
	10% level	-2.588902		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 08/22/20 Time: 01:23				
Sample (adjusted): 2014M02 2019M12				
Included observations: 71 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	-0.471387	0.102096	-4.617099	0.0000
C	730.9060	158.5697	4.609367	0.0000
R-squared	0.236029	Mean dependent var	0.056338	
Adjusted R-squared	0.224957	S.D. dependent var	89.78926	
S.E. of regression	79.04733	Akaike info criterion	11.60574	
Sum squared resid	431145.2	Schwarz criterion	11.66947	
Log likelihood	-410.0036	Hannan-Quinn criter.	11.63108	
F-statistic	21.31760	Durbin-Watson stat	2.242382	
Prob(F-statistic)	0.000017			

б

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: Constant				
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-3.860110	0.0038	
Test critical values:	1% level	-3.525618		
	5% level	-2.902953		
	10% level	-2.588902		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/07/20 Time: 07:28				
Sample (adjusted): 2 72				
Included observations: 71 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	-0.353544	0.091589	-3.860110	0.0003
C	1189.516	307.9529	3.862656	0.0003
R-squared	0.177597	Mean dependent var	4.591549	
Adjusted R-squared	0.165678	S.D. dependent var	227.1916	
S.E. of regression	207.5196	Akaike info criterion	13.53609	
Sum squared resid	2971442.	Schwarz criterion	13.59983	
Log likelihood	-478.5313	Hannan-Quinn criter.	13.56144	
F-statistic	14.90045	Durbin-Watson stat	1.895777	
Prob(F-statistic)	0.000252			

Рис. 4. Отчет анализа исследуемых рядов: а – Тайшет; б – Мариинск

а

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 3 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		0.714936	0.8672	
Test critical values:	1% level	-2.599413		
	5% level	-1.945669		
	10% level	-1.613677		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/08/20 Time: 18:43				
Sample (adjusted): 5 72				
Included observations: 68 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	0.003376	0.004721	0.714936	0.4772
D(SERIES01(-1))	-0.438286	0.116908	-3.749063	0.0004
D(SERIES01(-2))	-0.281134	0.123738	-2.272003	0.0265
D(SERIES01(-3))	-0.365565	0.117696	-3.108008	0.0028
R-squared	0.242275	Mean dependent var	8.764706	
Adjusted R-squared	0.206757	S.D. dependent var	188.0960	
S.E. of regression	167.5262	Akaike info criterion	13.13718	
Sum squared resid	1796162.	Schwarz criterion	13.26774	
Log likelihood	-442.6641	Hannan-Quinn criter.	13.18891	
Durbin-Watson stat	1.958688			

б

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 11 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		6.613999	1.0000	
Test critical values:	1% level	-2.504073		
	5% level	-1.946348		
	10% level	-1.613293		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/08/20 Time: 18:34				
Sample (adjusted): 13 72				
Included observations: 60 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	0.043957	0.006646	6.613999	0.0000
D(SERIES01(-1))	-0.790703	0.106273	-7.440285	0.0000
D(SERIES01(-2))	-0.567032	0.135339	-4.195617	0.0001
D(SERIES01(-3))	-0.499024	0.140939	-3.540707	0.0009
D(SERIES01(-4))	-0.520127	0.138725	-3.749347	0.0005
D(SERIES01(-5))	-0.690514	0.127403	-5.419936	0.0000
D(SERIES01(-6))	-0.800050	0.115646	-6.918095	0.0000
D(SERIES01(-7))	-0.636951	0.128453	-4.956398	0.0000
D(SERIES01(-8))	-0.483760	0.138943	-3.481725	0.0011
D(SERIES01(-9))	-0.431853	0.139558	-3.094441	0.0033
D(SERIES01(-10))	-0.459185	0.135724	-3.383224	0.0014
D(SERIES01(-11))	-0.737037	0.109413	-6.736297	0.0000
R-squared	0.726807	Mean dependent var	29.55000	
Adjusted R-squared	0.663316	S.D. dependent var	224.6242	
S.E. of regression	130.3370	Akaike info criterion	12.75498	
Sum squared resid	815411.5	Schwarz criterion	13.17385	
Log likelihood	-370.6494	Hannan-Quinn criter.	12.91882	
Durbin-Watson stat	1.367848			

Рис. 5. Отчет анализа исследуемых рядов: а – Петровский Завод; б – Архара

Расчетные значения t-Statistic имеют отрицательные показатели:

- ряд Петровский Завод t-Statistic = -4,61;
- ряд Архара t-Statistic = -3,860.

Все значения t-Statistic расположены левее (дальше от нуля) критических значений. Поскольку нулевая гипотеза отвергнута, то нет необходимости брать разности чтобы привести исследуемый ряд к стационарному виду [19].

Построенные коррелограммы первых разностей временных рядов Петровский Завод и Архара (рис. 6,7), а также модели авторегрессии первого порядка, имеют характерные особенности:

- автокорреляционная функция (Autocorrelation function) имеет постепенное угасание;
- частная автокорреляционная функция имеет резкий обрыв PACF (Partial correlation function);

• автокорреляционные значения имеют положительные коэффициенты $Prob_1=0.0003$ $Prob_2=0.0038$ соответственно (см. рис. 4).

По итогам анализа можно сделать вывод, что наиболее подходящая модель — авторегрессия первого порядка.

Проверка верности данного предположения возможна:

1. По коррелограмме остатков построенной модели.

2. По коррелограмме первых разностей ряда.

«Построение коррелограмм 1-х, 2-х разностей позволяет установить стационарность исходного ряда или ряда разностей. Наиболее целесообразно данное построение, если коэффициент автокорреляции первого порядка близок к единице» [9].

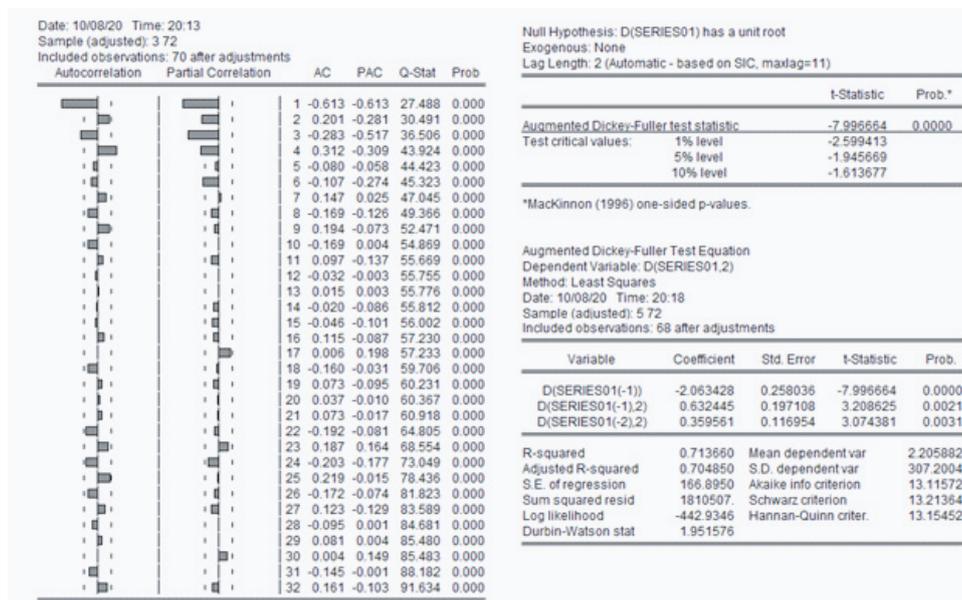


Рис. 6. Взятие первых разностей, Петровский Завод

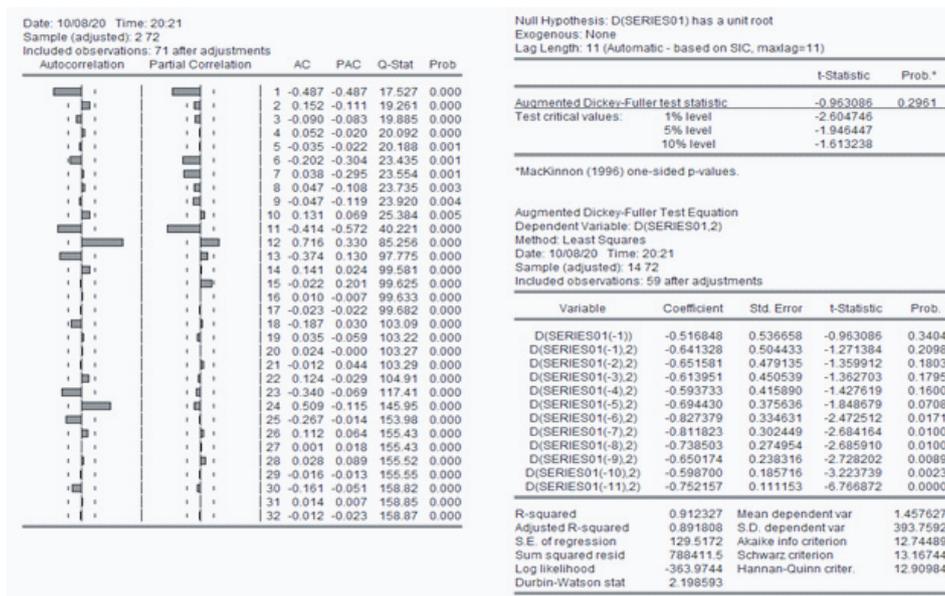


Рис. 7. Взятие первых разностей, Архара

Построенные коррелограммы первых разностей временных рядов Петровский Завод и Архара (рис. 6, 7), а также модели авторегрессии первого порядка, имеют характерные особенности:

- поэтапное убывание автокорреляционной функции, при этом данная функция носит знакопеременный характер;
- резкий обрыв частичной автокорреляционной функции;
- коэффициенты автокорреляции отрицательные.

Как результат, можно сделать вывод, что наиболее подходящая модель — авторегрессия первого порядка.

Заключение

Таким образом, получение адекватной модели временного ряда, которая позволит осуществлять долго-временный прогноз, как вагонопотоков, принимаемых и сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог, так и дальнейшем погрузки в адрес морских портов, невозможно без установления класса и природы данных рядов и рядов с ними связанных.

По итогам проведения статистической проверки гипотез о случайности временного ряда, было выявлено, что исследуемые временные ряды вагонопотоков, поступающих на стыковые пункты, относятся к классу нестационарных временных рядов, в которых присутствует стохастический тренд. Данный стохастический тренд можно удалить путем последовательного дифференцирования ряда. Результаты численного моделирования будут использованы для дальнейшего построения модели прогноза поступления вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог РФ. Прогнозирование объемов вагонопотоков и, как следствие, объемов погрузки, приведет к системному контролю качества принимаемых решений на основе качественной информации, получаемой из прогнозных систем.

Все это будет способствовать повышению уровня планирования и анализа функционирования и развития железных дорог. Весь спектр мероприятий состоит в возможности построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», помимо этого появится возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети. Данная модель прогнозирования может быть внедрена в производственный цикл в целях автоматизации процесса прогнозирования объемов погрузки грузов железнодорожным транспортом, осуществляемого ЦФТО в рамках планирования объемов работ и потребности в ресурсах филиалов ОАО «РЖД» на год, квартал, месяц. 

Литература

1. Мачерет, Д.А. Объемы перевозок — ключевой фактор эффективности развития транспортной инфраструктуры/ Д.А. Мачерет, А.Ю. Ледней. — Текст: непосредственный // Экономика железных дорог. — 2019. — №4. — С. 28–38.
2. Бодюл, В.И. Математическая модель внутрисуточной неравномерности грузовых перевозок/ В.И. Бодюл. — Текст: непосредственный // Материалы международной конференции «Инфотранс 2005». — Москва. — С. 20–24.
3. Грунтов, П.С. Исследование влияния неравномерности движения на технологию сортировочных станций / Грунтов Петр Степанович: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук; Белорус. ин-т инженеров ж. -д. транспорта. — Гомель, 1965. — 25 с. — Текст: непосредственный.
4. Сотников, Е.А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков/ Е.А. Сотников, К.П. Шенфельд. — Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. — 2011. — №5. — С. 3–9.
5. Маловецкая, Е.В. Актуализация порядка расчета плана формирования поездов и уточнения перечня показателей эксплуатационной работы на основе имитационного моделирования с учетом развития полигонных технологий/ Е.В. Маловецкая. — Текст: непосредственный // Современные наукоемкие технологии. — 2019. — №1(53). — С. 184–188.
6. Бабина, О.И. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей/ О.И. Бабина. — Текст: непосредственный // Имитационное моделирование. Теория и практика: сборник трудов конференции. — Санкт-Петербург: Центр технологии судостроения и судоремонта (Санкт-Петербург), 2009. — С. 73–77.

7. Grigoroudis E., Orfanoudaki E., Zopounidis C. «Strategic performance measurement in a healthcare organisation: A multiple criteria approach based on balanced scorecard», *Omega*, 2012, №40 (1), pp. 104-119.
8. Sehra S. K., Brar D., Singh Y., Kaur D. «Multi criteria decision making approach for selecting effort estimation model», arXiv preprint arXiv:1310.5220, 2013.
9. Бурда А.Г. Экономико-математические методы и модели: учебное пособие / А.Г. Бурда, Г.П. Бурда; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». –Краснодар: КубГАУ, 2018. –180 с. ISBN 978-5-00097-684-5. –Текст: непосредственный.
10. Волокобинский М.Ю. Принятие решений на основе метода анализа иерархий/М.Ю. Волокобинский, О.А. Пекарская, Д.А. Рази. –Текст: непосредственный // *Финансы: Теория и практика*, 2016. –Т.20, №2. –С. 33–42.
11. Волкова, В.Н. Классификация моделей в системном анализе/ В.Н. Волкова, Л.В. Черненькая, В.Е. Магер. –Текст: непосредственный // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. –2013. –№3 (174). –С. 33–43.
12. Звягин, Л.С. Применение системно-аналитических методов в области экспертного прогнозирования/ Л.С. Звягин. –Текст: непосредственный // *Экономика и управление: проблемы, решения*. –2017. –Т.3, №6. –С. 145–148.
13. Самотина, С.А. Принятие управленческих решений в условиях неопределенности/С.А. Самотина, Е.В. Потапова. –Текст: непосредственный // *Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы*. –2011. –№1. –С. 3–4.
14. Sevcenko G. Statybos investicimq sprendime rizikos valdymas: Diss. VGTU leidykla «Technika», 2015, 186 p.
15. Valiris G., Chytas P., Glykas M. «Making decisions using the balanced scorecard and the simple multi-attribute rating technigue», *Performance Measurement and Metric*, 2005.
16. Доклад генерального директора – председателя правления открытого акционерного общества «Российские железные дороги» О.В. Белозёрова на расширенном итоговом заседании правления ОАО «РЖД». –Текст: непосредственный // *Железнодорожный транспорт*. –2018. –№1. –С. 4–10.
17. Маловецкая, Е.В. Актуальность применения имитационного моделирования при расчете плана формирования поездов с учетом развития полигонных технологий/ Е.В. Маловецкая. –Текст: непосредственный // *T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт*. –2019. Т.12, –№4. –С.48–53. ISSN 2072-8735 (Print). ISSN 2072-8743 (Online). DOI 10.24411/2072-8735-2018-10261.
18. Malovetskaya E.V., Bolshakov R.S., Dimov A.V., Byshlyago A.A. «Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies» et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 760 012041.
19. Синчуков, А.В. Современная классификация математических моделей/ А.В. Синчуков. –Текст: непосредственный // *Инновационная наука*. –2016. –№3-1. –С. 214–215.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТР—ЮГ



С.П. Вакуленко



Н.Ю. Евреенова

Рассмотрена проблема организации скоростного железнодорожного движения между Центром и Югом России. Выполнена оценка возможных технологических эффектов от внедрения технологии специализации в направлении Центр-Юг. Даны предложения по основным направлениям дальнейших исследований в области специализации железнодорожных направлений.

Ключевые слова: специализация железнодорожных направлений, классификация железнодорожных линий, организация движения

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_40

Вопрос качественного и быстрого сухопутного сообщения между Центром и Югом России на протяжении многих десятилетий являлся значимым и продолжает оставаться таковым по сей день, даже несмотря на стремительное развитие авиации. Основной целью развития скоростного железнодорожного транспорта в России, в том числе совместно со странами СНГ, является создание условий для ускоренного социально-экономического развития путем модернизации железнодорожного транспорта, обеспечивающего единство экономического пространства РФ.

Мировой опыт показывает, что реализация крупных транспортных проектов организации скоростного движения, является мощным катализатором технического прогресса, имеющим мультипликативный

эффект для железнодорожной отрасли, транспортного машиностроения, транспортного строительства и других причастных отраслей экономики.

Одним из перспективных транспортных проектов, планируемых к реализации в ближайшее время является проект организации скоростного движения на направлении Центр—Юг.

Направление Центр—Юг расположено на основной части железнодорожной инфраструктуры Северо-Кавказской и Юго-Восточной железных дорог, а также на отдельных участках железнодорожной инфраструктуры Приволжской и Московской железных дорог. Карта участка представлена на рисунке.

Особенностью транспортной системы Юга России является ориентированность на экспортные пере-

Вакуленко Сергей Петрович, кандидат технических наук, профессор, директор Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: пропускные и перерабатывающие способности линий и станций, управление вагонными парками, логистика грузовых и пассажирских перевозок, мультимодальные перевозки, транспортные коридоры, техническое оснащение и технология работы станций (всех типов). Автор более 300 научных работ.

Евреенова Надежда Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление транспортным бизнесом и интеллектуальные системы» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: транспортно-пересадочные узлы и комплексы, качество обслуживания пассажиров, имитационное моделирование транспортных и пассажирских потоков, взаимодействие различных видов транспорта, единая транспортная система. Автор 25 научных работ, в том числе семи учебных пособий.

Федоров Илья Юрьевич, аспирант кафедры «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: контейнерные перевозки, специализация железнодорожных направлений, транспортные коридоры.

возки грузов с их перевалкой в морских портах, сохранение стабильного роста их объемов с учетом сезонной и суточной неравномерности. Дополнительные ограничения накладываются обстоятельствами непреодолимой силы, связанными с погодными условиями (сильными ветрами и значительными осадками), в связи с чем возникает необходимость в приостановлении погрузочно-разгрузочных работ, в отставлении поездов от движения в пути следования и на подходах к портам, в вводе соответствующих конвенций с запретом на отгрузку.

Важнейшей особенностью направления является трехкратное увеличение объемов пассажирских перевозок в летний период, характеризующееся полным заполнением пропускной способности участков Воронеж — Лиски — Лихая — Ростов-на-Дону.

На рассматриваемом полигоне планируются следующие направления для специализации:

- для пассажирского движения: Михнево — Ожерелье — Елец — Грязи — Лихая — Батайск — Тимашевская — Сочи — Адлер;
- для грузового движения: Воскресенск — Кочетовка — Саратов — Волгоград — Тихорецкая — Козырьки — Разъезд 9 км — Новороссийск (Волжская рокада), Разъезд 9 км — Тамань, Кочетовка — Грязи, Ртишево — Лиски, Лихая — Имени Максима Горького.

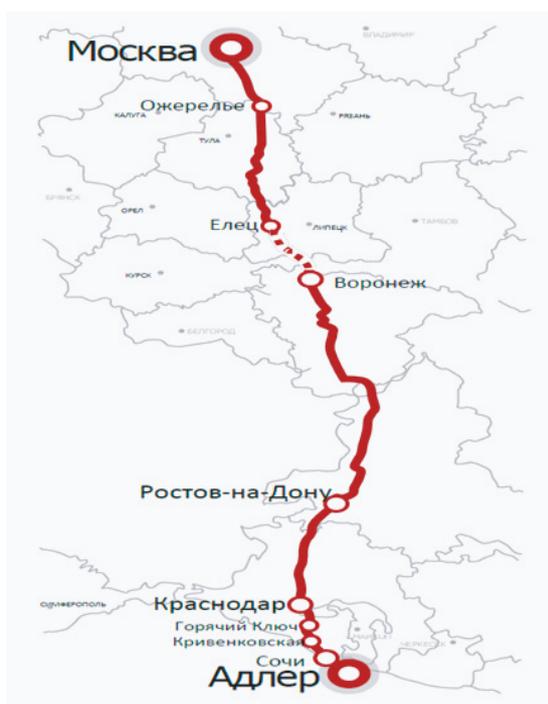


Рисунок. Рассматриваемый полигон
на направлении Центр—Юг

При специализации линии Москва — Ожерелье — Елец — Воронеж — Ростов — Краснодар — Адлер под преимущественно пассажирское движение, в Московском железнодорожном узле отправление и прибытие поездов южного направления будет осуществляться по станции Москва-Пассажирская-Павелецкая. Транзитный для Московского железнодорожного узла поездопоток в связях Северо-Запада с Югом России, курсировавший через станции Москва-Каланчевская (с выходом на Курское и Павелецкое направления) и Москва-II-Митьково (с выходом на Рязанское направление), будет обращаться с использованием МЦК по маршруту Тверь — Ховрино — Владыкино — Угрешская — Люблино — Бирюлево — Ожерелье.

Проект специализации железнодорожных направлений на преимущественно грузовое и пассажирское движения в направлении Юга России синхронизирован с параметрами и проектами Концепции развития пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом в Московском транспортном узле [1], таких как:

- скоростное пассажирское движение на направлении Центр — Юг;
- МЦД-5 «Ярославско—Павелецкий»;
- бизнес-план развития железнодорожной инфраструктуры для обеспечения транспортной доступности аэропортов Московского авиационного узла (аэропорт Домодедово).

В таблице представлено сокращение времени в пути следования при реализации проекта Центр—Юг.

В настоящее время организация движения поездов не предусматривает специализации направления Центр — Юг на пассажирское и грузовое из-за чего в месяцы максимальных перевозок коэффициенты заполнения пропускной способности на участках Графская — Воронеж — Лиски, Замчалово — Горная — Кизитеринка, Батайск — Староминская — Тимашевская близки к предельно допустимому значению. Значительное число как пассажирских, так и грузовых поездов на участках рассматриваемого направления классифицирует их как особо грузонапряженные и линии с тяжеловесным грузовым движением. Наличие тяжеловесного движения на направлении не позволяет организовать скоростное пассажирское сообщение.

При условии специализации железнодорожных направлений на преимущественно грузовое и пассажирское движения в направлении Юга России ожидаются следующие технологические эффекты от внедрения технологии специализации.

Таблица

Сокращение времени в пути следования при реализации проекта Центр–Юг

Сообщение	Существующее, ч		Перспективное, ч		Разница минимальная, ч
	Средневзвеш.	Миним.	Средневзвеш.	Миним.	
Москва – Адлер	32,0	23,2	18,0	16,0	–7,2
Москва – Симферополь	33,3	31,7	25,2	22,0	–9,7
Санкт-Петербург – Адлер	41,5	37,5	27,5	23,5	–14,0
Москва – Воронеж (Придача)	9,7	6,8	5,9	5,3	–1,5
Москва – Анапа	31,3	21,8	19,4	16,3	–5,5
Москва – Новороссийск	28,6	21,3	16,5	15,8	–5,5
Москва – Краснодар	26,1	18,6	14,6	13,1	–5,5
Москва – Кисловодск	28,9	23,8	19,6	19,6	–4,2
Москва – Ростов-на-Дону	21,3	14,9	12,5	10,7	–4,2

1. Оптимальное использование пропускной способности железнодорожных участков при пропуске поездопотоков с близкими скоростями движения. Так, специализация направлений позволяет увеличить размеры пассажирских поездов дальнего следования до 88 пар поездов в сутки с учетом пропуска 35 скоростных поездов без дополнительных мероприятий по увеличению пропускной способности направления. В целом, на период до 2030 года специализация позволит суммарно увеличить размеры пассажирского сообщения на 30% относительно отчетных размеров за 2019 год.

2. Специализация между грузовым и пассажирским движением не исключает движение грузовых поездов по пассажирским (включая скоростные) линиям, а пассажирских – по грузовым. Возможен вариант сезонной специализации, при которой в зимний период при сезонном снижении пассажирских поездов дальнего следования и высвобождении пропускных способностей по участкам специализированного пассажирского направления возможен пропуск грузовых поездов.

3. Специализация направления с преимущественно с пассажирским движением обеспечивает повышение

маршрутной скорости движения пассажирских поездов, что делает железнодорожный транспорт более привлекательным для пассажиров.

4. Специализация на преимущественно грузовом направлении позволит повысить провозную способность участков без значительных капиталовложений. Для обеспечения работы железнодорожной инфраструктуры на специализированном грузовом направлении на перспективу (2025–2030 годы) мероприятий, предусмотренных Генеральной схемой, будет достаточно.

5. Специализация железнодорожных направлений на преимущественно грузовое и пассажирское движение в направлении Юга России не потребует дополнительного развития основных грузовых, участковых и сортировочных станций, расположенных в пределах рассматриваемого полигона.

Оценка технического состояния существующей инфраструктуры, а также анализ исходных данных по земляному полотну, верхнему строению пути и искусственным сооружениям, свидетельствует о том, что в настоящее время существующие параметры железнодорожной линии не обеспечивают пропуск пассажир-

ских поездов со скоростями до 160–200 км/ч. Для повышения скорости пассажирских поездов на отдельных участках линии Москва—Адлер необходимо выполнить ряд мероприятий по приведению состояния путевого хозяйства в соответствие текущим нормативным требованиям, устранить барьерные места, а также привести технические характеристики существующей железнодорожной инфраструктуры в соответствие требованиям железнодорожной линии с преимущественно пассажирским движением.

Основными направлениями дальнейших исследований в области специализации железнодорожных направлений являются следующие:

- разработка мероприятий по развитию железнодорожной инфраструктуры, их экономическая целесообразность;
- разработка предложений по изменению нормативной базы в условиях специализации железнодорожных направлений, а также переработка нормативной базы по эксплуатации и содержанию железнодорожной инфраструктуры;
- прогнозирование основных корреспонденций перевозок грузов и пассажиров с учетом специализации направлений;
- выбор маршрута пропуска контейнерных и ускоренных грузовых поездов при специализации железнодорожных направлений. 

Литература

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от 27.02.2019 г. №260 «Об утверждении Концепции развития пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом в Московском транспортном узле». —Текст: непосредственный.
2. Колин, А.В. Варианты специализации железнодорожных линий по видам движения и развития сети российских железных дорог / А.В. Колин. —Текст: непосредственный // Транспорт Российской Федерации. —2015. —№ 5 (60). —С. 32–37.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 01.07.2009 г. №1393р «Об утверждении Методики классификации железнодорожных линий». —Текст: непосредственный.
4. Методика классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. №28/р. —Текст: непосредственный.
5. Распоряжение ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. № 3188р «Об утверждении результатов классификации железнодорожных линий». —Текст: непосредственный.
6. Попова, Е.А. Специализация железнодорожных линий на грузовые и ускоренные пассажирские перевозки / Е.А. Попова, Л.В. Сербина. —Текст: электронный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк 2020): труды Международной научно-практической конференции. Ростовский государственный университет путей сообщения. —Воронеж, 2020. —С. 181–184. —URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44198816> (дата обращения 10.08.2021).
7. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877р.
8. Вакуленко, С.П. Скорый путь на Юг / С.П. Вакуленко. —Текст: непосредственный // Гудок. —2020. —21 октября. —5 полоса / Мнение. —№197 (27046).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ



В.П. Сычев



Д.В. Овчинников

Разработана методика определения ресурса железнодорожного пути в зависимости от условий его эксплуатации, учитывающая не только силовые параметры воздействия на путь от подвижного состава, но и напряженно-деформированное состояние рельсов в процессе нагружения непосредственно в месте контактирования с колесами, а также изгибные напряжения в подошве.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, моделирование, напряженно-деформированное состояние, ресурс

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_44

Одним из основных показателей для выбора участков железнодорожного пути, подлежащих ремонтам, является такой показатель как среднее значение одиночных замен рельсов по дефектности (выход рельсов) на участке пути после окончания гарантийной наработки рельсов (пропущенного тоннажа).

Большинство методик прогнозирования срока службы рельсов основано на оценке действующих на рельс вертикальных осевых и боковых сил под действием подвижного состава. Напряженно-деформированное состояние системы «колесо-рельс» либо

не учитывается вовсе, либо учитывается в неполном объеме [1]. Проведенный анализ замены рельсов по видам дефектов показал, что появлению излома в рельсах предшествует появление дефектов контактно-усталостного происхождения в головке рельсов, развитие которых зависит от количественных значений их напряженно-деформированного состояния, и вызванных, в том числе, таким фактором, как пропущенный тоннаж.

Поэтому задача моделирования напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути в зависимости от условий эксплуатации явля-

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 151 научной работы. Имеет 20 патентов на изобретения.

Овчинников Дмитрий Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). Область научных интересов: оценка устойчивости работы железнодорожного пути и предельного состояния рельсов, моделирование развития трещин в рельсах, теория упругости, остаточный ресурс. Автор 34 научных работ.

Абдурашитов Анатолий Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре – филиала ОАО «РЖД» (ПКБ И). Область научных интересов: система ведения путевого хозяйства, планирование путевых работ, взаимодействие в системе «колесо-рельс». Автор 140 научных работ.

Сычева Анна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: инженерное обеспечение строительства, инженерная геология. Автор 56 научных работ.

ется актуальной, направленной на решение задачи повышения надежности железнодорожного пути и перспективной в части перехода на рельсы Р 75 [2].

Методика исследований

Ресурс усталостной прочности материала G зависит от напряжения в металле, образующийся при нагружении σ_0 и числа циклов нагрузки для достижения усталостного ресурса материала n_0 по следующей зависимости:

$$\sigma_0^m n_0 = G = const, \quad (1)$$

где m зависит от свойств материала и для сталей колеблется в пределах 3–5.

Средневзвешенные механические напряжения $\bar{\sigma}_j$ вычисляются как произведение сумм механических напряжений σ_j , возникающих в системе «колесо-рельс», изгибных напряжений в подошве рельса на сумму весовых коэффициентов, учитывающих преобладание конкретных дефектов рельсов на рассматриваемом участке пути. В первом приближении весовые коэффициенты k_j принимаются равными процентному соотношению выявленных дефектов в головке и подошве к общему числу дефектов. Таким образом учитывается влияние особенностей подвижного состава, обращающегося на рассматриваемом конкретном участке, и наносящего повреждения рельсам в каждом цикле воздействия:

$$\bar{\sigma}_j = \sum \sigma_j \sum k_j. \quad (2)$$

Формула для определения размеров тоннажа брутто T_i , который можно пропустить по участку i с заданными эксплуатационными характеристиками, при известном тоннаже брутто T_0 , пропущенном на опытном участке с учетом эмпирических коэффициентов a_1 (учитывающий влияние шлифовки рельсов); a_2 (учитывающий кратность тяги, рекуперативное торможение и рельеф участка); a_3 (учитывающий влияние климатических условий), примет вид:

$$T_i = T_0 \frac{\bar{\sigma}_0}{\sigma_i} \frac{\langle P_i \rangle}{\langle P_0 \rangle} a_1 a_2 a_3. \quad (3)$$

Коэффициенты a_1 и a_2 принимаются по нормативным документам ОАО «РЖД» и зависят от многих условий: невыполнения всего объема или части по шлифовке рельсов; на участках с рекуперативным торможением и кратной тяги; на участках со сложными условиями: уклоны большой протяженностью, перевальные участки и т.д. Коэффициент a_3 зависит от климатической зоны, учитывает влияние растягивающих напряжений в рельсах, скорость роста трещины, критические размеры дефекта (внутренней и внешней трещины в головке рельса) и ряд других факторов [3–5].

Ресурс прочности рельсов, на основе которого определяется прогнозное значение пропущенного тоннажа до исчерпания этого ресурса зависит от многих факторов: типы обрабатываемого по участку подвижного состава, скорость, осевые нагрузки, тип верхнего строения пути, план линии, состояние рельсовой колеи по геометрическим очертаниям, при этом напряженно-деформированное состояние рельсов σ_0 определяется математическим моделированием. В зависимости от этих факторов участок железнодорожного пути разбивается на мелкие i -е участки с идентичными характеристиками и эксплуатационными факторами длиной равной 1 км пути.

Известна методика напряженно-деформируемого состояния рельсов, основанная на использовании коэффициентов, полученных эмпирическим путем для определенных конструкций верхнего строения пути и условий их эксплуатации с адаптацией к новым эксплуатационным условиям. Однако погрешность в получаемых результатах достигает 25% [6].

Предлагается с целью повышения точности расчетов применить метод конечных элементов, основанный на разбиении модели на совокупность элементов простейшей формы, в частности, в форме гексаэдров. Схема разбиения модели на элементы простейшей формы приведена на рис. 1.

В рамках данной работы разработаны конечно-элементные модели участка пути мощностью порядка двух миллионов узлов действующей конструкции железнодорожного пути с промежуточными рельсовыми скреплениями двух типов: подкладочного ЖБР-65Ш и бесподкладочного ЖБР-65ПШМ. Общий вид конечно-элементной модели приведен на рис. 2.

Алгоритм расчета напряженно-деформируемого состояния следующий.

1. Вычисляется U модуль упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости [7]:

$$U = \sqrt[3]{\left(\frac{P}{y}\right)^4 \frac{1}{64EJ}}, \quad (4)$$

где P – нагрузка от колеса на рельс; y – прогиб рельсовой нити; E – модуль упругости рельсовой стали; J – момент инерции рельса в вертикальной плоскости.

2. Вычисляется коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса:

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}}, \quad (5)$$

3. Определяется η ордината линии влияния упругого прогиба рельса:

$$\eta = e^{-kx} (\cos(kx) + \sin(kx)), \quad (6)$$

где k – коэффициент относительной жесткости рель-

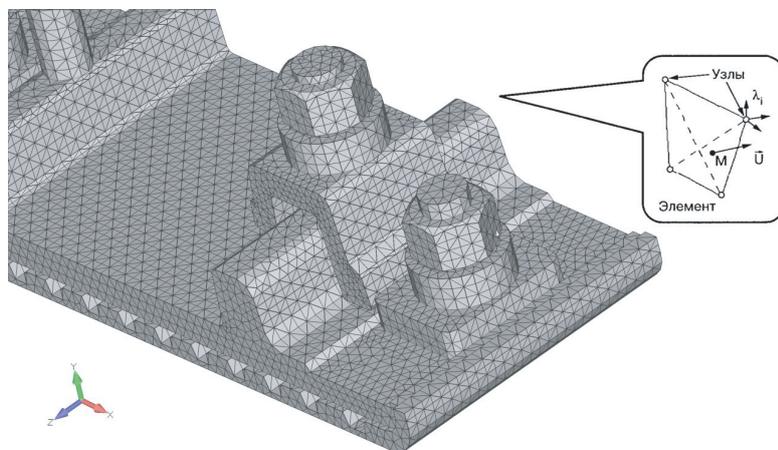


Рис. 1. Схема разбиения модели на элементы в форме гексаэдра (конечно-элементная модель)

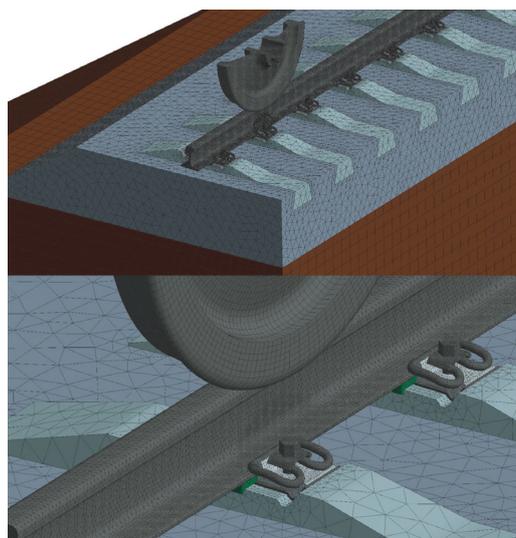


Рис. 2. Конечно-элементная модель пути со креплениями ЖБР-65Ш

сового основания и рельса; x — расстояние между осями тележки.

4. Вычисляется эквивалентная нагрузка $P_{\text{ЭКВ}}$ для напряженно-деформированного состояния рельса:

$$P_{\text{ЭКВ}} = P + \sum \bar{P} \cdot \eta. \quad (7)$$

Исходные данные для моделирования принимаются на основе нормативных документов [8–10] и результатов известных исследований [11–13]:

- Вертикальное усилие, передаваемое от колеса: 5, 10 и 15 тонн;
- Боковое усилие, передаваемое от колеса: 5 и 10 тонн;

- Затяжка крепежителей рельсовых креплений — нормативная;

- Этапы нагружения: затяжка крепежителей, учет собственного веса элементов пути и приложение нагрузки от подвижного состава;

- Свойства элементов верхнего строения пути соответствуют эксплуатируемой конструкции железнодорожного пути;

- Свойства материалов грунта и балластного слоя согласно нормативным документам.

Результаты исследований

Получены величины деформаций и напряжений в рельсах, возникающих в процессе воздействия подвижного состава, представленные на рис. 3–5.

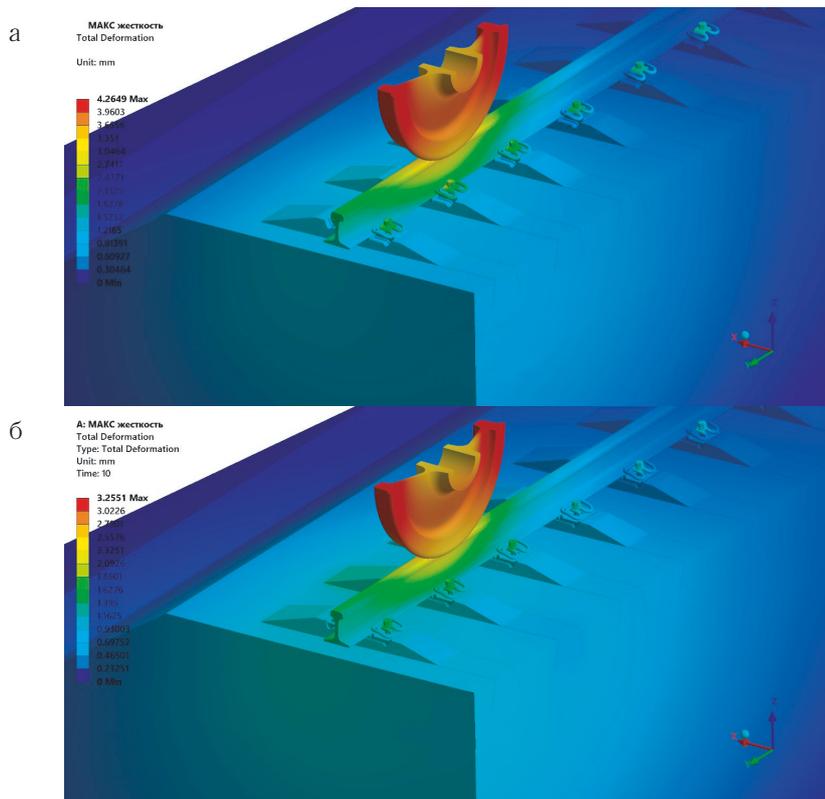


Рис. 3. Общие деформации железнодорожного пути при воздействии нагрузки от колеса 15 тонн и боковой силы 10 тонн: а – для ЖБР-65Ш; б – для ЖБР-65ПШМ

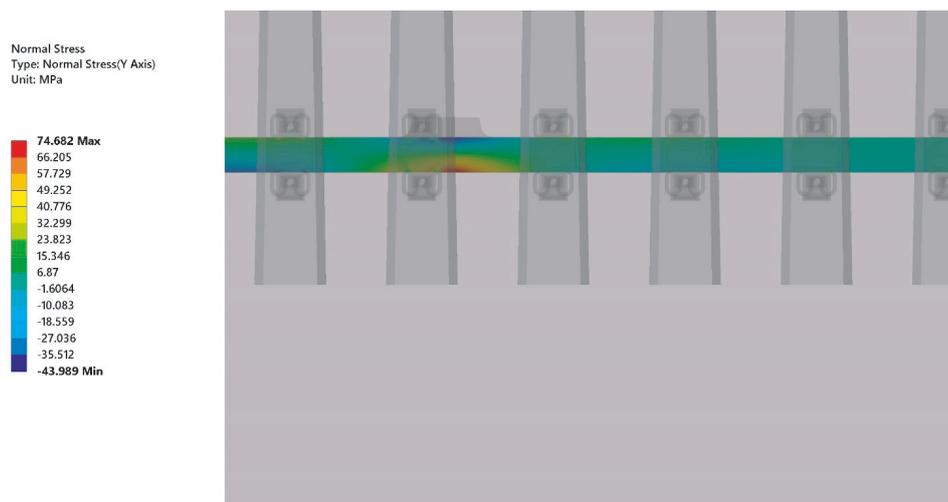


Рис. 4. Нормальные напряжения в рельсе при воздействии нагрузки от колеса 5 тонн и боковой силы 5 тонн (скрепления ЖБР-65Ш)

По результатам проведенных исследований были построены на основе известной теории регрессионного анализа [14] графики зависимости нормальных напряжений в рельсах от вертикальной силы при нагрузках от колес 5–15 тонн для участков пути со скреплениями ЖБР-65Ш, приведенные для иллюстрации на рис. 6.

На рис. 7, 8 представлены графики зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при различной нагрузке от колес подвижного состава для промежуточных рельсовых скреплений ЖБР-

65Ш и ЖБР-65ПШМ. По оси абсцисс представлена боковая сила в тоннах, по оси ординат нормальные напряжения в МПа. Аппроксимация проводилась по линейному и квадратичным моделям.

Как видно из рис. 6–8 и анализа полученных зависимостей, результаты аппроксимации по построенным моделям показывают сходимость, близкую к единице.

Итоговые результаты моделирования сведены в таблицу.

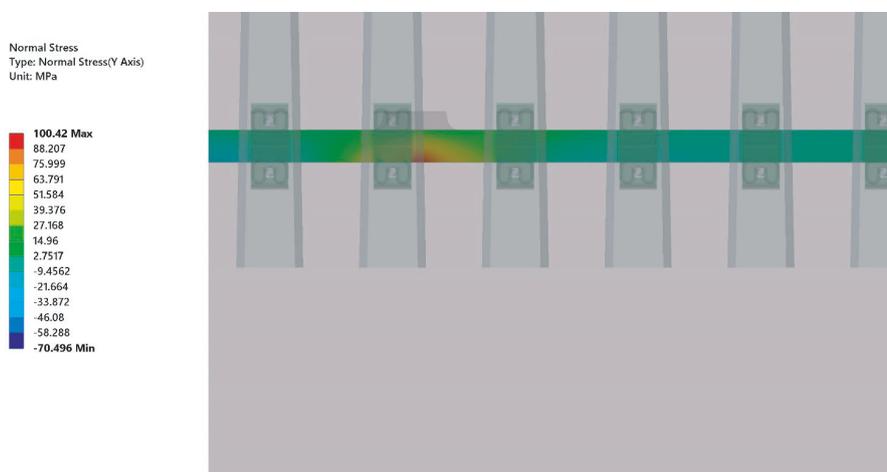


Рис. 5. Нормальные напряжения в рельсе при воздействии нагрузки от колеса 15 тонн и боковой силы 5 тонн (скрепления ЖБР-65ПШМ)

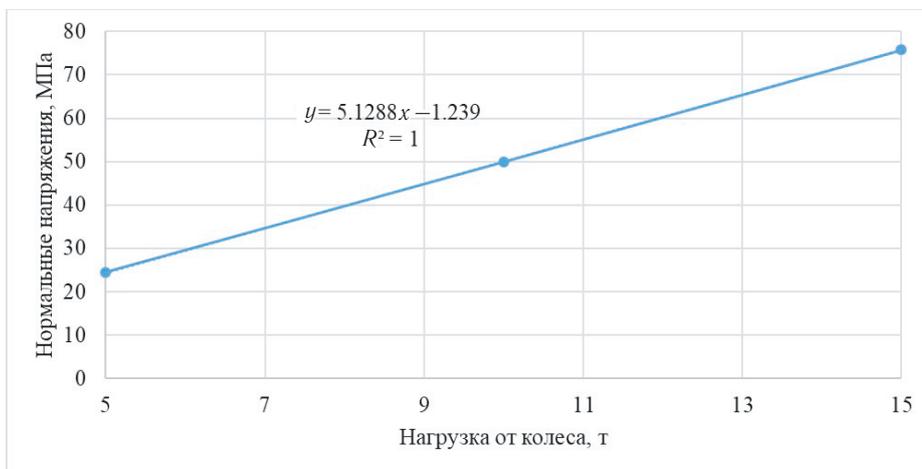


Рис. 6. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от вертикальной силы для участка пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65Ш

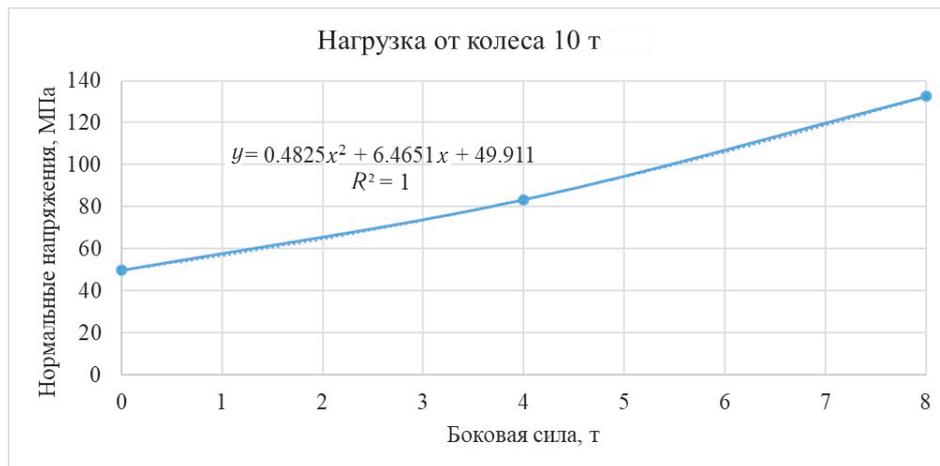


Рис. 7. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при нагрузке от колес подвижного состава 10 тонн для пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65Ш

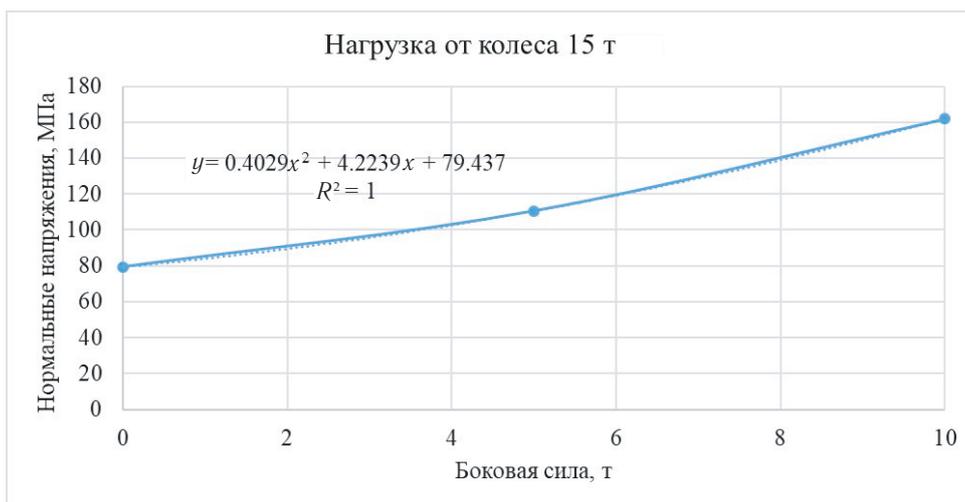


Рис. 8. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при нагрузке от колес подвижного состава 15 тонн для пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65ПШМ

Таблица

Результаты моделирования

Нагрузка на колесо, т		Максимальные значения, МПа	
вертикальная	боковая	Участок со скреплениями ЖБР-65Ш	Участок со скреплениями ЖБР-65ПШМ
5–15	0	63,4	67,75
5	0–5	74,68	68,87
10	0–8	126,01	114,94
15	0–10	165,26	150,81

Заключение

1. Разработана модель оценки ресурса рельсов, основанная не только на оценке вертикальных усилий, но и учитывающая напряженно-деформированное состояние рельсов при воздействии подвижного состава: изгибных напряжений в подошве, контактных напряжений в головке рельса;
2. Для реализации предложенной методики проведена оценка напряженного состояния рельсов в зависимости от условий эксплуатации (прямые, кривые, наружные и внутренние нити при различном плане и профиле пути, тип локомотива, состояние пути, обращение длинносоставных тяжеловесных поездов);
3. Получены уравнения аппроксимации для определения напряженного состояния рельсов в зависимости от колесной нагрузки. Уравнения аппроксимации имеют достоверность, близкую к единице, что говорит о значительной точности получаемых с помощью представленных уравнений выходных данных напряжений в рельсах в зависимости от колесной нагрузки. 

Литература

1. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. — Москва: Транспорт, 1997. — 326 с. — ISBN 5-277-02025-X. — Текст: непосредственный.
2. Лисицын, А.И. Перспективы развития конструкции верхнего строения пути и его элементов / А.И. Лисицын. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 10. — С. 2–7.
3. Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Protopopov A.L. Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2020;86(4):46-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55>
4. Abdurashitov A.Y., Sychev V.P. // Evaluation of the strain-stress condition of rails. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012001.
5. Maksimenko A S, Sychev V P, Abdurashitov A Y // Identification of transverse defects of the head and bottom of the rails path and track // Facilities. 2018. № 3. С. 2.
6. Ovchinnikov, D.V., Pokatsky, V.A., Gallyamov, D.I.: Factors Affecting the Dynamic Rail Canting of the Railway Track, Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021, Pages 544-551, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.106
7. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева [и др.]; под редакцией В.В. Виноградова и А.М. Никонова. — Москва: Маршрут, 2003. — 486 с. — ISBN 5-89035-112-5. — Текст: непосредственный.
8. ГОСТ 32698-2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля = Rail fastening. Safety requirements* and methods* of control: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 августа 2014 г. № 932-ст: введен впервые: дата введения 2015-03-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»): переиздание сентябрь 2019 г. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 10 с. — Текст: непосредственный.
9. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2544р.
10. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р.
11. Абдурашитов, А.Ю. Моделирование напряженного состояния рельса на основе трехмерной задачи теории упругости и влияния краевого эффекта / А.Ю. Абдурашитов, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. — 2019. — Т.14, № 14(14). — С. 178–189.
12. Сычева, А.В. Управление жесткостью пути на переходных участках / А.В. Сычева, А.А. Локтев, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 2. — С. 16–20.
13. Сычева, А.В. Повышение несущей способности грунтов земляного полотна и балластного слоя при строительстве железнодорожного пути / А.В. Сычева, М.В. Гридчин. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2017. — № 2. — С. 92–101.
14. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Г. Корн. — Москва: Книга по Требованию, 2014. — 832 с. — ISBN 978-5-458-25439-7. — Текст: непосредственный.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГИ ГУСЕНИЦ ПРИ КАЧЕНИИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

В статье описаны условия качения по воде гусеничных систем с грунтозацепами, проведено моделирование этого явления, получены зависимости осадки и несущей способности колесных систем от числа Фруда, приведена зависимость тяги гусениц от безразмерного параметра, равного отношению абсолютных скоростей нижней части гусеницы и надводной части модели.

Ключевые слова: идеальная несжимаемая жидкость, гусеница, качение по воде, гидродинамические силы, физическое моделирование

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_51



В.А. Ерошин



А.В. Бойко

До недавнего времени в число быстроходных надводных судов входили, в основном, глиссеры, экранопланы, суда на подводных крыльях и воздушной подушке. Их гидродинамические характеристики хорошо изучены, а соответствующие суда обладают высокой скоростью и прекрасными ходовыми качествами. Однако в последние годы произошло некоторое расширение этой группы судов за счет быстроходных надводных объектов на колесах (багги) и гусеницах (снегоходы), причем их скорости в ряде случаев значительно превосходят скорости судов на подводных крыльях и воздушной подушке. Информация о гидродинамических характеристиках этих судов в литературе отсутствует. Все это заставляет нас подумать о практическом использовании этих судов и заняться изучением их гидродинамических характеристик. Тем более, что дискуссии о применении таких средств в качестве транспортных ведутся достаточно давно [1–5].

Моделирование явления качения

Для устойчивого качения гусеничных транспортных средств по свободной поверхности воды, необходимо выяснить условия выполнения этого процесса. Для этого необходимо выбрать определяющие параметры и определить их различные комбинации (из безразмерных величин).

Установившееся качение гусеницы по свободной поверхности воды с относительно большой скоростью можно определить с помощью следующих параметров [6–8]:

$$\rho, V, m, g, l, B, D, h, \Delta \text{ и } \alpha, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды; V – скорость; m – масса; g – ускорение свободного падения; l – длина нижней (плоской) части гусеницы; B – ширина гусеницы; D – диаметр ведущего катка; h – высота грунтозацепов; Δ – среднее погружение (осадка) середины гусеницы;

Ерошин Владимир Андреевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИИ Механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова). Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, гидродинамика. Автор более 60 научных работ. Имеет восемь патентов РФ.

Бойко Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник НИИ Механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), доцент кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, гидродинамика. Автор более 30 научных работ. Имеет один патент РФ.

α – угол атаки. Если скорость качения гусеничного транспортного средства более 80 км/ч, то осадка мала по сравнению с диаметром ведущего катка гусеницы ($\Delta \ll D$). Основными безразмерными параметрами подобия в таком случае, характеризующими движение

по воде (кроме геометрических), будут: $\frac{V}{\sqrt{gl}}, \frac{m}{M}, \frac{\Delta}{D}, \alpha$,

где $M = \rho l^2 B$ – некоторая характерная масса гусеничной системы, $Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}}$ – число Фруда.

Оценка тяги гусеницы

Для гусеничных систем наибольший интерес представляет величина силы тяги, т.к. их несущая способность в значительной степени обеспечивается глиссирующими элементами, всегда имеющимися в таких конструкциях.

Измерение тяги гусеницы проводилось на установке маятникового типа (рис. 1). Модель 1 подвешивалась над водой на длинных стальных тросах таким образом, чтобы ее верхняя часть (палуба) в процессе движения (колебания) маятника оставалась параллельной свободной поверхности воды. Глубина погружения плиц в воду регулировалась путем изменения уровня жидкости в гидроканале и составляла для неподвижно висящей модели 3–7 значений высоты грунтозацепов (3–7 см). Перед проведением эксперимента модель отводилась влево и закреплялась на

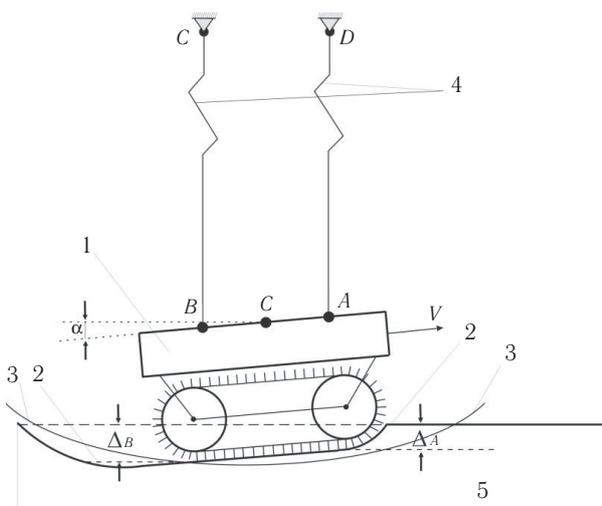


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – модель; 2 – свободная поверхность воды; 3 – огибающая траекторий плиц при $Y < mg$; 4 – условное изображение свободных (ненатянутых тросов)

некоторой начальной высоте H_0 . После освобождения модели включался двигатель, приводящий ведущий каток гусеницы во вращение с постоянной угловой скоростью ω . Затем модель разгонялась под действием силы тяжести и к моменту касания с водой приобретала скорость порядка $V = \sqrt{2gH_0}$.

Взаимодействие с водой модели с движущейся гусеницей приводило к увеличению (уменьшению) скорости и после выхода из воды она поднималась на высоту H_1 . При определении тяги гусеницы использовалась теорема об изменении кинетической энергии системы с идеальными связями [9;10]. Учитывая разницу высот до и после взаимодействия с водой, а также другие параметры (массу m модели с гусеницей, длину пути S в воде и пр.), средняя величина тяги гусеницы T определялась по формуле:

$$T = \frac{mg(H_1 - H_0)}{S}. \quad (2)$$

Расстояние S , пройденное гусеницей в воде, определялось по формуле: $S = Vt$, где V – средняя скорость движения модели в воде; t – время взаимодействия гусеницы с водой, которое определялось из диаграммы угловой скорости ω ведущего катка гусеницы (рис. 2).

На палубе модели в точках A, B и C были установлены лазеры, использовавшиеся для определения скорости модели V и угла атаки α гусеницы:

$$\alpha = \frac{\Delta_B - \Delta_A}{l}, \text{ где } \Delta_A \text{ и } \Delta_B \text{ – заглублиение (осадка) носа}$$

и кормы гусеницы, $l = AB$. Лазеры устанавливались в плоскости палубы модели [11;12]. Их лучи, параллельные между собой и перпендикулярные плоскости колебания маятника, писали на экране, установленном на стенке канала, траектории, позволяющие определить необходимые кинематические параметры движения модели (скорость, угол атаки, осадку Δ_k в точках A, B и C).

На рис. 3 приведена зависимость безразмерного

$$\text{коэффициента тяги } C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 B h} \text{ от безразмерного параметра } P = \frac{\omega R}{V}, \text{ равного отношению абсолютных}$$

скоростей нижней части гусеницы (создающей тягу) и надводной части конструкции. Здесь T – сила тяги; ρ – плотность воды; V – абсолютная скорость надводной части конструкции; B – ширина гусеницы; h – высота грунтозацепов; ω и R – соответственно угловая скорость и радиус катка гусеницы.

Экспериментальные точки изображены кружочками. Сплошной линией приведена зависимость,

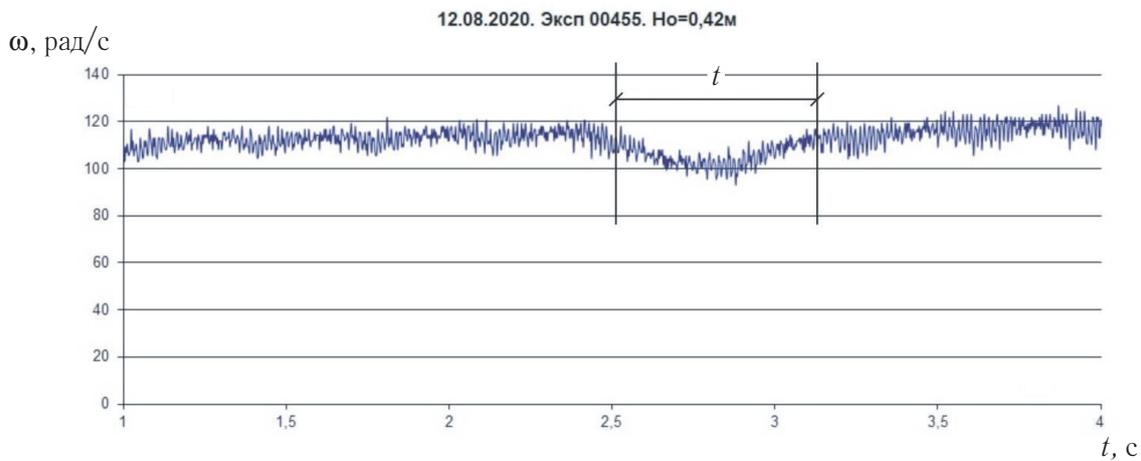


Рис. 2. Диаграмма зависимости угловой скорости ω от времени t

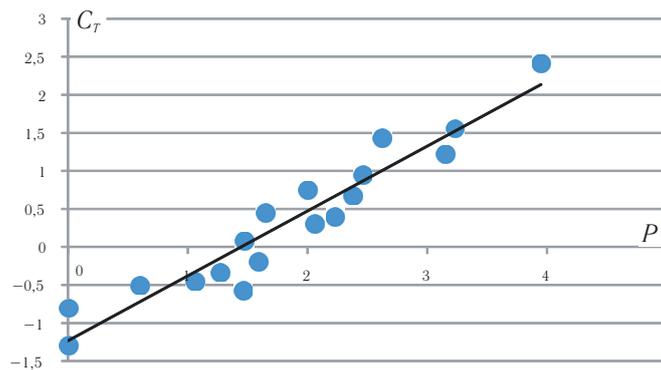


Рис. 3. Зависимость коэффициента тяги C_T гусеницы от параметра $p = \frac{\omega R}{V}$

полученная при обработке опытных данных методом наименьших квадратов [13;14]. В точке $P=0$ находятся опытные данные, полученные при буксировке неподвижной ($\omega=0$) гусеницы (коэффициент сопротивления значителен). В окрестности точки $P=1,4$ взаимодействие гусеницы с жидкостью, по-видимому, минимальное и величина силы тяги близка к нулю.

Влияние числа Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$ ($D=2R$) на величину тяги не обнаружено.

Оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой

В формулу (2), которая используется для определения силы тяги, входит значение пути S взаимодействия гусеницы с водой. Величину S нетрудно определить (как длину хорды окружности), если известно рас-

стояние от точки подвеса маятника до нижней части грунтозацепов (точнее размера проекции этого расстояния на плоскость колебаний) и расстояние до воды. Однако эксперименты показали, что это не так. Длина пути взаимодействия S значительно больше. Это объясняется тем, что при погружении гусеницы в воду уровень жидкости перед ней поднимается, причем на увеличение размеров этой области, по-видимому, влияет отношение скорости модели к скорости поверхностных волн. Поэтому величина пути взаимодействия определялась по формуле: $S=Vt$, где V – скорость модели; t – время ее взаимодействия с жидкостью. На рис.2 приведена диаграмма зависимости угловой скорости ω ведущего катка гусеницы от времени t в процессе ее взаимодействия с водой. При входе в воду угловая скорость ведущего катка уменьшается из-за увеличения нагрузки на двигатель, при выходе восстанавливается прежнее значение.

На рис. 4 приведена зависимость пути взаимодействия S от безразмерной скорости гусеницы $p = \frac{\omega R}{V}$, где R – радиус катка гусеницы. Кружочками нанесены значения S , полученные при нулевом угле атаки $\alpha=0$, треугольниками при $\alpha=0,1$. Из графика видно, что при малых значениях угла атаки его влияние на величину S несущественно.

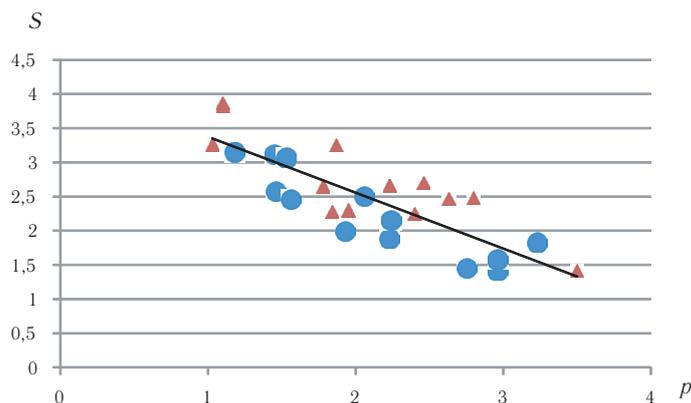


Рис. 4. Зависимость пути S взаимодействия гусениц с водой от безразмерной скорости гусеницы $p = \frac{\omega R}{V}$

Заключение

В результате проведенных экспериментов разработана и реализована методика, позволяющая моделировать качение гусеничных самоходных транспортных средств по поверхности воды. Предложены схемы измерения тяги и несущей способности гусеницы. Проведена оценка размеров области взаимодействия гусеницы с водой, а также получена зависимость коэффициента тяги и пройденного пути от безразмерной скорости гусеницы.



Литература

1. Константинов, К.С. Снова по воде на колесах/ К.С. Константинов. –Текст: непосредственный // Катера и яхты. –1973. –№45. –сент.-окт. –С. 54–56.
2. Конов, З.А. По воде на колесах/ З.А. Конов. –Текст: непосредственный // Катера и яхты. –1969. –№20. авг. –С.10–14.
3. P.C. Lombardini. R. Fidderman. A New Theory on Propulsion of High Speed Water Craft and its Application to the Hydroller. Proc. 7-th International Congress of Applied Mechanics 2. part II. 1948.
4. R. Taggart. Recent Marine Propulsion Development. «Journal of the American Society of Naval Engineers». May. 1960. v.72. N 2.
5. Егоров, И.Т. Гидродинамические особенности процесса качения тел по поверхности воды/ И.Т. Егоров. –Текст: непосредственный // Докл. XV научно-техн. конф. по теории корабля и гидромех. судна, апрель 1965. Крыловские чтения. –Вып. 64. –С.170–176.
6. Ерошин, В.А. Условия качения колесных транспортных средств / В.А. Ерошин, А.В. Бойко. –Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. –2019. –№3. –С.49–56.
7. Ерошин, В.А. Новые тенденции в гидродинамике и скоростных надводных систем/ В.А. Ерошин, А.В. Бойко. –Текст: электронный // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019, Том 20, №1. –С. 9. –URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44211865> (дата обращения 02.09.2021).

8. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – Москва, 1972. – 440 с. – Текст: непосредственный.
9. Локтев, А.А. Упругопластическая модель взаимодействия цилиндрического ударника и пластинки / А.А. Локтев. – Текст: непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2007. – Т. 33, № 16. – С. 72–77.
10. Glusberg B., Korolev V., Shishkina I., Loktev A., Shukurov J., Geluh P., Loktev D. Calculation of track component failure caused by the most dangerous defects on change of their design and operational conditions // В сборнике: МАТЕС Web of Conferences. 2018. С. 01054.
11. Loktev A.A. Non-elastic models of interaction of an impactor and an Uflyand-Mindlin plate // International Journal of Engineering Science. 2012. Т. 50. № 1. С. 46-55.
12. Локтев, А.А. Ударное взаимодействие твердого тела и упругой ортотропной пластинки / А.А. Локтев. – Текст: непосредственный // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2005. – Т. 11, № 4. – С. 494–508.
13. Loktev D.A., Loktev A.A. Diagnostics of external defects of railway infrastructure by analysis of its images // В сборнике: Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018. 2018. С. 8570083.
14. Glusberg B., Savin A., Loktev A., Korolev V., Shishkina I., Alexandrova D., Loktev D. New lining with cushion for energy efficient railway turnouts // Advances in Intelligent Systems and Computing (см. в книгах). 2020. Т. 982. С. 556–570.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ ГРУЗОПОТОКОВ, НАПРАВЛЕННЫХ В АДРЕС МАЛЫХ ПОРТОВ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА



В.А. Богачев



А.С. Кравец

В рамках эгалитарной концепции в теории благосостояния разработан комплексный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков в мультимодальной транспортно-технологической системе. Предлагается оптимизационная модель регионального процесса грузоперевозок, математическая реализация которой представляет собой задачу целочисленного программирования, решенную с помощью системы компьютерной алгебры.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, грузовые перевозки, мультиагентность, распределение грузопотоков, критерий Парето

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_56

Значительная часть проводившихся в последнее время транспортно-логистических исследований посвящена вопросам оптимизации распределения грузопотоков, рассматриваемых в рамках мультимодальных систем транспортировки [1–5].

В статье [1] разработана модель поддержки принятия решений при рассмотрении устойчивой цепочки поставок продовольственного зерна с учетом всей сети центров закупок. Приводятся примеры функционирования модели на основе двух многоцелевых алгоритмов, в которых используется критерий Парето. Методы математического программирования используются в

[2]. При этом решается транспортная задача, в которой параметры спроса и предложения имеют стохастический характер, а стоимость зависит от их величины. В статье [3] представлены возможности совместного использования двух различных математических методов в транспортно-логистических исследованиях, при котором для рассматриваемого полигона строится ГЕМ олигополистического рынка грузовых перевозок. В [4;5] разработана функционирующая в программной среде оптимизационная модель мультимодальных грузовых перевозок, осуществляемых на транспортном полигоне согласно временным критериям.

Богачев Виктор Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: нечеткие множества и их применение в анализе систем и процессов, оптимизация функционирования транспортно-технологических систем, системы аналитических вычислений в математическом моделировании, линейные операторы в пространствах аналитических функций. Автор 60 научных работ, в том числе одной монографии.

Кравец Александра Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: взаимодействие в транспортно-технологических системах, управление грузопотоками, моделирование процессов перевозок. Автор 53 научных работ.

Игнатъева Олеся Владимировна, кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Вычислительная техника и автоматизированные системы управления» Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). Область научных интересов: информационные системы, информационные технологии, программирование, базы данных. Автор 51 научной работы, в том числе четырех учебников. Имеет три патента на изобретения.

Богачев Тарас Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Фундаментальной и прикладной математики» Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). Область научных интересов: нечеткие множества и их применение в анализе экономических систем, интеллектуальный анализ данных, оптимизация функционирования транспортно-технологических систем, системы аналитических вычислений в математическом моделировании, колебания пологих оболочек. Автор 88 научных работ, в том числе пяти монографий.

Об актуальности разработки комплексных подходов в изучении мультимодальных перевозок грузов

Приведенный выше анализ исследований, посвященных мультимодальным грузовым перевозкам, дает представление об актуальности рассматриваемых вопросов и разнообразии методов, которые применяются при изучении процессов, протекающих в различных транспортно-технологических системах.

Ввиду объемности и относительно низкой стоимости экспортируемых из России сырьевых товаров несомненный практический интерес представляет изучение мультимодальных перевозок, осуществляемых железнодорожным и морским видами транспорта. Из-за разветвленности путей сообщения в направлении портов Азово-Черноморского бассейна (АЧБ), а также присутствия на рынке перевозок значительного количества активно занимающихся указанным экспортом компаний, юго-западная часть полигона Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД) выступает в качестве платформы, обеспечивающей развитый рынок транспортных услуг. В результате для клиентов открываются широкие возможности для выбора среди большого разнообразия схем грузоперевозок таких, которые оказываются предпочтительными с точки зрения рационализации всей транспортно-логистической цепочки.

Объектом проводимых в настоящей работе исследований являются схемы организации региональных мультимодальных грузоперевозок, которые позволяют оптимизировать перевозочный процесс на качественно новой основе по сравнению исследованиями, проводившимися ранее. Основная идея предлагаемого подхода состоит в комбинировании разработанных ранее в статьях [3–5] различных по своей математической природе методов с целью повышения достоверности получаемых результатов.

В работе рассматривается система транспортировки зерновых в адрес портов АЧБ. Реализация разработанного алгоритма оптимизации доведена до численных результатов в предположении, что предназначенный для перевозки зерновой груз находится на станциях погрузки Тагинская, Ремонтная, Сальск и Тихорецкая, а станциями выгрузки являются припортовые станции Ейск, Азов, Заречная, Таганрог и Усть-Донецкая (рис. 1).

Математическая модель перевозочного процесса

Целевые функции в оптимизационной задаче

В концептуальном отношении проводимые в настоящей работе исследования соответствуют эгалитарному подходу в теории благосостояния [6]. Это нахо-

дит выражение в выборе целевых функций и ограничений в оптимизационной задаче, который направлен на то, чтобы в той или иной форме учесть экономические и другие интересы рассматриваемых участников перевозочного процесса (согласно работе [6] для них используется термин «агенты»).

Приведем краткие пояснения к общим предположениям в рассматриваемой оптимизационной задаче. Имеется m станций погрузки и n станций выгрузки. Пусть a_i — число отправительских маршрутов, запланированных к вывозу с i -й станции погрузки ($i=1, 2, \dots, m$) и x_{ij} — число отправительских маршрутов, которые можно направить с i -й станции погрузки в адрес j -й станции выгрузки ($j=1, 2, \dots, n$). На первом этапе исследований в отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) будем предполагать лишь, что все запланированное к вывозу зерно на станциях погрузки должно быть вывезено на рассматриваемые станции выгрузки. То есть предполагается выполнение равенств:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i=1, 2, \dots, m). \quad (1)$$

Таким образом, изначально ситуацию можно отнести к открытой модели. По мере развития оптимизационной модели выбор множества D будет корректироваться в зависимости от оперативных условий, в рамках которых изучается перевозочный процесс.

В качестве характеристик экономической целесообразности и уровня организации перевозочного процесса будем рассматривать стоимостной и временной показатели.

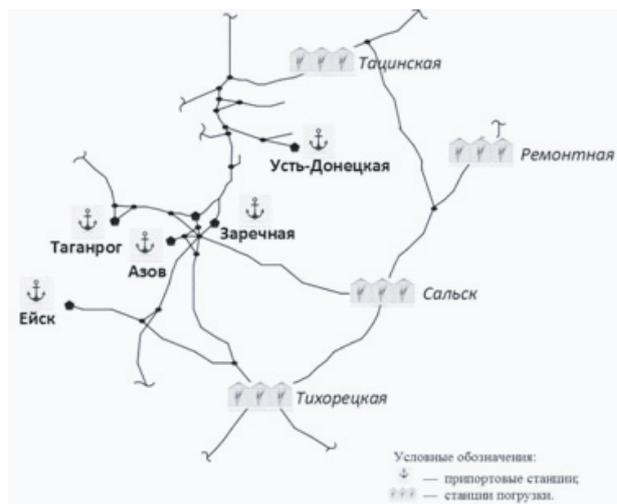


Рис. 1. Фрагмент полигона СКЖД

Стоимостной показатель в рассматриваемой оптимизационной задаче задается целевой функцией вида:

$$c = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}. \quad (2)$$

Здесь c_{ij} — стоимость перевозки одного отправительского маршрута (тыс. руб.) на участке между i -й станцией погрузки и j -й станцией выгрузки.

Величина c представляет собой суммарную стоимость перевозок всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). Стоимость перевозки грузов является комплексным и разносторонним показателем процесса перевозки с точки зрения учета интересов различных участников этого процесса. Посредством показателя c выражаются не только экономические параметры перевозки, такие как транспортная составляющая в стоимости перевозимых товаров, затраты клиента, конкурентоспособность используемого вида транспорта.

Временной показатель в рассматриваемой оптимизационной задаче задается целевой функцией вида:

$$\tau = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij}. \quad (3)$$

Здесь t_{ij} — время нахождения отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки и j -й станцией выгрузки.

Показатель τ представляет собой суммарное время нахождения на полигоне всех отправительских маршрутов, которые участвуют в реализации плана перевозок (x_{ij}). Будем называть этот показатель суммарным временем плана перевозок (x_{ij}).

Ввиду того, что время τ является выражением степени занятости путевой инфраструктуры полигона при реализации плана перевозок (x_{ij}) (а, следовательно, и степени ее эксплуатации), к величине этого показателя со стороны компании ОАО «РЖД» (которая в России от лица государства выступает собственником этой инфраструктуры) естественно предположить двойственное отношение. С одной стороны, экономическая выгода указанного агента проистекает из эксплуатации путевой инфраструктуры. С другой стороны, интенсификация эксплуатации объектов этой инфраструктуры влечет за собой увеличение расходов, требуемых на их амортизацию.

Комплексность рассматриваемых критериев оптимизации позволяет предполагать наличие выгод в отношении каждого из агентов, причем как экономического, так и неэкономического характера (экологичность, ресурсосбережение, возможность обеспечения ритмичности перевозок и др.). Выгоду от минимизации показателя c получает такой агент перевозочного

процесса как клиент (грузовладелец), а также другие агенты в том случае, когда это снижение происходит не в результате демпинга цен на предоставляемые ими услуги, а вследствие использования ресурсосберегающих технологий.

Эгалитарный подход в двухкритериальной оптимизации

По своему аналитическому выражению (2) и (3) целевые функции c и τ не являются конфликтующими между собой (по крайней мере, в экономическом смысле) как это, вообще говоря, позиционируется в теории благосостояния в отношении полезностей рассматриваемых агентов [6].

Мы будем рассматривать оптимизационную задачу с целевыми функциями c и τ и множеством D допустимых планов перевозок, относительно которого будет происходить последовательное уточнение по мере того, как будут более полно учитываться обстоятельства рассматриваемой транспортно-логистической ситуации. Каждому плану перевозок (x_{ij}) $\in D$ поставим в соответствие вектор $\{c, \tau\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным назовем план перевозок (x_{ij}') $\in D$ с вектором полезности $\{c', \tau'\}$, для которого не существует плана перевозок (x_{ij}) $\in D$ такого, что координаты его вектора полезностей $\{c, \tau\}$ удовлетворяют условию ($c < c'$ и $\tau \leq \tau'$) или условию ($c \leq c'$ и $\tau < \tau'$).

Вспомогательные результаты

ГЕМ как источник ограничений в оптимизационной задаче

В этом разделе будут найдены ограничения на множество D допустимых планов перевозок (x_{ij}) (наряду с теми, что выражаются равенствами (1)) для того, чтобы более полно учесть специфику расположения железнодорожной сети в рассматриваемом регионе. При этом мы обратимся к разработанной ранее геометрической евклидовой модели (ГЕМ) территориального олигополистического рынка грузовых перевозок, создаваемого рассматриваемыми станциями погрузки. Полное изложение соответствующих транспортно-логистических построений содержится, например, в статьях [3;4]. В настоящей работе приводятся только результаты, полученные на промежуточных этапах построения указанной модели в рассматриваемой ситуации.

Территориальная картина грузоперевозок в регионе

Пользуясь экономико-географическим методом разграничения «областей влияния» станций погрузки [4;5], найдем алгебраические кривые 4-го порядка, которые осуществляют указанное разграничение в рассматриваемой ситуации. В результате будет получена территориальная картина олигополистического

рынка грузовых перевозок, о которой сказано во введении. Напомним, что разграничение «областей влияния» станций погрузки осуществляется в соответствии со стоимостью перевозки грузов от этих станций до пунктов назначения.

Первый этап построения ГЕМ состоит в нахождении для каждой из рассматриваемых станций погрузки соответствующего выражения зависимости стоимости c (тыс. руб.) перевозки одного отправительского маршрута от длины l (км) пройденного пути. После обработки методом наименьших квадратов числовых данных, представляющих собой характеристику транспортного потока зерновых грузов, получаем, что для каждой станции искомая зависимость имеет вид: $c = p + ql$. Здесь p и q – стоимостные показатели, которыми выражаются затраты на начально-конечные и движущие операции (на 1 км пути), приходящиеся на один отправительский маршрут. Найденные для каждой станции погрузки выражения зависимости приведены в табл. 1.

Указанные выше выражения позволяют построить ГЕМ территориального олигополистического рынка перевозок зерновых, создаваемого на данном транспортном полигоне рассматриваемыми станциями погрузки. Простейшей формой функционирования такого рынка является процесс грузоперевозок, осуществляемый в рамках какой-либо операторской компании.

Полученная в результате исследования территориальная картина рынка грузоперевозок, создаваемого рассматриваемыми в настоящей работе четырьмя станциями погрузки, приведена на рис. 2.

Формулировка предварительных ограничений в оптимизационной задаче

В «область влияния» станции погрузки Тацинская попадает припортовая станция Усть-Донецкая, а в «область влияния» станции погрузки Тихорецкая – остальные четыре припортовых станции: Ейск, Азов, Заречная и Таганрог. Таким образом, в «области влияния» станций погрузки Ремонтная и Сальск не попадает ни одна из рассматриваемых в настоящей работе припортовых станций. Заметим, что этот



Рис. 2. Территориальная картина рынка грузоперевозок

результат не получается непосредственно, то есть если руководствоваться лишь какими-то географическими «соображениями».

Выполненное в настоящих исследованиях комбинирование различных математических методов, с одной стороны, позволяет повысить степень достоверности результатов, которые получают далее в процессе решения поставленной задачи. С другой, удастся сократить объем вычислительных процедур, требуемых для реализации разработанного в статье соответствующего оптимизационного алгоритма.

Итак, относительно ограничений на множество допустимых планов перевозок в оптимизационной задаче далее будем предполагать следующее. Маршруты со станций Тацинская и Ремонтная могут направляться в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Ейск. При этом со станции Тацинская хотя бы один маршрут должен быть направлен в адрес станции Усть-Донецкая. Маршруты со станции Сальск могут направляться в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Таганрог. Наконец, маршруты со станции Тихорецкая могут быть направлены в адрес всех припортовых станций, за исключением станции Усть-Донецкая.

Таблица 1

Выражения зависимости стоимости перевозки вагона со станций погрузки

№ п/п	Станция погрузки	$c = p + ql$
1	Тацинская	$c = 645,11 + 1,8421l$
2	Ремонтная	$c = 664,96 + 1,8286l$
3	Сальск	$c = 616,62 + 1,9996l$
4	Тихорецкая	$c = 548,58 + 2,2171l$

Предварительные результаты

Приведем предварительные (имеющие пробный характер) результаты решения поставленной в разделе «Математическая модель перевозочного процесса» оптимизационной задачи, которые получаются при некоторых дополнительных предположениях относительно числа рассматриваемых отправительских маршрутов. Здесь и далее вычислительные процедуры выполнены в среде *Matha* (*Free Ware*).

Для определенности начнем с предположения, когда на каждой из четырех рассматриваемых станций погрузки находятся по 2 отправительских маршрута с зерном.

В отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) сначала предполагаем лишь выполнение равенств (1). В табл. 2 приведены 15 планов перевозок, представляющих собой «ступеньки» в «оптимизационной лестнице», получаемой в процессе улучшения допустимых планов согласно критерию Парето. Эти планы выбраны из многих сотен тысяч планов (которые на данном этапе исследования составляют множество D), проанализированных системой компьютерной алгебры в соответствии с разработанным алгоритмом оптимизации. Из содержащегося в последней строке таблицы оптимального плана перевозок видно, что в адрес припортовой станции Таганрог должны быть направлены 6 маршрутов, а в адрес станции Усть-Донецкая – 2 маршрута. В адрес остальных трех припортовых станций поступления отсутствуют.

Итак, все отправительские маршруты распределены между двумя указанными припортовыми

станциями. Заметим, что если исходить лишь из географических соображений, то полученное распределение грузопотока выглядит естественно (рис. 1), хотя не является очевидным с количественной точки зрения.

Воспользуемся теперь теми предварительными ограничениями на число маршрутов, отправляемых со станций погрузки, которые были получены выше с помощью ГЕМ и сформулированы в подразделе «Формулировка предварительных ограничений в оптимизационной задаче». В табл. 3 приведены 7 планов перевозок, представляющих собой «ступеньки» в соответствующей «оптимизационной лестнице».

Найденный оптимальный план перевозок совпал с тем, что был получен выше. Однако, «оптимизационная лестница» оказалась существенно короче и быстрее был реализован объем необходимых вычислительных процедур.

Далее изложение предварительных результатов продолжим в предположении, что в адрес каждой из припортовых станций должен поступить хотя бы один отправительский маршрут с зерном.

В отношении множества D допустимых планов перевозок (x_{ij}) также сначала будем предполагать лишь выполнение равенств (1). В табл. 4 приведены 7 планов перевозок, представляющие собой «ступеньки» «оптимизационной лестницы» в указанной ситуации. Отметим, что станции Заречная и Усть-Донецкая по-прежнему доминируют среди других припортовых станций.

Обратимся и в этом случае к предварительным ограничениям на число маршрутов, которые были

Таблица 2

Допустимые планы перевозок в задаче без дополнительных ограничений

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2	0	0	0	0	8	10325,16	8,62
2	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,1,1	0	0	0	1	7	10142,46	8,37
...
14	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	5	1	2	8595,54	5,96
15	0,0,0,0,2,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	6	0	2	8483,52	5,74

Таблица 3

Допустимые планы перевозок в задаче с ограничениями, даваемыми ГЕМ

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,2,0,0	0	0	2	0	6	9646,08	7,66
2	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,1,0,1,0,0,2,0,0	0	0	3	0	5	9345,60	7,18
...
6	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	5	1	2	8595,54	5,96
7	0,0,0,0,2,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0	0	0	6	0	2	8483,52	5,74

Таблица 4

Допустимые планы перевозок в задаче без дополнительных ограничений

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9580,32	7,01
2	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9555,42	7,01
3	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	2	3	9411,54	6,75
4	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	1	3	9254,94	6,53
5	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0	1	1	1	3	2	9242,76	6,49
6	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	2	2	9086,16	6,27
7	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	3	1	2	8974,14	6,05

получены выше с помощью ГЕМ. В результате оказывается, что «оптимизационная лестница» сокращается до четырех «ступенек» (табл. 5).

Итак, в результате проведенных предварительных исследований можно сделать вывод об адекватности ограничений, даваемых ГЕМ, с точки зрения применения их при решении рассматриваемой оптимизационной задачи, а также их эффективности с точки зрения рационализации оптимизационного процесса.

Основные результаты

К факторам, которые оказывают объективное влияние на распределение грузопотоков в адрес рассматриваемых в статье припортовых станций, следует отнести их географическое расположение и экспортный потенциал.

Высокая грузонапряженность железнодорожных подходов во все указанные порты и отсутствие складов достаточно большой емкости создают необходи-

Таблица 5

Допустимые планы перевозок в задаче с ограничениями, даваемыми ГЕМ

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции					с	τ
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая		
1	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0	1	1	1	1	4	9555,42	7,01
2	0,0,0,0,2,0,0,0,1,1,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	1	3	9254,94	6,53
3	0,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	2	2	2	9086,16	6,27
4	0,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0,2,0,0,1,1,0,0,0	1	1	3	1	2	8974,14	6,05

мость в весьма тщательном планировании времени доставки в них грузов.

В порты городов Ейск и Таганрог заходят морские суда дедвейтом соответственно до 7 и 15 тыс. т. В порты городов Азов, Заречная и Усть-Донецк заходят морские суда дедвейтом соответственно до 7, 5 и 5 тыс. т. Заметим, что каждое судно дедвейтом в 7 тыс. т заполняется двумя отправительскими маршрутами, которые в среднем состоят из 50 вагонов грузоподъемностью по 64 т каждый. Считаем, что одно судно дедвейтом в 15 тыс. т заполняется четырьмя маршрутами, а два судна дедвейтом по 5 тыс. т — тремя маршрутами.

Будем предполагать, что на каждой из четырех рассматриваемых станций погрузки находятся по 4 отправительских маршрута с зерном. В адрес станции Ейск могут быть направлены 2, 4, 6 или 8 маршрутов. В адрес станции Азов — 2 или 4 маршрута. В адрес станции Таганрог — 4 или 8 маршрутов. В адрес станции Усть-Донецкая — 1, 3, 4 или 6 маршрутов. Для того, чтобы убедиться в гибкости разработанного оптимизационного алгоритма, припортовую станцию Заречная освободим от ограничений на число маршрутов, направляемых в ее адрес.

В табл. 6 приведены 11 планов, получаемых в процессе улучшения допустимых планов перевозок согласно критерию Парето. Они выбраны системой компьютерной алгебры из миллионов проанализированных планов, которые в данной ситуации составляют множество D . Рис. 3 дает наглядное представление об оптимизации процесса перевозок по двум рассматриваемым показателям.

Из содержащегося в последней строке табл. 6 оптимального плана перевозок видно, что в адрес припор-

товой станции Заречная должны быть направлены 4 маршрута, содержимое которых обеспечивается вместимостью трех судов дедвейтом 5 тыс. т.

Выводы

Рассматривается комплексный подход в нахождении рациональных схем распределения грузопотоков в мультимодальной транспортно-технологической системе. В рамках эгалитарной концепции в теории благосостояния разработана функционирующая в программной среде системы аналитических вычислений оптимизационная модель процесса грузоперевозок со стоимостным и временным показателями. В качестве вспомогательного инструмента при нахождении ограничений в оптимизационной задаче используется разработанный ранее авторами общий подход в транспортно-логистических исследованиях, при котором для рассматриваемого полигона строится геометрическая евклидова модель регионального олигополистического рынка транспортных услуг, образуемого станциями погрузки.

Предложенный подход к нахождению рациональных схем распределения грузопотоков в рамках регионального рынка транспортных услуг является универсальным в отношении видов транспорта. Рассматриваемые в сочетании метод экономико-географического разграничения «областей влияния» станций погрузки и оптимизационный алгоритм распределения грузопотоков согласно критерию Парето, могут быть использованы при изучении вопросов оптимального функционирования других видов наземного транспорта с учетом характера и специфики используемой при этом инфраструктуры. 

Таблица 6

Распределение грузопотоков при двухкритериальной оптимизации

№	Допустимые планы перевозок	Число отправительских маршрутов, прибывающих на припортовые станции				
		Ейск	Азов	Заречная	Таганрог	Усть-Донецкая
1	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,0,0,2,2,2,0,0,0	4	2	0	4	6
2	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,0,0,2,0,2,2,0,0	2	2	2	4	6
3	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,4,0,0,0,0,0,2,2,0,0	4	2	2	4	4
4	0,0,0,3,1,0,0,0,1,3,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
5	0,1,0,2,1,0,0,0,2,2,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
6	0,0,0,2,2,0,0,0,2,2,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
7	0,1,0,1,2,0,0,0,3,1,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
8	0,0,0,1,3,0,0,0,3,1,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4
9	0,2,1,0,1,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,0,4,0,0	2	2	7	4	1
10	0,1,0,0,3,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,1,3,0,0	2	2	5	4	3
11	0,0,0,0,4,0,0,0,4,0,2,0,2,0,0,0,2,2,0,0	2	2	4	4	4

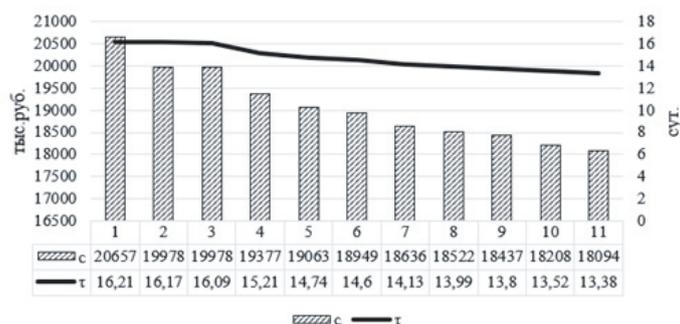


Рис. 3. Динамика поведения целевых функций при двухкритериальной оптимизации

Литература

1. Mogale, D.G. Modelling of sustainable food grain supply chain distribution system: a bi-objective approach / D.G. Mogale, N. Cheikhrouhou, M.K. Tiwari // International Journal of Production Research. –2020. –Т. 58 (18). –С. 5521–5544.
2. Prachi, A. Multi-choice stochastic transportation problem involving logistic distribution / A. Prachi, G. Talari // Advances and Applications in Mathematical Sciences. –2018. –Т. 18 (1). –Р. 45–58.
3. Богачев, В.А. Математическое моделирование в оптимизации территориального рынка грузоперевозок в припортовой транспортной зоне / В.А. Богачев, А.С. Кравец, Т.В. Богачев, М.А. Мельников. –Текст: непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. –2020. –№ 2 (80). –С. 84–92.
4. Chislov, O.N. Modelling of the rail freight traffic by the method of economic-geographical delimitation in the region of the South-Easter Coast of the Baltic Sea / O.N. Chislov, V.A. Bogachev, V.M. Zadorozhniy, O.I. Demchenko, V.V. Khan, T.V. Bogachev // Transport problems. –2019. –Т. 14. –№ 2. –С. 77–87.
5. Chislov, O.N. Time Parameters Optimization of the Export Grain Traffic in the Port Railway Transport Technology System / O.N. Chislov, V.M. Zadorozhniy, T.V. Bogachev, A.S. Kravets, I.N. Egorova, V.A. Bogachev // Smart and Green Solutions for Transport Systems. –2020. –Т. 1091. –С. 126–137.
6. Мулен, Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели / Э. Мулен; Пер. с англ. О. Р. Меньшиковой; Под ред. И. С. Меньшикова; [Предисловия И. Меньшикова, А. Сена]. –Москва: Мир, 1991. –463 с. –ISBN 5-03-002131-0. –Текст: непосредственный.

К ВОПРОСУ О КОЛЕБАНИЯХ УПРУГОЙ СРЕДЫ, ВЫЗВАННЫХ ДЕЙСТВИЕМ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ СИЛЫ



В.Н. Алексеев

Рассмотрено плоскополяризованное волновое движение упругой среды. Получены выражения для скалярного и векторного потенциалов такого движения, что позволяет определять компоненты смещений и напряжений, возникающих в средах.

Ключевые слова: изотропно-упругая среда, продольные и поперечные волны, скалярный и векторный потенциалы, плоскополяризованное движение, функции Бесселя и Ханкеля

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_64

Строительство сооружений железнодорожной инфраструктуры в ряде случаев может потребовать проведения буровзрывных работ с использованием удлиненных зарядов, устанавливаемых в полостях (шпурах, скважинах), заранее подготовленных в разрабатываемой среде (твердые и скальные породы, мерзлые грунты и т.п.). При этом необходим расчет напряжений и смещений, возникающих вследствие волновых процессов, генерируемых в среде действием взрывных нагрузок. Такой расчет основывается на анализе решений соответствующих волновых задач. Рассмотрим одну из задач такого типа, имеющую несомненную актуальность.

Исследуем процесс распространения волн в однородной сплошной изотропно-упругой безграничной среде, вызванный действием нагрузки, равномерно распределенной вдоль бесконечно прямой и ориентированной ортогонально этой прямой. Требуется определить волновое движение среды.

Для решения поставленной задачи применим метод, используемый, в частности, в математической теории

упругости [1], сейсмологии и сейсморазведке [2] и состоящий в следующем.

Рассмотрим бесконечно длинную круглую цилиндрическую скважину малого радиуса r_0 , в которую помещена («впяена») тонкостенная упругая металлическая труба, на внутреннюю поверхность которой действует заданная нагрузка, что приводит к возникновению в окружающей скважину среде волнового поля. Естественно принять, что выполняя предельный переход, устремляя к нулю радиус скважины (и, следовательно, трубы), получаем решение поставленной задачи о действии в сплошной безграничной среде сосредоточенной нагрузки, равномерно распределенной вдоль бесконечной прямой.

Будем описывать волновое движение среды с помощью потенциалов смещения – продольного $\Phi(x, y, z, t)$ и поперечного $\Psi(x, y, z, t)$ [3].

Согласно основной теореме векторного анализа [4], векторное поле смещений $\vec{u}(x, y, z, t)$ точек среды, вызванное действием рассматриваемой нагрузки, заданное во всем пространстве и исчезающее на бес-

конечности вместе с дивергенцией и вихрем, может быть единственным образом (с точностью до векторной постоянной) представлено в виде суммы потенциального $u_1(x, y, z, t) = q \operatorname{grad} \varphi$ и соленоидального $u_2(x, y, z, t) = \operatorname{rot} \bar{\psi}$ полей:

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + \bar{u}_2 = q \operatorname{grad} \varphi + \operatorname{rot} \bar{\psi}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \bar{u}_1 = \operatorname{rot} q \operatorname{grad} \varphi = 0; \quad \operatorname{div} \bar{u}_2 = \operatorname{div} \operatorname{rot} \bar{\psi} = 0.$$

Движение среды может быть описано двумя волновыми уравнениями, которым подчинены потенциалы:

$$\Delta \varphi - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

$$\Delta \bar{\psi} - \frac{1}{b^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

Уравнением (2) описывается распространение в среде продольных волн, уравнением (3) — поперечных;

$a^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_{\text{ср}}}$, $b^2 = \frac{\mu}{\rho_{\text{ср}}}$ — квадраты скоростей указанных волн соответственно; λ и μ — коэффициенты Ламе; $\rho_{\text{ср}}$ — плотность среды.

Задача заключается в отыскании значений скалярного $\varphi(x, y, z, t)$ и векторного $\bar{\psi}(x, y, z, t)$ потенциалов, удовлетворяющих соответствующим условиям (1).

Будем рассматривать плоскополяризованное волновое движение, при котором поле смещений точек среды ориентировано ортогонально продольной оси цилиндрической скважины.

Введем прямоугольную систему координат, направление оси x которой совместим с направлением действующей силы, а ось y — с продольной осью скважины. Тогда для компонент вектора смещений $\bar{u}(u, v, w)$ точек среды будем иметь $u = u(x, z)$, $v = 0$, $w = w(x, z)$; для компонент векторного потенциала $\bar{\psi}_x = \bar{\psi}_z = 0$ и $\bar{\psi}_y = \bar{\psi}_y(x, z, t)$, а векторное уравнение (3) сводится к единственному скалярному уравнению относительно единственной отличной от нуля компоненты $\bar{\psi}_y(x, z, t)$ векторного потенциала $\bar{\psi}(\bar{\psi}_x, \bar{\psi}_y, \bar{\psi}_z) = \bar{\psi}(0, \bar{\psi}_y, 0)$, обозначение которой везде далее будем записывать без нижнего символа. Рассматриваемое волновое движение будет описываться двумя скалярными уравнениями относительно функций $\varphi(x, z, t)$ и $\bar{\psi}(x, z, t)$; эти уравнения аналогичны по своей форме:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial y^2} - \frac{1}{b^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Компоненты вектора смещения $\bar{u}(u, v, w)$ будут выражаться через потенциалы формулами:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y}; \quad v = 0; \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x}. \quad (6)$$

Переходя к цилиндрическим координатам r, α, y , определяемым равенствами $x = r \cdot \cos \alpha$, $y = y$, $z = r \cdot \sin \alpha$, $0 \leq r < +\infty$, $0 \leq \alpha \leq 2\pi$, $-\infty < y < +\infty$ и выражая в этих координатах оператор Лапласа, получаем в силу (4) и (5) два уравнения относительно значений искомых потенциалов $\varphi(r, \alpha, t)$ и $\bar{\psi}(r, \alpha, t)$:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \alpha^2} - \frac{1}{b^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial t^2} = 0. \quad (8)$$

Как известно [3], все волновые уравнения, полученные для поля смещений в условиях осевой симметрии, имеют одинаковый вид.

В цилиндрических координатах зависимости между потенциалами, компонентами смещений и напряжений определяются формулами:

$$u_r(r, \alpha) = \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \alpha}, \quad (9)$$

$$u_\alpha(r, \alpha) = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} - \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial r}; \quad (10)$$

$$\sigma_{rr}(r, \alpha) = \lambda \theta + 2\mu \cdot e_{rr} = \lambda \theta + 2\mu \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \theta = \operatorname{div} \bar{u}, \quad (11)$$

$$\sigma_{r\alpha}(r, \alpha) = \mu \cdot e_{r\alpha} = \mu \left(\frac{\partial u_\alpha}{\partial r} - \frac{u_\alpha}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \alpha} \right). \quad (12)$$

Примем, что действующая нагрузка задана функцией

$$P(t) = P_0 \cdot e_{i\omega t}. \quad (13)$$

Для решения рассматриваемой задачи необходимо найти решения $\varphi(r, \alpha, t)$ и $\bar{\psi}(r, \alpha, t)$ уравнений (7) и (8) при следующих условиях.

В силу отсутствия составляющей смещений цилиндра, «впаянного» в скважину, вдоль оси y :

$$(u_r \cdot \sin \alpha + u_\alpha \cdot \cos \alpha) \Big|_{r=r_0} = 0. \quad (14)$$

Из условия равновесия между усилиями, действующими со стороны среды на цилиндр и нагрузкой, приложенной к цилиндру, заданной по величине и направлению

$$\int_0^{2\pi} \left[\sigma_{rr}(r_0, \alpha, t) \cdot \cos \alpha - \sigma_{r\alpha}(r_0, \alpha, t) \cdot \sin \alpha \right] \cdot r_0 \cdot d\alpha + P_0 \cdot e^{i\omega t} = 0, \quad (15)$$

$$\int_0^{2\pi} \left[\sigma_{rr}(r_0, \alpha, t) \cdot \sin \alpha + \sigma_{r\alpha}(r_0, \alpha, t) \cdot \cos \alpha \right] \cdot d\alpha = 0. \quad (16)$$

Найдем теперь решение уравнения (7). Полагая

$$\varphi(r, \alpha, t) = R(r) \cdot V(\alpha) \cdot \tau(t) \quad (17)$$

в силу (7) будем иметь:

$$\frac{R''}{R} + \frac{1}{r} \cdot \frac{R'}{R} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{V''}{V} = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\tau''}{\tau} = -\frac{\omega^2}{a^2}, \quad (18)$$

где ω^2 – произвольная постоянная. Из этого соотношения для определения функции $\tau(t)$ получаем:

$$\tau'' + \omega^2 \tau = 0$$

и следовательно,

$$\tau(t) = c_1 \cdot e^{i\omega t} + c_2 \cdot e^{-i\omega t}, \quad (19)$$

где c_1 и c_2 – произвольные постоянные.

Теперь согласно (18) имеем:

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + \frac{\omega^2}{a^2} r^2 = -\frac{V''}{V} = n^2, \quad (20)$$

где n^2 – произвольная постоянная. Следовательно,

$$V'' + n^2 V = 0$$

и таким образом

$$V(\alpha) = B_1 \cdot \cos n\alpha + B_2 \cdot \sin n\alpha. \quad (21)$$

Вследствие того, что искомое поле должно быть однозначным и периодическим с периодом 2π : $V(\alpha + 2\pi) = V(\alpha)$, значение n в (21) может быть только целым ($n = 0, 1, 2, \dots$).

Согласно (20) радиальная функция $R(r)$ удовлетворяет уравнению

$$R'' \frac{1}{r} R' + \left(\frac{\omega^2}{a^2} - \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0.$$

Заменой

$$\rho = \frac{\omega r}{a} \quad (22)$$

это уравнение сводится к уравнению Бесселя n -го порядка

$$R''(\rho) + \frac{1}{\rho} R'(\rho) + \left(1 - \frac{n^2}{\rho^2} \right) R(\rho) = 0, \quad (23)$$

общее решение которого имеет вид:

$$R(\rho) = A_1 \cdot J_n(\rho) + A_2 \cdot N_n(\rho), \quad (24)$$

где $J_n(\rho)$ и $N_n(\rho)$ – функции Бесселя первого и второго рода соответственно; A_1 и A_2 – произвольные постоянные.

В решении (24) перейдем от функций Бесселя к функциям Ханкеля, определяемым через функции Бесселя первого и второго рода формулами:

$$H_n^{(1)}(\rho) = J_n(\rho) + i \cdot N_n(\rho), \quad H_n^{(2)}(\rho) = J_n(\rho) - i \cdot N_n(\rho),$$

что позволит проще проанализировать полученное решение. Очевидно, что функции Ханкеля как линейные

комбинации двух решений уравнения Бесселя также являются его решениями, причем линейно независимыми, поскольку вронскиан этих функций отличен от нуля [5, с.120]:

$$\Delta[H_n^{(1)}(\rho), H_n^{(2)}(\rho)] = -\frac{4i}{\pi\rho}.$$

Таким образом, для значения радиальной функции $R(\rho)$ будем иметь:

$$R(\rho) = A_n H_n^{(2)}(\rho) + B_n H_n^{(1)}(\rho), \quad (25)$$

где A_n и B_n – произвольные постоянные.

Искомое поле смещений точек среды должно иметь характер волны, распространяющейся в бесконечность по радиальным направлениям. Из анализа асимптотических выражений для функций Ханкеля [5, с.144]

$$H_n^{(1)}(\rho) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\rho}} \cdot e^{i\left(\rho - n\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad H_n^{(2)}(\rho) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi\rho}} \cdot e^{-i\left(\rho - n\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)}$$

при больших значениях аргумента ($\rho \gg 1$) следует, что слагаемое $A_n H_n^{(2)}(\rho)$ в сочетании с временным множителем $e^{i\omega t}$ образует требуемую волну, то есть при $\rho \rightarrow \infty$ соответствует волне, распространяющейся от источника возмущений (в рассматриваемом случае от цилиндрической скважины) на бесконечность, а слагаемое $B_n H_n^{(1)}(\rho)$ при $\rho \rightarrow \infty$ определяет волну, движущуюся в противоположном направлении (из бесконечности к источнику), и может быть использована для представления волны, приходящей из бесконечности. Таким образом, в (25) следует положить $B_n = 0$ и принять

$$R(r) = A_n \cdot H_n^{(1)}\left(\frac{\omega r}{a}\right). \quad (26)$$

Согласно (17), (19), (21) и (26) одно из возможных частных решений уравнения (7) имеет вид:

$$\varphi_n(r, \alpha, t) = A_n H_n^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) (B_1 \cos n\alpha + B_2 \sin n\alpha) (c_1 \cdot e^{i\omega t} + c_2 \cdot e^{-i\omega t}), \quad (n=0, 1, 2, \dots). \quad (27)$$

Общее однозначное и ограниченное решение уравнения (7), удовлетворяющее принципу излучения на бесконечности, представляет собой сумму всех частных решений типа (27) при $n=0, 1, 2, \dots$:

$$\varphi(r, \alpha, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n(r, \alpha, t). \quad (28)$$

Решение уравнения (8) для значения потенциала $\psi(r, \alpha, t)$ имеет аналогичное выражение с заменой константы a (скорость продольной волны) на константу b (скорость поперечной волны).

Поставим теперь задачу удовлетворить дополнительным условиям (14), (15) и (16), полагая в (27) $n=1$. Рассмотрим частные значения для скалярного и векторного потенциалов соответственно в виде:

$$\varphi(r, \alpha, t) = A H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) \cos \alpha \cdot e^{i\omega t}, \quad (29)$$

$$\psi(r, \alpha, t) = B H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right) \sin \alpha \cdot e^{i\omega t}, \quad (30)$$

где A и B – произвольные постоянные.

Вычислим согласно (9) и (10) компоненты смещений u_r и u_α . Учитывая, что [6, с.24]

$$\frac{d}{d\rho} H_1^{(2)}(\rho) = H_0^{(2)}(\rho) - \frac{1}{\rho} H_1^{(2)}(\rho), \quad \rho = \frac{\omega r}{\alpha},$$

и опуская везде далее временный множитель $e^{i\omega t}$, получаем:

$$u_r = \left\{ A \left[\frac{\omega}{a} H_0^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) - \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right)}{r} \right] + B \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right)}{r} \right\} \cos \alpha, \quad (31)$$

$$u_{\alpha} = - \left\{ A \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right)}{r} + B \left[\frac{\omega}{b} H_0^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right) - \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right)}{r} \right] \right\} \sin \alpha. \quad (32)$$

Вычислим далее согласно (11) и (12) компоненты напряжений σ_{rr} и $\sigma_{r\alpha}$.

Для значения θ в силу (1), (2) и с учетом известных соотношений векторного анализа находим:

$$\theta = \operatorname{div} \vec{u} = \operatorname{div}(\operatorname{grad} \varphi + \operatorname{rot} \vec{\psi}) = \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \Delta \varphi = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

и в силу (29) окончательно получаем:

$$\theta = -A \frac{\omega^2}{a^2} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) \cos \alpha.$$

Вычислим производную $\frac{\partial u_r}{\partial r}$. Учитывая, что [6, с.24]

$$\frac{d}{d\rho} H_0^{(2)}(\rho) = -H_1^{(2)}(\rho),$$

согласно (31) имеем:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = - \left\{ A \left[\frac{\omega^2}{a^2} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) + \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right)}{r} \right] - B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right)}{r} \right\} \cos \alpha.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -A\lambda \frac{\omega^2}{a^2} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) \cos \alpha - \\ &- 2\mu \left\{ A \left[\frac{\omega^2}{a^2} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) + \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right)}{r} \right] - B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right)}{r} \right\} \cos \alpha = \\ &= - \left\{ A\omega^2 \rho_{\text{cp}} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) + 2\mu \left[A \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right)}{r} - B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right)}{r} \right] \right\} \cos \alpha. \end{aligned} \quad (33)$$

Для вычисления значения напряжения $\sigma_{r\alpha}$, определенного согласно (12), предварительно заметим, что в случае рассматриваемого плоскополяризованного движения, $\operatorname{rot}_z \vec{u}$ имеет единственную составленную по оси Z [3, с.109]

$$\operatorname{rot}_z \vec{u} = \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial r} + \frac{u_{\alpha}}{r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial \alpha}.$$

С учетом указанного равенства выражение (12) для значения $\sigma_{r\alpha}$ представим в виде

$$\sigma_{r\alpha} = \mu \left(2 \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial r} - \operatorname{rot}_z \vec{u} \right). \quad (34)$$

В силу (1) и согласно известным соотношениям векторного анализа

$$\operatorname{rot} \vec{u} = \operatorname{rot}(\operatorname{grad} \varphi + \operatorname{rot} \vec{\psi}) = \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{\psi}.$$

С учетом условия соленоидальности $\operatorname{div} \vec{\psi} = 0$ поля $\vec{\psi}$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{\psi} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{\psi} - \Delta \vec{\psi} = -\Delta \vec{\psi}.$$

Окончательно согласно (3) и (30) находим

$$\operatorname{rot}_z \vec{u} = -\frac{1}{b^2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = B \frac{\omega^2}{a^2} H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) \sin \alpha \quad (35)$$

(по-прежнему множитель $e^{i\omega t}$ опущен).

Для значения производной $\frac{\partial u_\alpha}{\partial r}$ согласно (32) имеем:

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial r} = \left[B \frac{\omega^2}{b^2} H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) - A \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{a} \right)}{r} + B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right)}{r} \right] \sin \alpha. \quad (36)$$

В силу (34), (35), (36) для значения $\sigma_{r\alpha}$ получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_{r\alpha} &= \left\{ 2\mu \left[B \frac{\omega^2}{b^2} H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) - A \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{a} \right)}{r} + B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right)}{r} \right] - \mu B \frac{\omega^2}{b^2} H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) \right\} \sin \alpha = \\ &= \left\{ B \omega^2 \rho_{cp} H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) - 2\mu \left[A \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{a} \right)}{r} - B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right)}{r} \right] \right\} \sin \alpha. \quad (37) \end{aligned}$$

Имея выражения для компонент смещений u_r , u_α и напряжений σ_r , $\sigma_{r\alpha}$, можем обратиться к определению значений постоянных A и B в выражениях для скалярного и векторного потенциалов (29) и (30).

Согласно (14) и с учетом (31), (32) имеем:

$$A \frac{\omega}{a} H_0^{(2)} \left(\frac{\omega r_0}{a} \right) - B \frac{\omega}{b} H_0^{(2)} \left(\frac{\omega r_0}{b} \right) - 2 \left[A \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r_0}{a} \right)}{r_0} - B \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r_0}{b} \right)}{r_0} \right] = 0.$$

Выполняя в этом выражении предельный переход при $r_0 \rightarrow 0$, удерживая главные члены разложений функций

Ханкеля в окрестности нуля [7, с.180] $H_0^{(2)}(\rho) = -\frac{2i}{\pi} \cdot \ln \frac{\rho}{2} + \dots$, $H_1^{(2)}(\rho) = \frac{2i}{\pi} \cdot \frac{1}{\rho} + \dots$, получаем $-\frac{4i}{\pi \omega r_0^2} (Aa - Bb) + \dots = 0$,

где точками обозначены члены, имеющие порядок $\ln r_0$. Отсюда следует, что главным является член порядка r_0^{-2} , выписанный явно, который обязательно должен равняться нулю. Таким образом, первое уравнение для определения значений A и B имеет вид:

$$aA - bB = 0. \quad (38)$$

Условие (15) с учетом (33) и (37) сводится к виду

$$\begin{aligned} &AH_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{a} \right) \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha d\alpha + BH_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right) \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha + \\ &+ 2\mu \left[A \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{a} \right)}{r} - B \frac{d}{dr} \cdot \frac{H_1^{(2)} \left(\frac{\omega r}{b} \right)}{r} \right] \int_0^{2\pi} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) d\alpha = \frac{P_0}{\omega \rho_{cp} r_0} \end{aligned}$$

$$\text{или окончательно } AH_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) + BH_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right) = \frac{P_0}{\pi\omega^2\rho_{\text{cp}}r_0}.$$

Используя разложение функции $H_1^{(2)}(\rho)$ в окрестности нуля и сохраняя в нем главные члены при $r_0 \rightarrow 0$, из последнего равенства получаем:

$$aA + bB = -\frac{iP_0}{2\omega\rho_{\text{cp}}}. \quad (39)$$

Из уравнений (38) и (39) находим:

$$A = -\frac{iP_0}{4a\omega\rho_{\text{cp}}}, B = -\frac{iP_0}{4b\omega\rho_{\text{cp}}}. \quad (40)$$

Условие (16) выполняется тождественно относительно найденных значений A и B в силу того, что

$$\int_0^{2\pi} \sin\alpha \cdot \cos\alpha = 0.$$

Согласно (29), (30) и (40) для искоемых значений скалярного и векторного потенциалов окончательно получаем:

$$\varphi(r, \alpha, t) = -\frac{iP_0}{4a\omega\rho_{\text{cp}}} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{a}\right) \cos\alpha \cdot e^{i\omega t}, \quad (41)$$

$$\psi(r, \alpha, t) = -\frac{iP_0}{4b\omega\rho_{\text{cp}}} H_1^{(2)}\left(\frac{\omega r}{b}\right) \sin\alpha \cdot e^{i\omega t}, \quad (42)$$

где ρ_{cp} — плотность среды.

Формулы (41) и (42) совместно с (31) и (32) описывают поле смещений, возникающее в безграничной изотропно-упругой среде в результате действия сосредоточенной силы, равномерно распределенной вдоль прямой $r=0$ и меняющейся во времени по гармоническому закону. Напряжения, возникающие в среде, задаются формулами (33) и (37). 

Литература

1. Треффц, Е. Математическая теория упругости / Е. Треффц; Пер. под ред. А. И. Лурье. — Ленинград; —Москва: Гос. техн.-теоретич. изд-во, 1932 (Л.: тип. им. Бухарина). —148 с. —(Механика упругого тела; Вып. 1). —Текст: непосредственный.
2. Уайт, Д.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн / Дж. Э. Уайт; Пер. с англ. О.В. Павловой, С.В. Гольдина; Ред. Н.Н. Пузырев. —Москва: Недра, 1986. —264 с. —Текст: непосредственный.
3. Саваренский, Е.Ф. Элементы сейсмологии и сейсмометрии: [Учеб. пособие для гос. ун-тов] / Е.Ф. Саваренский, Д.П. Киринос. —2-е изд., перераб. —Москва: Гостехиздат, 1955. —544 с. —Текст: непосредственный.
4. Борисенко, А.И. Векторный анализ и начала тензорного исчисления: [Учеб. пособие для вузов] / А.И. Борисенко, И.Е. Тарапов. —6-е изд. —Харьков: Вища шк: Изд-во при Харьк. ун-те, 1986. —215 с. —Текст: непосредственный.
5. Кузнецов, Д.С. Специальные функции / Д.С. Кузнецов. —Москва: Высшая школа. —1965. —423 с. —Текст: непосредственный.
6. Коренев, Б.Г. Введение в теорию бесселевых функций / Б.Г. Коренев. —Москва: Наука. —1971. —287с. —(Физико-математическая б-ка инженера). —Текст: непосредственный.
7. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / [М. Абрамовиц, Д. Липман, А. Мак Ниш и др.]; Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган; Пер. с англ. под ред. В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной. —Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. —832 с. —Текст: непосредственный.

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЗОВ СЕРИИ 2ТЭ25К^М

Изложена методика расчета показателей безотказности оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М по результатам наработок до и между отказами в процессе эксплуатации. Апробация осуществлена на примере результатов исследования более 3000 отказов 145 тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Московской и Северо-Кавказской железных дорогах в период с 2015 по 2018 гг.



А.А. Воробьев



В.А. Карпов

Ключевые слова: надежность, показатели безотказности, тяговый подвижной состав, отказы, тепловоз серии 2ТЭ25К^М, оборудование

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_71

Начиная с 2015 года, на сети железных дорог России стали вводить в эксплуатацию двухсекционные магистральные тепловозы серии 2ТЭ25К^М производства Брянского машиностроительного завода. Поскольку новый подвижной состав должен обеспечивать требуемые технико-экономические и тягово-энергические показатели работы, то в настоящее время наибольший интерес представляет проведение анализа надежности данной серии тепловозов, как одной из самых перспективных на железных дорогах России.

В данной статье выполнена оценка показателей безотказности оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М по результатам наработок до и между отказами в процессе эксплуатации [3].

Оценка изменения технического состояния оборудования с увеличением наработки выполнена на

основе определения параметра потока отказов — показателя безотказности [1].

В данной работе принимается, что технический объект — это оборудование тепловозов серии 2ТЭ25К^М, взятое под наблюдение.

В качестве исходных данных для проведения исследования было использовано 1316 отказов 72 тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Московской железной дороге в период с 2015—2018 гг. и 2008 отказов 73 тепловозов этой же серии, эксплуатирующихся на Северо-Кавказской железной дороге за аналогичный период. Предварительно отказы разделены между собой по характеру выполняемой работы отказавшего оборудования на 25 подгрупп [5] (аккумуляторная батарея, высоковольтная камера, дизель, колесные пары, компрессор, система поддержания климата, корпус, механическая часть,

Воробьев Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность и совершенствование системы ремонта и эксплуатации тягового подвижного состава. Автор более 190 научных работ, в том числе одной монографии, двух учебников и более десяти учебных пособий.

Карпов Валерий Александрович, кандидат технических наук, начальник Приволжского центра метрологии структурного подразделения Приволжской железной дороги-филиала ОАО «РЖД». Область научных интересов: неразрушающий контроль, надёжность тягового подвижного состава, метрология. Автор шести научных работ, в том числе одного учебного пособия.

Маяков Денис Михайлович, аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность тягового подвижного состава. Автор пяти научных работ, в том числе одного учебного пособия.

мотор-вентилятор компрессора, мотор-вентилятор тягового электродвигателя, мотор-вентилятор холодильной камеры, освещение, песочная система, радио оборудование, вспомогательная электрическая цепь, электрическая цепь (РЗ), силовая электрическая цепь, система безопасности, система управления, стартер-генератор, тормозная система, турбокомпрессор, тяговый электродвигатель, тяговый генератор, холодильная камера).

Определение параметра потока отказов осуществляется на основе функции восстановления $H(t)$ – среднего числа отказов $m(t)$ одного экземпляра технического объекта за наработку t :

$$H(t) = M(m(t)), \quad (1)$$

где $m(t)$ – число отказов одного экземпляра оборудования за наработку t .

Для опытного определения $H(t)$ наблюдают за N экземплярами однотипного оборудования и фиксируют число отказов каждого из них в течение наработки t .

Зависимость $\bar{m}(t)$ представляет собой ступенчатую

линию и возрастает скачком на $\frac{1}{N}$ в момент очередного отказа [1] (рис. 1).

Оценка среднего числа отказов, приходящихся на один экземпляр рассматриваемого оборудования за наработку t , определяется следующим образом:

$$\bar{m}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t), \quad (2)$$

где $m_i(t)$ – число отказов i -го экземпляра оборудования за наработку t .

После выполнения расчетов отдельного оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М на основании

исходных данных по отказам построена статистическая зависимость $H(t)$. Величина $H(t)$ сохраняет постоянное значение в промежутке между отказами отдельных экземпляров оборудования и возрастает скачком на $\frac{1}{N}$ в момент очередного отказа.

Выполнив аппроксимацию, получаем теоретическую функцию восстановления, которая далее используется для определения функции параметра потока отказов (рис. 2, 3).

По функции восстановления определяется параметр потока отказов технического оборудования [1]:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}, \quad (3)$$

который характеризует изменение скорости появления числа отказов при увеличении наработки.

Статистическая оценка параметра потока отказов в интервалах наработки оборудования Δt имеет вид:

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t}, \quad (4)$$

где Δm – число отказов рассматриваемого оборудования в интервале Δt .

Результат вычисления расчетной функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М Московской железной дороги представлен в табл. 1 и Северо-Кавказской железной дороги – в табл. 2.

Данные, полученные на основании вычисления статистической функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М Московской железной дороги и Северо-Кавказской железной дороги, представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

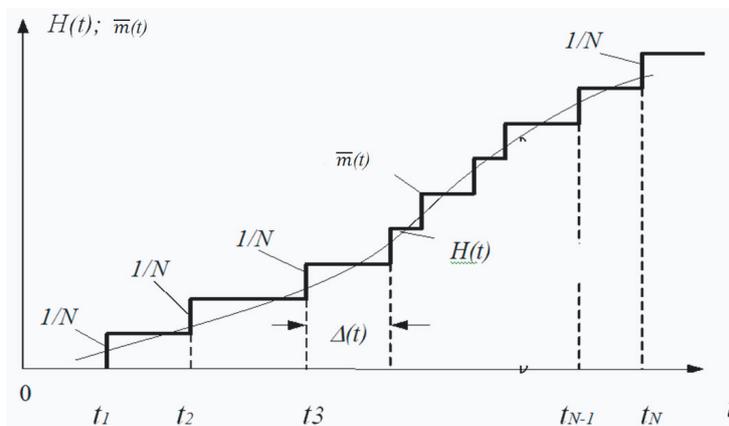


Рис. 1. Функция восстановления

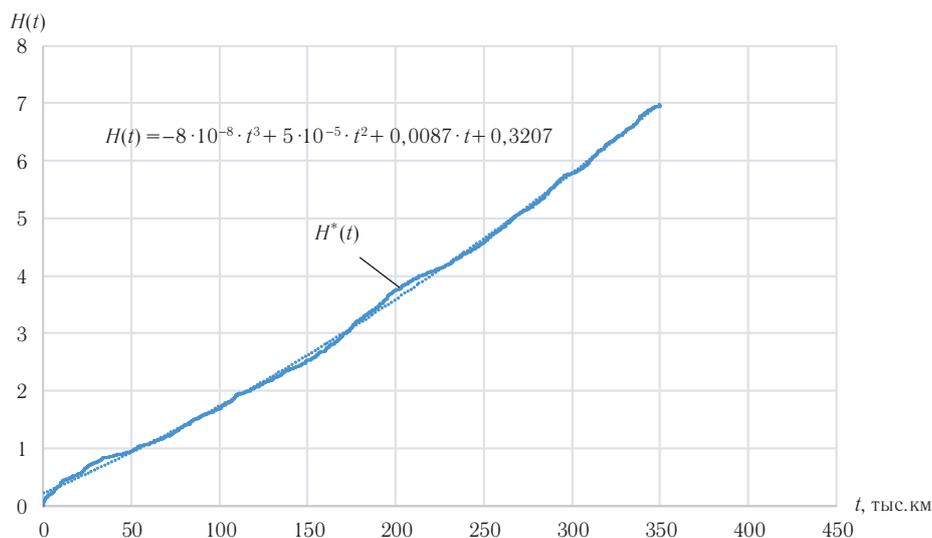


Рис. 2. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Московской железной дороге

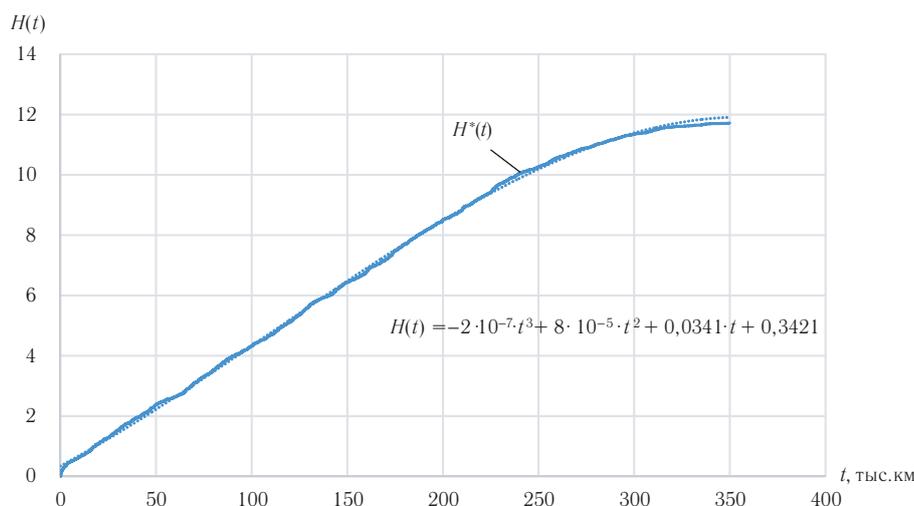


Рис. 3. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Северо-Кавказской железной дороге

На основании полученных данных формируется столбчатая диаграмма в соответствии с полученным расчетом статистической функции параметра потока отказов $\omega_i^*(t)$ оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М, а также одновременно на общую координатную плоскость наносится и расчетная $\omega(t)$ для Московской железной дороги (рис. 4) и для Северо-Кавказской железной дороги (рис. 5).

Исходя из структуры и вида графика функции восстановления, представленных на рис. 1,2, можно сделать вывод, что число экземпляров отказавшего оборудования с увеличением наработки на

Северо-Кавказской железной дороге выше, чем на Московской железной дороге. Тем не менее, скорость накопления отказов с увеличением наработки на Северо-Кавказской дороге падает, что нельзя сказать для Московской железной дороги. Также это можно проследить на графиках функции параметра потока отказов оборудования, изображенных на рис. 4,5.

Полученные результаты и зависимости позволят рассчитать целесообразные сроки восстановления и замены оборудования тепловозов, рациональные межремонтные пробеги с учетом фактических условий эксплуатации на железной дорог.

Таблица 1

Результат вычисления расчетной функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М Московской железной дороги

t , тыс. км	$\omega(t)$, 1/тыс. км
0	0,0133000
50	0,0152925
100	0,0172700
150	0,0192325
200	0,0211800
250	0,0231125
300	0,0250300
350	0,0269325

Таблица 2

Результат вычисления расчетной функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М Северо-Кавказской железной дороги

t , тыс. км	$\omega(t)$, 1/тыс. км
0	0,0341
50	0,0406
100	0,0441
150	0,0446
200	0,0421
250	0,0366
300	0,0281
350	0,0166

Таблица 3

Результат вычисления статистической функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М Московской железной дороги

Интервал t , тыс. км	Количество типов оборудования	Количество оборудования	N	Δt	Δm	ω_i^* , 1/тыс. км
0–50	22	4752	216	50	165	0,0153
50–100	20	4608	230	50	131	0,0114
100–150	20	5184	259	50	136	0,0105
150–200	26	5272	203	50	200	0,0197
200–250	20	4464	223	50	153	0,0137
250–300	24	4984	208	50	202	0,0195
300–350	25	5128	205	50	222	0,0216

Таблица 4

Результат вычисления статистической функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М для Северо-Кавказской железной дороги

Интервал t , тыс. км	Количество типов оборудования	Количество оборудования	N	Δt	Δm	ω_i^* , 1/тыс. км
0–50	23	5402	235	50	405	0,0345
50–100	27	6132	227	50	344	0,0303
100–150	24	5546	231	50	389	0,0337
150–200	23	5254	228	50	360	0,0315
200–250	21	5110	243	50	288	0,0237
250–300	22	5256	239	50	178	0,0149
300–350	18	4088	227	50	59	0,0052

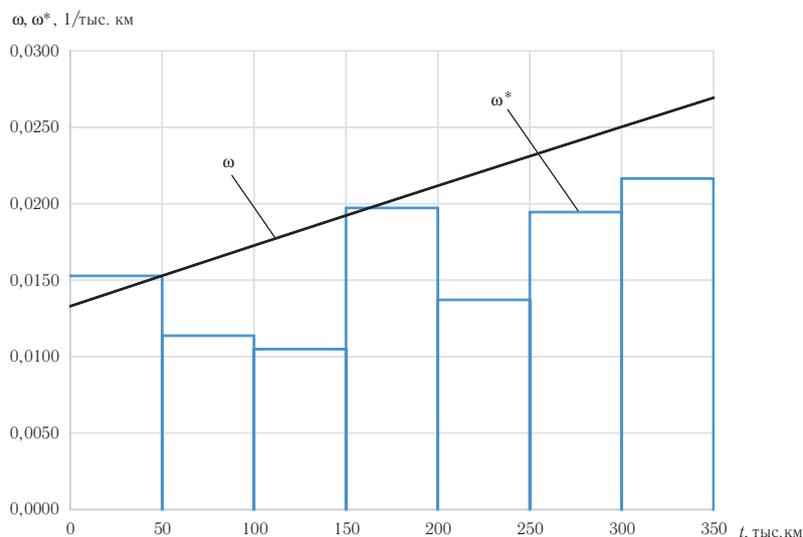


Рис. 4. Расчетная и статистическая функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Московской железной дороге

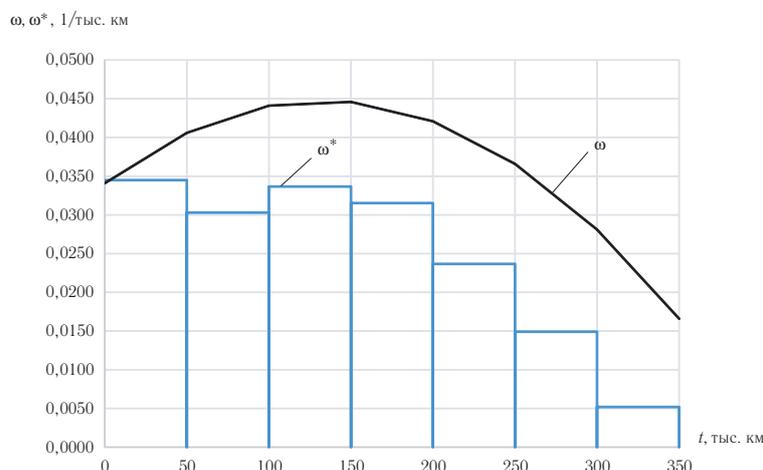


Рис. 5. Расчетная и статистическая функции параметра потока отказов оборудования тепловозов серии 2ТЭ25К^М, эксплуатирующихся на Северо-Кавказской железной дороге

Литература

1. Надежность подвижного состава / А.А. Воробьев, В.А. Четвергов, С.В. Шевцов [и др.]. – Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 301 с. – ISBN 978-5-89035-978-0. – Текст: непосредственный.
2. Воробьев, А.А. Определение ресурса узлов и деталей тягового подвижного состава по усеченной выборке наработок на отказ / А.А. Воробьев, Р.А. Постников. – Текст: непосредственный // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: труды III научно-практической конференции. – Москва: МИИТ, 2000. – С.89–93.
3. ГОСТ 27.002-2013. Надежность в технике. Термины и определения = Dependability in technics. Terms and definitions: межгосударственный стандарт: издание официальное: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 декабря 2015 г. № 83-П): дата введения 2017-03-01: разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Институт надежности машин и технологий» (ООН «ИНМиТ»). – Москва: Стандартиформ, 2016. – 23 с.
4. Лакин, И.К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников. – Текст: непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1. – С. 20–29.
5. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25К^М. Руководство по эксплуатации / В.Ю. Гусев [и др.]. В 4 частях, 2015. – 542 с. – Текст: непосредственный.

СОСТОЯНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ЭКРАННОЙ СРЕДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ АМФИБИИ

В статье впервые выдвигается и обосновывается гипотеза о характеристиках экранной среды, знание которых позволяет более осознанно проектировать высокоскоростные амфибии (ВСА) и на этой основе оптимизировать конструктивные особенности экраноплана.

Ключевые слова: высокоскоростные амфибии, экранная среда, подстилающая поверхность, конденсированная среда

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_77



Д.Г. Евсеев



А.В. Коробкин

Существующие традиционные виды транспортных средств и, как следствие, традиционные виды транспорта (наземный, воздушный, водный) в настоящее время достигли практического предела своего технического развития и становятся в определенной степени тормозом развития экономики.

Они не отвечают современным требованиям, предъявляемым к ним для решения основной государственной задачи – обеспечения транспортной доступности населения и хозяйствующих субъектов РФ, особенно в регионах с малой плотностью населения и суровыми климатическими условиями.

В настоящее время фактически разработан новый вид транспорта на основе высокоскоростных амфибийных средств – высокоскоростной амфибийный транспорт (далее ВСА транспорт).

Высокоскоростные амфибии (ВСА) – многорежимные транспортные средства, способные осу-

ществлять движение в двух или более средах на эксплуатационных скоростях более 22 узлов (40 км/ч), использующие экранный эффект.

К ВСА в настоящее время относятся суда на воздушной подушке, транспортно-амфибийные платформы, экранопланы, непосредственно ВСА и другие транспортные средства, отвечающие определению. При этом наиболее универсальные ВСА на данное время способны реализовать пять режимов движения:

1. Наземный (режим аэросаней).
2. Плавания.
3. Глиссирования.
4. Движения на экране.
5. Движения вне экрана (самолетный).

Эксплуатационные режимы движения основаны на использовании аэродинамических сил и экранного эффекта. Экранный режим движения – основной экс-

Евсеев Дмитрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: транспортное машиностроение, технология производства и ремонта подвижного состава. Автор более 250 научных работ, в том числе трех учебников, пяти монографий. Имеет более 40 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Коробкин Александр Васильевич, директор научно-образовательного центра «Высокоскоростной амфибийный транспорт», летчик-испытатель экранопланов. Область научных интересов: теория и практика высокоскоростного амфибийного транспорта, проектирование и испытание экранопланов. Автор пяти научных работ.

плутационный режим для ВСА — является наиболее экономичным, он создается образованием экранной среды, т.е. среды, возникающей между нижними поверхностями ВСА и подстилающей поверхностью, на этой среде ВСА и движется.

Природа экранной среды до настоящего времени исследована весьма поверхностно, хотя именно от характеристик экранной среды зависит возможность более осознанного проектирования ВСА, создания наиболее эффективных систем управления экранной средой и на этой основе оптимизации конструктивных особенностей экраноплана.

До настоящего времени понимание физики экранной среды, расчетов устойчивости и управляемости аппарата, движущегося на экране, основано на классических работах Н.Е. Жуковского [1] по теоретической и практической аэро- и гидродинамике. Однако выяснилось, что на практике эти расчеты в значительной мере не соответствовали реальности из-за принятых им допущений, которые не дают возможности понять физику возникновения подъемной силы и не позволяют реально прогнозировать движение ВСА и проведение необходимых расчетов при проектировании и постройке ВСА. На это в своих работах и практических исследованиях указал Г.И. Карачевский [2;3], отметив, что эти допущения не могут соответствовать реальным аэродинамическим процессам именно из-за существенных особенностей структуры и физических свойств воздуха.

В этой связи нами предпринята попытка пересмотреть отношение к применению теории Н.Е. Жуковского [1] по теоретической и практической аэродинамике и гидродинамике применительно к изделиям, выполняющим движение на экране. Большой опыт А.В. Коробкина по многочисленным испытаниям экранопланов разных видов и модификаций, а также теоретические работы и практические исследования

ученых, имеющих отношение к данной тематике, позволил выработать гипотезу о сущности экранной среды и ее возникновении. Предполагается, что экранная среда — это воздушная среда в агрегатном (конденсированном) состоянии, отличном от состояния обычного воздуха.

Эта среда заключена в определенной зоне. Под зоной экранной среды понимается геометрическое объемное пространство, ограниченное высотой движения всей нижней поверхности аппарата в плане и подстилающей поверхностью (рис. 1,2).

Среда представляет собой совокупность множества присоединенных вихрей, состоящих из молекул воздуха, взаимодействующих между собой.

При этом среда уплотняется за счет вихревого движения молекул и взаимодействия их друг с другом при достижении расстояния между молекулами менее 3–6 диаметров, выделяется фонон энергии, который еще с большей скоростью закручивает вихри, уплотняя среду, в результате этого среда фазовым скачком переходит в другое агрегатное (конденсированное) состояние. При этом распространение экранной среды ограничено исключительно зоной экранной среды. В любой точке зоны экранной среды значения основных параметров (температура, плотность, скорость прохождения и потеря мощности звуковых волн и т.д.) одинакова.

Здесь мы должны отметить коренные отличия в подходах к возникновению экрана нашей гипотезы от теории Н.Е. Жуковского по теоретической и практической аэродинамике и гидродинамике.

В нашем случае совершенно необходимо учитывать межмолекулярное взаимодействие молекул воздуха. При движении на экране за счет набегания на воздушные массы нижней поверхностью ВСА, в замкнутом пространстве между нижней и верхними поверхностями экранов оказывается значительное количество

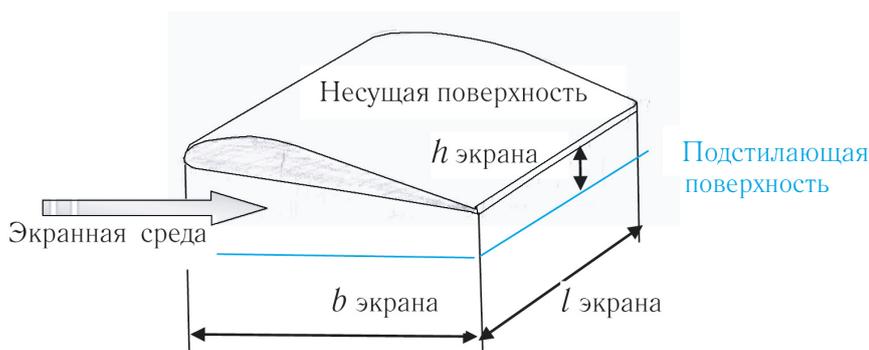


Рис. 1. Геометрическая схема экранной среды

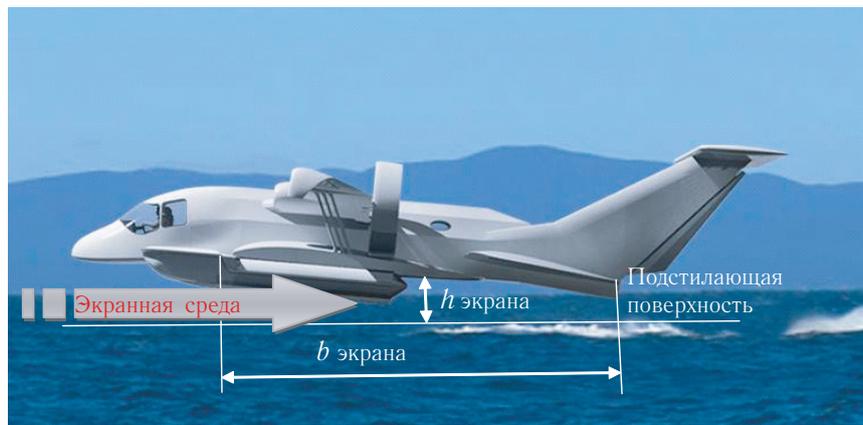


Рис. 2. Художественная схема экранной среды

молекул воздуха, которому дополнительно придается вращательное движение за счет энергии передаваемой нижней поверхностью ВСА. При достижении определенного значения количества молекул в зоне экранной среды и придании им направленного движения они взаимодействуют друг с другом с разными по энергии силами — это силы Ван-дер-Ваальса, водородная связь, химическая связь и др. Такое взаимодействие определяет конденсированное состояние вещества.

Конденсированное состояние вещества характеризуется структурой непрерывных зон энергии конденсированной фазы, а также уровнями энергии примесей и структурных дефектов.

В конденсированном состоянии вещества каждая молекула испытывает постоянное воздействие со стороны других молекул.

Наши выводы подтверждаются рядом открытий в области конденсированных сред, за которые Нобелевская премия по физике за 2016 г. присуждена Майклу Костерлицу, Дэвиду Таулессу и Данкану Холдейну с формулировкой «за теоретические открытия топологических фазовых переходов и топологических фаз материи».

Основной задачей теории конденсированного состояния вещества является описание качественного своеобразия различных форм и видов этого состояния, а также их количественного анализа посредством как экспериментальных, так и теоретических средств исследования. Объекты, обычно изучаемые в теории конденсированного состояния, представляют собой макроскопические тела, состоящие из очень большого числа взаимодействующих друг с другом микрочастиц $N \sim N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ (N_A — число Авогадро) с концентрациями $n \sim N_L = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ (N_L — число

Лошмидта). Микрочастицы — это нейтральные атомы или молекулы, заряженные электроны или ионы и т.п.; обладают квантовой природой.

Сложность исследования конденсированного состояния вещества обусловлена тем, что в конденсированном состоянии среднее расстояние между частицами мало. Это приводит к необходимости учитывать взаимодействие между частицами — как прямое, или динамическое, так и косвенное, или обменное — не как малую поправку, а как основной фактор, определяющий существенные физические свойства конденсированного тела.

В ряде случаев необходимо также учитывать наличие у каждой из частиц — атомов, молекул, ионов — достаточно сложной внутренней структуры, обусловленной наличием электронной и ядерной подсистем.

Вышесказанное подтверждается работами Н.Б. Брандта, В.А. Кульбачинского [4].

В настоящей работе показана ограниченность современной классической теории газов. Данные ограничения присущи не только теории идеальных газов, но в не меньшей степени относятся и к так называемой теории реальных газов. Недостатки современных теорий газов сосредоточены в двух пунктах. Во-первых, что касается сил молекулярного взаимодействия — если в молекулярно-кинетической теории они полностью отрицаются, то в теории Ван-дер-Ваальса их наличие признается, но считается, что действуют они исключительно на малых расстояниях. Показано, что силы межмолекулярного взаимодействия в газах действуют вплоть до состояния вакуума и должны учитываться. Второй момент касается взаимодействия молекул с тепловыми фотонами, которые излучают атомы при любых температурах выше абсолютного нуля. В современных теориях газов вза-

имодействие фотонов и молекул никак не отражается. Показано, что фотоны играют существенную роль. На основании предъявленных доказательств предложена новая теория строения газов, суть которой в том, что строение газов аналогично строению жидкостей. И в газах действуют законы, аналогичные законам гидростатики.

Нами теоретически доказана возможность практического проведения замеров значений состояния экранной среды акустическим методом и ведется работа по открытию соответствующей НИОКР для проведения практических замеров с использованием имеющихся систем (приборов), а также создания принципиально новых приборов замера величины непосредственного энергетического состояния среды. В настоящее время мы с трудом понимаем, что будет представлять из себя эта величина, в чем она будет измеряться и каким образом она станет скалярным показателем объяснения физики состояния экранной среды.

Но сейчас становится четко понятно, что без введения нового понятия величины определения энергетического состояния экранной среды дальнейшее понимание ее физики крайне затруднено.

Из вышесказанного можно сделать выводы:

1. Понятие конденсированного состояния в современном смысле объединяет практически все виды

упорядочения в физических объектах, которые становятся возможными при достаточном сближении микрочастиц макроскопического объекта друг с другом: именно при этом условии могут проявиться как прямые динамические взаимодействия, так и косвенные обменные, обусловленные квантовой природой микрочастиц и их свойств.

2. Экранная среда может являться разновидностью конденсированных сред.

3. Можем предположить, что экранная среда по своим характеристикам и свойствам аналогична строению жидкостей, но находится в агрегатном состоянии, внешне похожим на воздушную среду. Подходы к конструированию, производству расчетов устойчивости и управляемости, предполагается, должны быть аналогичными подходам к законам гидростатики.

4. Замеры характеристик состояния экранной среды могут быть осуществлены практически теми же средствами акустических замеров, как и замеров в жидкой среде.

5. Получение исходных данных состояния экранной среды позволит создать транспортные средства на совершенно новых принципах организации движения и даст толчок развитию науки, техники и технологий в этой области. 

Литература

1. Жуковский, Н.Е., Полное собрание сочинений/ Н.Е. Жуковский; под редакцией профессора А.П. Котельникова. Т.V: Вихри. Теория крыла. Авиация. — Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР; Главная редакция авиационной литературы. — 1937. — 490 с. — Текст: непосредственный.
2. Карачевский, Г.И. Аэродинамика за порогом «классики»/ Г.И. Карачевский// Авиация и космонавтика. — 1992. — №9, — С. 6—7. — Текст: непосредственный.
3. Карачевский, Г.И. Аэродинамика. Физические основы подъемной силы и аэродинамического сопротивления материальных тел: монография /Г.И. Карачевский. — Москва, 2010. — 158 с. — ISBN 978-5-901-675-97-7. — Текст: непосредственный.
4. Брандт, Н.Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния/ Н.Б. Брандт, В.А. Кульбачинский. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: Физматиздат, 2016. — 631 с. — ISBN 978-5-9221-1209-3. — Текст: непосредственный.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЕЗДНЫХ ЕДИНИЦ

В данной статье рассматривается определение потребного количества поездных единиц на конкретном участке железной дороги с учетом предпочтений пассажиров и стоимостных оценок поездов методом парных сравнений. Используемый метод базируется на теории нечетких множеств и дает возможность переключиться к общей шкале измерений с сохранением значений критериев.



Е.А. Середов

Ключевые слова: поездная единица, метод парных сравнений, нечеткие множества

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_81

Пассажирские перевозки играют весомую роль в обеспечении жизнедеятельности общества. Установление потребного количества поездных единиц на участке железной дороги должно определяться не только с учетом освоения расчетного пассажиропотока, но и с учетом предпочтений пассажиров. Зачастую, при большом количестве поездных единиц, возникает проблема выбора «наилучшей» в связи с тем, что поездные единицы характеризуются различным комплексом нередко неоднозначных критериев [1].

Использование метода парных сравнений позволит ранжировать поездные единицы в порядке предпочтения и установить потребное их количество на рассматриваемом участке железной дороги.

Пример использования метода парных сравнений для выбора потребного количества поездных единиц

Исходные данные: расчетный участок, мощность струй пассажиропотоков Π_i , маршруты следования

поездных назначений x_j , период отправления поездов (утро, день, вечер, ночь), стоимостные оценки поездов E_j и время следования между пунктами $t_{сд}$. Исходные данные представлены на рис. 1.

Необходимо определить оптимальное число поездных единиц каждого поездного назначения (x_j) с учетом стоимостных оценок поездов и предпочтений пассажиров с учетом обеспечения беспересадочного сообщения.

В зависимости от периода суток (утро, день, вечер, ночь), группой экспертов определены весовые коэффициенты «предпочтения» каждой поездной единицы. Результаты экспертных оценок сведены в табл. 1.

Далее в зависимости от мощности пассажиропотока определены весовые коэффициенты струй (табл. 2).

Дроби в клетках показывают превосходство одного элемента по сравнению с другим. Здесь использовалось понятие «быть лучше в n раз», что также допустимо [2]. Нормируемая сумма получена путем деления суммы каждой строки на общую сумму столбца «Сумма по строке», т.е. на 121,39.

Середов Евгений Александрович, ассистент кафедры «Железнодорожные станции и транспортные узлы» Института управления и цифровых технологий Российского университета транспорта (ИУЦТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: транспорт. Автор шести научных работ.

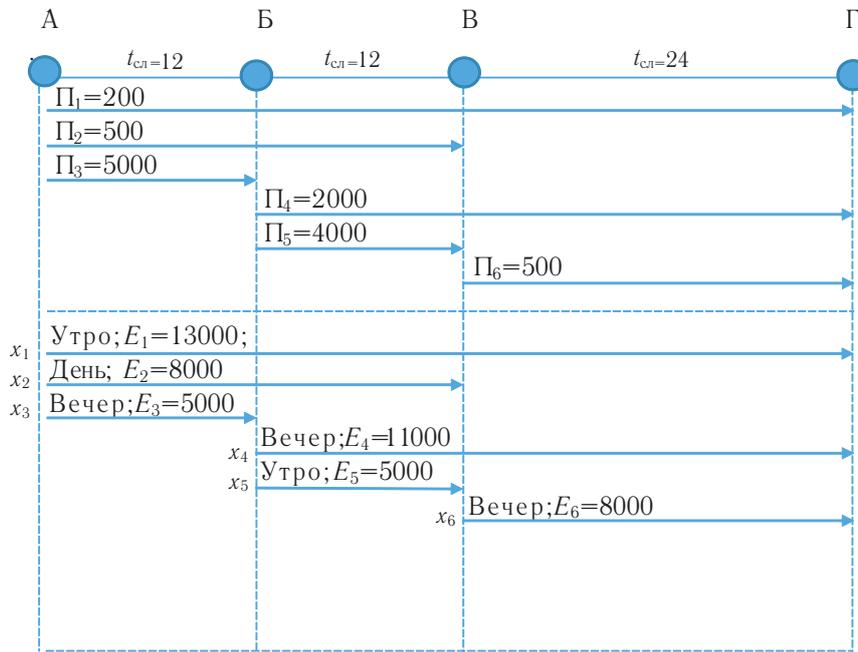


Рис. 1. Исходные данные для примера

Таблица 1

Результаты экспертных оценок поездных единиц

	А–Г	А–В	А–Б	Б–Г	Б–В	В–Г
x_1	1	0,71	0,2	0,5	0,37	0,36
x_2	–	0,29	0,13	–	0,11	–
x_3	–	–	0,67	–	–	–
x_4	–	–	–	0,5	0,37	0,36
x_5	–	–	–	–	0,15	–
x_6	–	–	–	–	–	0,28

Элементы матрицы M_z определяющей предпочтения поездных единиц, будут определяться по формуле [3]:

$$M_z = MA, \quad (1)$$

где A – матрица коэффициентов важности критериев; M – матрица значений функций принадлежности [4].

Максимальное значение функции принадлежности будет принадлежать «предпочтительной» поездной единице.

Следовательно, имеем:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0,71 & 0,2 & 0,5 & 0,37 & 0,36 \\ 0 & 0,29 & 0,13 & 0 & 0,11 & 0 \\ 0 & 0 & 0,67 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0,37 & 0,36 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,15 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,28 \end{bmatrix}$$

$$A = [0,016 \ 0,041 \ 0,410 \ 0,164 \ 0,328 \ 0,041].$$

Используя формулу (1), получаем матрицу элементов:

Таблица 2

**Результат определения весовых коэффициентов струй
в зависимости от мощности пассажиропотока**

	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₅	П ₆	Сумма по строке	Нормируемая сумма
П ₁	1	0,4 (200/500)	0,04 (200/5000)	0,1 (200/2000)	0,05 (200/4000)	0,4 (200/500)	1,99	0,016
П ₂	2,5 (500/200)	1	0,1 (500/5000)	0,25 (500/2000)	0,125 (500/4000)	1 (500/500)	4,975	0,041
П ₃	25 (5000/200)	10 (5000/500)	1	2,5 (5000/2000)	1,25 (5000/4000)	10 (5000/500)	49,75	0,410
П ₄	10 (2000/200)	4 (2000/500)	0,4 (2000/500)	1	0,5 (2000/4000)	4 (2000/500)	19,9	0,164
П ₅	20 (4000/200)	8 (4000/500)	0,8 (4000/5000)	2 (4000/2000)	1	8 (4000/500)	39,8	0,328
П ₆	2,5 (500/200)	1 (500/500)	0,1 (500/5000)	0,25 (500/2000)	0,125 (500/4000)	1	4,975	0,041
Общая сумма:							121,39	1

$$M = \begin{bmatrix} 0,345 \\ 0,101 \\ 0,275 \\ 0,218 \\ 0,049 \\ 0,011 \end{bmatrix}.$$

$$M = \begin{bmatrix} 0,220 \\ 0,127 \\ 0,260 \\ 0,164 \\ 0,147 \\ 0,082 \end{bmatrix}.$$

Далее определяются весовые коэффициенты оценки стоимости поездных единиц. Результат оценки приведен в табл. 3.

Следовательно, учитывая равнозначно предпочтение пассажиров и стоимостные оценки поездных единиц, имеем:

$$M = \begin{bmatrix} 0,345 & 0,094 \\ 0,101 & 0,153 \\ 0,275 & 0,245 \\ 0,218 & 0,110 \\ 0,049 & 0,245 \\ 0,011 & 0,153 \end{bmatrix}$$

$$A = [0,5 \quad 0,5].$$

Используя формулу (1), получаем матрицу элементов:

Таким образом, применяя метод парных сравнений можно утверждать, что «предпочтительной» следует считать поездную единицу a_1 .

Принимая вместимость каждой поездной единицы 700 человек, определим требуемое число поездов на каждом участке. Данные сведены в табл. 4.

Учитывая матрицу элементов определяем требуемое число поездных единиц каждого поездного назначения. Очередность определения количества поездных единиц одного назначения устанавливается в зависимости от густоты пассажиропотока на участке. Наибольшее количество пассажиропотока наблюдается на участке Б–В.

Участок Б–В

Поездные назначения в порядке предпочтения:

x_1 (0,220)

x_2 (0,127)

x_4 (0,164)

x_5 (0,147)

Нормируем поездные единицы поездных назначений так, чтобы их сумма равнялась 1:

x_1 (0,334)

x_2 (0,193)

Таблица 3

**Результат определения коэффициентов важности критерия
в зависимости от стоимостных оценок поездных единиц**

	П ₁	П ₂	П ₃	П ₄	П ₅	П ₆	Сумма по строке	Нормируемая сумма
П ₁	1	0,615 (8000/13000)	0,385 (5000/13000)	0,846 (11000/13000)	0,385 (5000/13000)	0,615 (8000/13000)	3,846	0,094
П ₂	1,625 (13000/8000)	1	0,625 (5000/8000)	1,375 (11000/8000)	0,625 (5000/8000)	1	6,25	0,153
П ₃	2,6 (13000/5000)	1,6 (8000/5000)	1	2,2 (11000/5000)	1	1,6 (8000/5000)	10	0,245
П ₄	1,18 (13000/11000)	0,73 (8000/11000)	0,45 (5000/11000)	1	0,45 (5000/11000)	0,73 (8000/11000)	4,54	0,110
П ₅	2,6 (13000/5000)	1,6 (8000/5000)	1	2,2 (11000/5000)	1	1,6 (8000/5000)	10	0,245
П ₆	1,625 (13000/8000)	1	0,625 (5000/8000)	1,375 (11000/8000)	0,625 (5000/8000)	1	6,25	0,153
Общая сумма:							40,886	1

Таблица 4

Результат определения требуемого количества поездных единиц

Участок	Пассажиропоток на участке	Вместимость каждой поездной единицы	Требуемое число поездных единиц
А–Б	5700	700	9
Б–В	6700	700	10
В–Г	2700	700	4

x_4 (0,249)

x_5 (0,224)

Учитывая долю каждого поездного назначения в порядке предпочтения, определим требуемое число поездов на участке:

$0,334 \cdot 10 = 3,34$. Принимаем 3 поездные единицы поездного назначения x_1

$0,193 \cdot 10 = 1,93$. Принимаем 2 поездные единицы поездного назначения x_2

$0,249 \cdot 10 = 2,49$. Принимаем 3 поездные единицы поездного назначения x_4

$0,224 \cdot 10 = 2,23$. Принимаем 2 поездные единицы поездного назначения x_5

После участка Б–В наибольшее количество пассажиропотока наблюдается на участке А–Б.

Участок А–Б

Поездные назначения в порядке предпочтения:

x_1 (0,220)

x_2 (0,127)

x_3 (0,260)

Нормируем поездные единицы поездных назначений так, чтобы их сумма равнялась 1:

x_1 (0,362)

x_2 (0,210)

x_3 (0,428)

Учитывая долю каждого поездного назначения в порядке предпочтения, определим требуемое число поездов на участке:

$0,362 \cdot 9 = 3,258$. Принимаем 3 поездные единицы поездного назначения x_1 . Количество поездных единиц x_1 на участке А–Б совпадает с количеством поездных единиц x_1 на участке Б–В. Перерасчет результатов не требуется.

$0,210 \cdot 9 = 1,89$. Принимаем 2 поездные единицы поездного назначения x_2 . Количество поездных единиц x_2 на участке А–Б совпадает с количеством поездных единиц x_2 на участке Б–В. Перерасчет результатов не требуется.

$0,428 \cdot 9 = 3,852$. Принимаем 4 поездные единицы поездного назначения x_3 .

Далее требуется определить число поездных единиц на участке В–Г.

Участок В–Г

Поездные назначения в порядке предпочтения:

x_1 (0,220)

x_4 (0,164)

x_6 (0,082)

Нормируем поездные единицы поездных назначений так, чтобы их сумма равнялась 1:

x_1 (0,47)

x_4 (0,35)

x_6 (0,18)

Учитывая долю каждого поездного назначения в порядке предпочтения, определим требуемое число поездов на участке:

$0,47 \cdot 4 = 1,88$. Принимаем 2 поездные единицы поездного назначения x_1 . Количество поездных единиц x_1 на участке В–Г не совпадает с количеством поездных единиц x_1 на участках Б–В и А–Б. В связи с этим, принимаем 3 поездные единицы назначения x_1 .

$0,35 \cdot 4 = 1,4$. Принимаем 2 поездные единицы поездного назначения x_4 . Количество поездных единиц x_4

на участке В–Г не совпадает с количеством поездных единиц x_4 на участке Б–В. В связи с этим, принимаем 3 поездные единицы назначения x_4 .

$0,082 \cdot 4 = 0,328$. Принимаем 0 поездных единиц назначения x_6 .

Результат определения требуемого количества поездных единиц на рассматриваемом участке представлен на рис. 2.

Показатели поездных единиц расчетного участка представлены в табл. 5

Выводы

По результатам выполненной работы, с учетом изученных работ [5–10], было определено требуемое количество поездных единиц на рассматриваемом участке железной дороги с учетом предпочтений пассажиров и стоимостных оценок поездов. Используемый при этом метод позволил получить большое количество сравнений поездных единиц между собой и, таким образом, повысить точность оценки поездных единиц при определении требуемого их количества. 

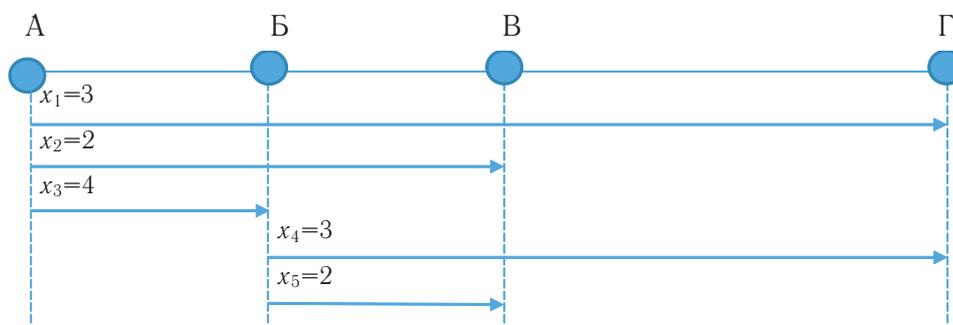


Рис. 2. Результат определения требуемого количества поездных единиц на рассматриваемом участке железной дороги

Таблица 5

Показатели поездных единиц расчетного участка

Участок	Пассажиропоток на участке	Вместимость каждой поездной единицы	Требуемое число поездов	Общая вместимость всех поездных единиц	Коэффициент населенности поездных единиц
А–Б	5700	700	9	6300	0,90
Б–В	6700	700	10	7000	0,96
В–Г	2700	700	6	4200	0,64

Литература

1. Перегудов, Ф.И. Основы системного анализа: Учебник / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – 2-е изд., доп. – Томск: Изд-во НТЛ, 1997. – 396 с. – ISBN 5-89503-004-1. – Текст: непосредственный.
2. Саати, Томас Л. Принятие решений: Метод анализа иерархий / Т. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва: Радио и связь, 1993. – 315 с. – ISBN 5-256-00443-3. – Текст: непосредственный.
3. Саати, Томас Л. Математические модели конфликтных ситуаций / Томас Л. Саати; пер. с англ. В.Н. Веселова и Г.Б. Рубальского; под ред. [и с предисл.] И.А. Ушакова. – Москва: Сов. радио, 1977. – 302 с. – Текст: непосредственный.
4. Оптимизационная модель деятельности управляющей компании / В.П. Грахов, Ю.Г. Кислякова, О.Л. Симченко [и др.]. – Текст: непосредственный // Вестник Челябинского государственного университета. Вып. 64. – 2019. – № 3 (425). – С. 168–176.
5. Пазойский, Ю.О. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте (примеры, задачи, модели, методы и решения): учебное пособие / Ю.О. Пазойский, В.Г. Шубко, С.П. Вакуленко. – Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 364 с. – ISBN 978-5-89035-913-1. – Текст: непосредственный.
6. Кочнев, Ф.П. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Ф.П. Кочнев. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1980. – 496 с. – Текст: непосредственный.
7. Пазойский, Ю.О. Математическая модель установления функции спроса пассажиров на перевозки в дальнем сообщении / Ю.О. Пазойский, Д.В. Глазков. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 6. – С. 39–41.
8. Левин, Д.Ю. Пути освоения перспективных пассажиропотоков / Д. Ю. Левин, В.И. Лукашев. – Текст: непосредственный // Прогрессивная организация, техника и технология пассажирских перевозок: сборник научных трудов. Труды ВНИИЖТ; под ред. Б.Е. Марчука. – Москва: Транспорт, 1984. – С. 125–142.
9. Панова, О.Н. План формирования пассажирских поездов при условии удовлетворения спроса на категории мест: специальность 05.22.08: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Панова Ольга Николаевна; Моск. гос. ун-т путей сообщ. МПС РФ. – Москва, 2001. – 174 с. – Текст: непосредственный.
10. Пути освоения пассажиропотоков на перспективу / НТО ж.-д. трансп.; [Подгот. В.И. Лукашев и др.]. – Москва: Транспорт, 1985. – 40 с. – Текст: непосредственный.

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД В ОБУЧЕНИИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА ГОРОДСКИХ РЕЛЬСОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Основу перехода к сценарному подходу составляет концепция управления движением с применением ситуационного управления. Приведена классификация параметров ситуационного подхода применительно к линии метрополитена. Рассмотрен сценарный подход в обучении оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем на примере метрополитена. Представлена и описана на примере методология разработки сценариев обучения оперативного персонала.



Е.П. Балакина



Л.А. Баранов

Ключевые слова: обучающие тренажеры, обучение оперативного персонала, ситуационное управление, сценарии обучения

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_87

В настоящее время особое внимание уделяется совершенствованию профессиональных навыков во всех областях деятельности человека [1], в том числе в области оперативного управления движением городских рельсовых транспортных систем. Применение тренажерно-обучающих систем в обучении оперативного персонала позволяют визуализировать процесс проведения тренировочных занятий, максимально приближая его к реальным процессам управления движением [2–6]. В основе тренажерно-обучающих систем лежат подробные многофункциональные модели, реализующие моделирование работы всех объектов и процессов транспортной системы [7]. При применении электронного обучения широко

распространен сценарный подход, направленный на закрепление теоретических и практических навыков. Данная статья посвящена использованию сценарного подхода в обучении оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем.

Ситуационный подход в управлении линией метрополитена при возникновении сбоев движения

Управление линией метрополитена является ответственной задачей, решение которой напрямую зависит от правильности и своевременности команд поездного диспетчера и слаженности работы всех служб метрополитена и работников линии. Одним из наи-

Балакина Екатерина Петровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория автоматического управления, управление и планирование движения поездов, оценка качества управления движением поездов, обучение оперативных работников транспортных систем. Автор более 50 научных работ.

Баранов Леонид Аврамович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), Заслуженный деятель науки Российской Федерации. Область научных интересов: автоматизированное и автоматическое управление. Автор более 400 научных и учебно-методических работ, в том числе восьми монографий, трех учебников и трех учебных пособий. Имеет 35 авторских свидетельств на изобретения.

Сидоренко Валентина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: теория автоматического управления, управление и планирование движения транспортных средств, оценка качества управления движением транспортных средств, планирование работы и обучение оперативных работников транспортных систем. Автор более 180 научных работ.

более сложных технологических процессов при этом является управление движением при возникновении отклонений от планового графика, при этом организация движения и методы управления линией метрополитена напрямую зависят от ситуации, которая в данный момент характеризует линию. Таким образом, работа диспетчера реализуется с использованием системного и ситуационного мышления. Действия диспетчера при этом напрямую зависят от нештатной ситуации или их совокупности и определяются «Инструкцией по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах».

Концепция управления с применением ситуационного подхода является наиболее эффективной при организации управления линией, т.к. позволяет применять конкретные принципы работы к определенным ситуациям с учетом конкретного набора обстоятельств, влияющих на организацию движения.

Ситуационный подход в управлении движением поездов предполагает:

1. Выполнение анализа ситуации с целью выявления требований, предъявляемых к организации движения.

2. Принятие решения с учетом требований по организации движения и ситуацией.

3. Прогнозирование вероятностных последствий от применяемых действий.

В ситуационном подходе ситуации идентифицируются различными значениями переменных, характеризующих определенную ситуацию. Переменные делятся на внутренние и внешние.

Внутренние переменные представляют собой ситуационные факторы, полученные как результат управленческих решений. Сюда относятся, например, команды, выдаваемые поездным диспетчером по управлению линией метрополитена, связанные с изменением схемы организации движения.

Внешние переменные можно разделить на переменные прямого воздействия — те, которые непосредственно влияют на организацию движения и переменные косвенного воздействия — те, которые опосредованно влияют на операцию организации движения и не испытывают на себе влияние операций по организации движения.

Классификация параметров ситуационного подхода применительно к линии метрополитена

Все команды, выдаваемые поездным диспетчером в ходе организации движения при нештатной ситуации, относятся к внутренним параметрам сценария и могут быть разделены на два основных класса:

- индивидуальные команды, определяющие конкретные действия по движению конкретного поезда на конкретной станции;

- групповые меры, определяющие последовательность действий машинистов, маневровых бригад, электродепо, диспетчеров по управлению стрелками и сигналами (ДЦХЗ), диспетчеров по станционному посту централизации (ДСЦП или ДСП), управлению составами на нескольких станциях или несколькими поездами на станции.

Индивидуальные меры диспетчерского регулирования включают:

- сверхрежимную выдержку на станции на заданное время;

- сверхрежимную выдержку на станции до отмены;

- изменение маршрута следования;

- изменение расписания следования;

- назначение состава в качестве вспомогательного;

- назначение состава на двустороннее движение;

- назначение состава на следование в неправильном направлении;

- команда на высадку пассажиров и следование резервом на перегон;

- команда на посадку пассажиров в высадивший их ранее поезд.

Групповые команды диспетчерского регулирования включают:

- команды по организации или отмене оборота всех поездов на определенной станции;

- команды по организации зонного движения на определенной станции;

- команды по задержке всех поездов участка линии до указания диспетчера;

- приказы на закрытие участка линии.

Внешние параметры сценария определяются следующим образом.

К прямым внешним воздействиям можно отнести:

- время возникновения нештатной ситуации;

- место возникновения нештатной ситуации;

- прогнозируемая продолжительность нештатной ситуации;

- период возникновения нештатной ситуации;

- поездное положение.

К косвенным внешним воздействиям относятся:

- инфраструктура линии;

- работа технических устройств.

На ситуационном подходе базируется разработка алгоритмов интеллектуального управления транспортной системой [8].

Сценарный подход в обучении оперативного персонала

Обучению оперативного персонала, связанного с процессом организации движения поездов, уделяется существенное внимание. В связи с тем, что сам технологический процесс управления линией является ситуационным, то обучение предлагается проводить с использованием сценариев обучения.

Проведем классификацию нештатных ситуаций. Первым классификационным признаком нештатной ситуации является степень аварийности — *grade*. Здесь можно выделить две основные составляющие:

- *accident* — аварийные нештатные ситуации;
- *non_accident* — нештатные ситуации, не являющиеся аварийными, связанные с нарушениями движения по плановому графику.

Второй классификационный признак — *type* — вид нештатной ситуации. Здесь можно выделить следующие составляющие:

- *type_1* — прекращение движения по пути;
- *type_2* — ограничение скорости движения по пути;
- *type_3* — неисправность подвижного состава, приводящая к невозможности движения с установленной скоростью;
- *type_4* — неисправность подвижного состава, не снижающая скорость движения, но запрещающая его использование для пассажирских перевозок;
- *type_5* — неисправность подвижного состава, не снижающая скорость движения и не мешающая перевозке пассажиров, но требующая скорейшего снятия его с линии в электродепо.

Третий классификационный признак нештатной ситуации — *period* — период ее возникновения:

- *period_1* — час пик;
- *period_2* — начало движения;
- *period_3* — окончание движения;
- *period_4* — остальные периоды времени

Основными атрибутами исходных данных сценария являются:

- класс нештатной ситуации, его составляет кортеж $class=(grade, type, period)$;
- *time_start* — время возникновения нештатной ситуации;
- *place* — место возникновения нештатной ситуации с привязкой к инфраструктуре линии:
 - *line* — перегон/перегоны;
 - *station* — станция/станции;
 - *line* — путь;
 - *rail_chain* — рельсовая цепь/цепи;
 - *train* — поезд.

- *failure_type* — причина возникновения нештатной ситуации;

- *failure_time* — прогнозируемая продолжительность действия нештатной ситуации.

Таким образом, сценарий можно описать следующим кортежем:

$Scenario=(grade, type, period, class, time_start, place, failure_type, failure_time)$.

Задав исходными данными сценария, необходимо выполнить последовательность действий по разработке сценария (см. рис.1).

Основой составления сценария является описание процесса управления линией. Здесь описываются все возможные действия диспетчера и возникающие ситуации по управлению линией для каждого конкретного вида неисправности. Для примера на рис. 2 приведена модель процесса управления линией метрополитена при отсутствии срабатывания датчика контроля закрытия дверей.

На следующем шаге (рис.1) для каждого сценария на основании полученного процесса определяется последовательность команд. На рис. 3 представлена схема различных вариантов развития сценария для рассматриваемого примера, полученные на основе анализа процесса управления линией метрополитена при несрабатывании датчика контроля закрытия дверей.

Для того, чтобы оценить правильность команд, необходимо рассматривать каждый вариант течения сценария в отдельности. Например, для рассматриваемого случая это семь различных вариантов течения сценария.

В зависимости от варианта течения сценария команды могут быть классифицированы по следующим признакам:

- своевременно поступившие, оцениваемые положительным числом баллов;
- несвоевременно поступившие или не поступившие, не ведущие к нарушению безопасности управления движением могут быть оценены нулевым или отрицательным количеством баллов;
- несвоевременно поступившие или не поступившие, ведущие к нарушению безопасности управления движением. В этом случае выполнение сценария прекращается.

В таблице приведен фрагмент для трех вариантов реализации сценария из семи возможных, выполнена классификация команд и дан пример оценки правильности действий диспетчера. Представленный пример отражает ошибочные действия диспетчера (вариант 1), правильное течение сценария (вариант 2) и один из пяти вариантов, при котором часть правильных действий не выполнена (вариант 3).

Таблица

Пример составления исходных данных для сценария

Вариант	Действие	Пример команды	Классификатор команды	Баллы
1	Высадка пассажиров не производится	Отсутствие команды	Опасная, ведущая к нарушению безопасности движения	-1
	Отправление поезда с пассажирами	Маршрут №1 со Станции №1 отправляйтесь	Опасная, ведущая к нарушению безопасности движения	Завершение сценария
2	Высадка пассажиров на станции	Маршрут №1 высаживайте пассажиров	Правильная	1
	Сверхрежимные выдержки другим поездам	Маршрут №2 на Станции 2 выдержка 2 минуты	Правильная	1 балл за каждую команду
	Отправление поезда резервом	Маршрут №1 со Станции №1 отправляйтесь	Правильная	1
	Запрос на проверку срабатывания датчика	Маршрут №1 датчик закрытия дверей сработал?	Правильная	1
	Посадка пассажиров на следующей станции	Маршрут №1 на Станции №2 сажайте пассажиров	Правильная Завершение сценария	1
3	Высадка пассажиров на станции	Маршрут №1 высаживайте пассажиров	Правильная	1
	Сверхрежимные выдержки другим поездам	Маршрут №2 на Станции 2 выдержка 2 минуты	Не поступила	0
	Отправление поезда резервом	Маршрут №1 со Станции №1 отправляйтесь	Правильная	1
	Запрос на проверку срабатывания датчика	Маршрут №1 датчик закрытия дверей сработал?	Правильная	1
	Посадка пассажиров на следующей станции	Маршрут №1 на Станции №2 сажайте пассажиров	Правильная Завершение сценария	1

Такая таблица является исходными данными для сценария обучения. На основе содержащихся в ней данных строится база данных сценария обучения.

Предложенная методология построения сценария позволяет получить исходные данные сценариев Интегрированной автоматизированной системы обучения и оценки знаний оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем [9].

Выводы

Применение сценарного подхода в обучении оперативного персонала обусловлено концепцией

ситуационного управления движением поездов. Проведенная классификация параметров ситуационного управления применительно к линии метрополитена позволяет классифицировать команды, выдаваемые поездным диспетчером, по различным параметрам. Рассмотренный ситуационный подход является основой для разработки алгоритмов интеллектуального управления транспортной системой. Предложена методология построения сценария, заключающаяся в реализации определенной последовательности действий для составления сценария обучения. 

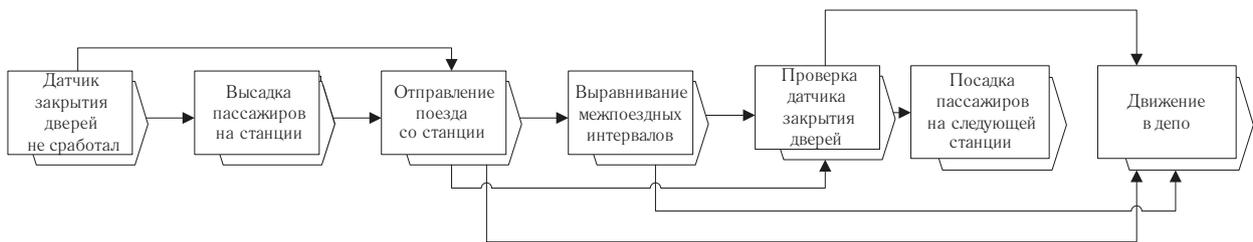


Рис. 3. Различные варианты течения сценария для рассматриваемого примера

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-37-51001.

Литература

1. Семенченко, Р.Д. Сценарии обучения в обучающих тренажерах / Р.Д. Семенченко. — Текст: непосредственный // Наука и современность. — 2016. — № 44. — С. 79–84.
2. L. Baranov, V. Sidorenko, «Simulation Complex for Training and Supporting the Decision Maker in Subway Train Traffic Control Systems», 18th Dresden Conference of Traffic and Transport Sciences. — Germany, Dresden, 17-18.9.2001.
3. Сидоренко, В.Г. Тренажеры поездных диспетчеров рельсового транспорта / В.Г. Сидоренко, Л.А. Баранов, Е.П. Балакина. — Текст: непосредственный // Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». — Москва: РУТ (МИИТ), 2017. С. VIII-4-VIII-4.
4. Логинова, Л.Н. Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2011. — № 1. — С. 62–65.
5. Логинова, Л.Н. Цифровые модели в обучении оперативного персонала транспортных систем / Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса: материалы международной научно-практической конференции; под ред. Ю.И. Соколова, Г.В. Бубновой, Л.А. Каргиной, И.А. Епишкина. — Москва: РУТ (МИИТ), 2019. — 321 с.
6. Agent-based evacuation simulation from subway train and platform// URL: <https://doi.org/10.1080/19439962.2019.1634661>
7. Балакина, Е.П. Перспективы использования многофункциональных моделей / Е.П. Балакина, Л.А. Баранов. — Текст: непосредственный // Мир транспорта. — 2012. — № 2. — С. 70–74.
8. Балакина, Е.П. Автоматика выполняет функции диспетчера / Е.П. Балакина. — Текст: непосредственный // Мир транспорта. — 2008. — № 2. — С. 104–119.
9. Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина, Л.Н. Логинова. — Текст: непосредственный // Мир транспорта. — 2021. — № 2. — С. 22–31.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПУТЕВЫХ МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В статье рассматриваются особенности математического моделирования этапов жизненного цикла путевых машинных комплексов при различных технологиях путевых работ, формируемых из различных единиц специального подвижного состава (СПС). Модель учитывает особенности эксплуатации СПС в части влияния на повышение уровня его безопасной эксплуатации и снижения травматизма.

Ключевые слова: моделирование, специальный подвижной состав, надежность, безопасность, охрана труда, железнодорожный путь

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_93



А.А. Локтев



П.В. Сычев

Техническое состояние путевых машин и механизмов, используемых при организации ремонтных работ и эксплуатации железнодорожного пути и, в целом, специального подвижного состава всех типов имеет важное значение в обеспечении требуемого уровня охраны труда и безопасности при выполнении всего комплекса работ на железнодорожном пути. Техническое состояние специального подвижного состава определяется, в первую очередь, техническими

характеристиками конкретного типа такого подвижного состава, эксплуатационными характеристиками, которые задают критерии требуемого качества выполнения технологических процессов специальным подвижным составом. Требуемый уровень безопасности при производстве комплекса работ на пути также зависит от жизненного цикла специального подвижного состава и от реализации отдельных его этапов (см., например, [1]), это в полной мере подтверждается при выполне-

Локтев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформированного тела, моделирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь, реконструкция объектов исторического и архитектурного наследия. Автор 186 научных работ, в том числе трех монографий.

Сычев Петр Вячеславович, кандидат технических наук, начальник отдела ООО «ВАГОНПУТЬМАШ». Область научных интересов: математическое моделирование и автоматизация технологических процессов и технических средств преимущественно для технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 54 научных работ. Имеет 10 патентов на изобретения.

Аксенов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технология транспортного машиностроения, ресурсосберегающие технологии на транспорте. Автор более 200 научных работ, в том числе четырех монографий, одного учебника и 14 учебных пособий.

Пикалов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Центра Инфраструктурных технологий АО «СТМ». Область научных интересов: организация строительства и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, технологии ремонта и эксплуатации железнодорожного пути, надежность технологических процессов, современные технологии на жизненном цикле железнодорожной инфраструктуры. Автор 36 научных работ.

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор более 100 научных работ. Имеет 20 патентов на изобретения.

нии статистического анализа имеющихся данных по производственному травматизму отнесенному как к путевым работам, так и к эксплуатации специального подвижного состава, в том числе, отдельно следует отмечать просроченный ремонт или модернизацию путевой техники.

Постановка задачи

Общее состояние специального подвижного состава в произвольный момент его жизненного цикла может быть описано вектором его состояний $(X, Y, Z \dots)$ и их колебаниями, вблизи некоторого равновесного положения (состояния), которые обусловлены отличием и уникальностью каждого набора условий эксплуатации при проведении работ, при хранении путевой техники, при следовании к месту проведения работ и т.д. Изменение градиента этих состояний можно отметить так

$$\frac{dX}{dt}; \frac{dY}{dt}; \frac{dZ}{dt}. \quad (1)$$

Таким образом, фактическое состояние специального подвижного состава можно представить некоторым подмножеством X , существующим в n -мерном пространстве. В этом случае качество работы i -й путевой машины обозначим как \mathcal{E}_i , данная величина является функцией от вектора X и определяет множество его состояний A_m в m -мерном пространстве.

Функцию надежной работы $\varphi(x)$ можно представить как траекторию изменения технического состояния путевой машины в m -мерном пространстве (X, A_m) в котором каждое состояние машины является опре-

деленной величиной, имеющей равновесное значение и не имеющей флуктуаций вблизи его.

Решение задачи

Оценку функционирования системы использования специального подвижного состава предлагается провести с помощью упомянутого параметра надежности и анализа простоев путевой техники за 7 лет непрерывной эксплуатации, для этого используем результаты натурных исследований, представленные в табл. 1.

Для удобства проведения анализа и уменьшения влияния вторичных факторов, анализ простоев путевой техники также был проанализирован в рамках одной из отечественных железных дорог. Разница в выявленных простоях путевых машин на сети и на отдельной железной дороге связана с разным количеством путевой техники в регионах. Также необходимо отметить, что зачастую простои специального подвижного состава, связаны не только с техническим состоянием самих путевых машин, но и с отменой окон, перемещением к непосредственному месту проведения ремонтных работ, неполным штатным составом отдельных бригад, проведением различных работ по диагностике и ремонту машин, пусканаладоочными работами и др.

В настоящей работе предполагается, что функция, отражающая надежную работу специального подвижного состава $\varphi(x)$ представляется через отказы, появляющиеся из-за ряда причин: резкое увеличение нагрузки, в том числе сверхнормативных значений; накопление микроповреждений и внутренних дефектов в элементах и агрегатах специального подвижного

Таблица 1

Причины простоев специального подвижного состава, входящего в механизированные комплексы

Тип СПС	Всего в % от рабочего сезона	В том числе:			
		Отмена окон	Транспортировка	Техобслуживание и неплановый ремонт	Прочие простои
СЧ 601	38	22	21	34	23
ЩОМ	49	20	24	44	12
РМ	42	34	20	28	18
Дуоматик	24	24	18	38	20
Унимат	21	26	24	31	19
ВПРС-03	31	19	29	40	12
ВПР-02М	40	27	15	41	18
СЗП-600	37	25	29	36	10

Таблица 2

**Простои различных путевых машин на отдельной железной дороге
 для 153 рабочих дней в году**

Тип СПС	Простои, дни	Простои, %
СЧ-600	102	67
DM-09-32, ПМА-1	50	33
Unimat	45	29
ДСП	66	43
ВПр-02М, ВПр-1200М, ВПр-02С	73	48
ВПрС-03, ВПрС-02М, ВПрС-02С	55	36
ВПр	78	51
ВПрС	96	63
ПБ	63	41

состава; увеличение трибологического износа; природные факторы; нарушения в области охраны труда и правил технической эксплуатации. Изменения в работоспособности путевых машин могут происходить и из-за характера появляющихся динамических усилий, таких как высокочастотные и гигацикловые нагружения.

Часть отказов элементов и агрегатов машин, которые непосредственно не приводят к отказу всего транспортного средства и могут быть устранены в плановом порядке в ходе проведения ремонтов или технического обслуживания, в данной модели предлагается не учитывать. Таким образом, за основную характеристику надежности принимаются отказы, которые ограничивают работоспособность всей машины и связаны с предельными состояниями ее отдельных систем. Фактически требуется определить вероятность $P_p(t)$ [2;3] наступления предельного состояния на базовом временном интервале $[0, T]$, связанном с определенными этапами жизненного цикла.

Причины появления простоев в относительных единицах измерения для конкретных типов путевой техники представлены в табл. 3.

В настоящем исследовании предложенная модель описания работоспособности путевой техники апробируется на примере работы хоппер-дозаторов, отказы которых чаще всего возникают из-за следующих причин: эксплуатационные отступления от норм при погрузке и выгрузке балластного материала; зарождение и развитие трещин в хребтовой и шкворневой балках; зарождение и развитие трещин в местах соединения основных элементов несущей конструкции; ускоренное корродирование узлов и элементов;

наличие технологических дефектов при изготовлении вагона; появление усталостных трещин в металле.

Из всего множества причин появления отказов требуется выделить те, которые связаны с управляемыми параметрами и могут оказать влияние на вероятность достижения требуемого состояния железнодорожного пути с заданной величиной ожидания. Такая задача относится к области теории массового обслуживания [6;7], на входе разработанного алгоритма формируется поток заявок на технического обслуживание, время выполнения каждой заявки при этом подчинено выбранному закону распределения с выбираемым параметром.

Пределы изменения функции бинарных состояний («нормальная работа» – «отказ») могут быть представлены в следующем виде:

$$0 \leq \varphi(x) < 1. \quad (2)$$

Состояние моделируемой системы описывается набором значений указанных выше переменных $C_c = \Phi[X_n^i, A_m^k \varphi^e]$, а изменения этих состояний могут быть представлены фазовой траекторией в первоначальном пространстве (X, A) . В качестве предельного состояния путевой техники предлагается принимать ресурс, связанный с нормативным сроком службы специального подвижного состава. Но поскольку, на жизненный цикл машин и механизмов оказывают влияние множество сложноформализуемых факторов, то логично предположить, что в процессе эксплуатации каждой единицы специального подвижного состава формируется индивидуальный ресурс, который является уникальным и, как правило, превышает нормативный срок службы. При этом

Таблица 3

Анализ причин простоев специального подвижного состава

Тип СПС	Простои, %								
	Отмена «окон»	Выходные дни	Транспортировка	Отсутствие бригад	Пусконаладочные работы	Техническое обслуживание	Ремонт плановый	Ремонт неплановый	Прочие причины
СЧ-600	36	5	12	0	2	6	2	4	33
DM-09-32, ПМА-1	16	2	22	0	4	12	8	12	24
Unimat	11	4	22	0	5	16	9	13	20
ДСП	15	3	19	2	2	11	3	14	31
ВПР-02М, ВПР-1200М, ВПР-02С	21	15	7	0	1	6	24	12	14
ВПРС-03, ВПРС-02М, ВПРС-02С	7	9	15	0	6	13	11	23	16
ВПР	10	25	9	3	5	9	6	15	18
ВПРС	10	28	6	6	4	7	12	14	13
ПБ	11	16	16	3	3	10	8	8	25

индивидуальный ресурс можно определить натурными испытаниями или численным моделированием и посредством управляющих воздействий оказывать влияние на жизненный цикл техники. Если за основу брать не путевую технику, а систему технического обслуживания железнодорожного пути, то надежность и работоспособность специального подвижного состава косвенно зависит от коэффициентов готовности K_r и технического использования $K_{ти}$:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N i_{pi}}{NT_{раб}}, K_{ти} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{NT_э}, \quad (3)$$

где t_{pi} – суммарное время пребывания машин в работоспособном состоянии; $T_э$ – общая продолжительность эксплуатации специального подвижного состава; $T_{раб}$ – продолжительность эксплуатации специального подвижного состава с учетом простоев из-за плановых ремонтов техники.

Таким образом, параметры износа и старения являются возмущающими факторами, изменяющими состояние специального подвижного состава, а в качестве управляющих факторов предлагается рассматривать систему технического обслуживания и ремонта специального подвижного состава [8]. Поскольку за весь жизненный цикл специальный подвижной состав может находиться в различных состояниях, то изменение этого состояния зависит от пространственно-

временных процессов и определяется в трехмерном пространстве набором координат X_0, Y_0, Z_0 . Учитывая важность интенсификации [9] использования дорогостоящей техники в системе технического обслуживания и ремонта железнодорожного пути требуется учитывать не только переходы между состояниями, но и скорость этих переходов, т.е. скорость процессов износа и старения. В силу сказанного рассматриваемое трехмерное пространство состоит из n точек, каждая из которых описывается тремя параметрами-координатами, т.е. фактически имеем следующие координаты X_k, Y_k, Z_k , где $k = 1, n$.

Согласно предлагаемой модели техническое состояние эксплуатируемого специального подвижного состава в любой момент времени определяется фазовой точкой $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$, а на траекторию переходов между состояниями оказывает влияние управляющий параметр $U=(U_1, U_2, \dots, U_n)$. Изменение параметров U и X и дает понимание воздействия функции управления $U(t)$ на фазовую траекторию состояний $X(t)$. При этом, задавая вид функции управления $U(t)$ и начальное состояние $X_0=X(t_0)$ для времени $t>t_0$ процесс изменения работоспособности можно считать полностью определенным.

Все фазовое пространство предлагаемой модели управления состоянием специального подвижного состава, предлагается разделить некой плоскостью $\Gamma(x)$, которая разделяет множество состояний на два

подмножества: исправные и неисправные, а вектор перехода между состояниями может изменяться при выполнении ремонтных работ, перемещая точку состояния из одного полупространства в другое (из неисправного в исправное). Положение траектории вектора и его приближение к плоскости $\Gamma(x)$ предлагается контролировать с помощью показателя γ , характеризующего состояние специального подвижного состава.

Если отсутствует резкое появление критических дефектов, например, таких как трещина в несущем элементе вагона, то траектория изменения состояний меняется плавно, постепенно приближаясь к границе двух полупространств. Активация управляющего воздействия U_1 позволит предотвратить попадание траектории изменений состояний в полупространство отказов. Если говорить про техническое обслуживание техники через определенное время или наработку, то управляющие воздействия U_2 можно оказывать в определенные моменты времени с частотой Δt . Если, все же, траектория вектора состояния попадет в зону отказов, то требуется проводить ремонт или модернизацию, т.е. оказывать управляющее воздействие третьего типа U_3 , которое представляет собой интенсивное восстановление специального подвижного состава. С учетом, возможных управляющих воздействий, уравнение управления состоянием специального подвижного состава в процессе эксплуатации U_Σ можно представить в следующем виде:

$$U_\Sigma = U_1(t) + \sum_1^n U_2(\Delta t_i) + \sum_1^k U_3(\Delta t_j), \quad (4)$$

где i, j — дискретные величины, определяющие моменты оказания управляющих воздействий; Δt — временные интервалы.

Сам процесс изменения состояния специального подвижного состава может быть представлен системой определяющих дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX_n}{dt} = F(X, Y, U). \quad (5)$$

Если принять, что величины Y_0 являются нормальными условиями эксплуатации путевой техники, а величина U_0 , есть управляющее воздействие для достижения этих условий, то следующее уравнение описывает процесс изменения невозмущенного (нулевого) состояния:

$$\frac{dX_n}{dt} = I, \quad (6)$$

где $I = f(Y_0, U_0)$.

Уравнение (6) в базисе метрики с параметрами γ_i можно представить в следующем виде:

$$\frac{dX_i}{dt} = \gamma_i, i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Особенности технического обслуживания путевой техники требуют учета малых отклонений в условиях ΔY и ΔU , которые изменяют первоначальные значения Y_0 и U_0 , в этом случае нужно использовать выражение:

$$\frac{d\Delta X_i}{dt} = k_0 \Delta X + K_1 \Delta Y + K_2 \Delta U, \quad (8)$$

где $K_1 = \sum \frac{df_i}{dU_j}$ — изменение (вектор) строки значений Y ;

$K_2 = \sum \frac{df_i}{dU_j}$ — изменение (вектор) строки значений U ;

$\Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \dots \\ \Delta Y_n \end{pmatrix}$ — дискретный интервал (вектор) столбца значений Y ;

ΔU — дискретный интервал (вектор) столбца значений U .

Предложенные соотношения для управления индивидуальным ресурсом специального подвижного состава, который рассматривается в качестве элемента системы технического обслуживания железнодорожного пути, позволяют учесть различные способы воздействия управляющих факторов, технологические процессы проведения путевых работ, повышение скорости перемещения путевой техники при выполнении работ, а также увеличение их грузоподъемности. Если рассматривать отдельно влияние двух факторов, то можно отметить, что повышение выработки (увеличение скорости) ограничивается динамикой изменения положения пути, а увеличение грузоподъемности приводит к существенным градиентам в изменении напряжений в элементах верхнего строения железнодорожного пути [10–12]. Таким образом, в работе путевой техники находят отражения общемировые тенденции строительства отдельных путей для высокоскоростного и обычного подвижного состава.

Предложенная модель позволяет учитывать различные элементы функционирования системы технического обслуживания специального подвижного состава, например, при преобладании определенных дефектов пути или особенностей в предоставлении «окон».

Проведенный анализ эксплуатации специального подвижного состава в различных условиях для одного типа путевых машин можно достаточно просто масштабировать на весь класс машин, в соответствии с применяемой технологией путевых работ. При этом можно использовать только две характеристики: $t_{ожм}$ – простой специального подвижного состава и $t_{ожп}$ – ожидание начала проведения ремонтных работ. В этом случае функция управления сводится к уменьшению временного фактора $t_{ожп}$, при условии неперевышения нормативных значений фактором $t_{ожп}$. Такой подход позволяет определить оптимальное количество путевой техники в машинных комплексах и выполнять основные требования к качеству обслуживания специального подвижного состава.

Заключение

Предложенная функциональная модель позволила повысить уровень безопасной эксплуатации специального подвижного состава, разработать требования для формализации процесса технического обслуживания путевых машин, определить основные характеристики процессов обслуживания специального подвижного состава, включающая поток требований различного уровня и векторов оптимизации эксплуатируемых машин специального подвижного состава, в целом, это позволит снизить уровень травматизма при реализации различных технологических процессов для путевых работ. 

Литература

1. Сычев, В.П. Обеспечение безопасности труда при производстве путевых работ на основе автоматизации процессов выгрузки и укладки балласта в железнодорожный путь / В.П. Сычев, В.А. Аксенов, Н.Г. Шабалин, Е.А. Сорокина, П.В. Сычев. – Текст: непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 9(327). – С. 24–29.
2. Сычев, П.В. Диагностика специального подвижного состава на основе применения закона распределения экстремальных значений / П.В. Сычев. – Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 5. – С. 27–30.
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения = Dependability in technics. Terms and definitions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июня 2016 г. № 654-ст: дата введения 2017-03-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Институт надежности машин и технологий» (ООО «ИНМиТ»). – Москва: Стандартинформ, 2017. – 30 с. – Текст: непосредственный.
4. Сычев, В.П. Продление срока службы специального подвижного состава / В.П. Сычев. – Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 8. – С. 16.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2003. – 479 с. – ISBN 5-06-004214-6. – Текст: непосредственный.
6. Матвеев, В.Ф. Системы массового обслуживания: Учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / В.Ф. Матвеев, В.Г. Ушаков. – Москва: Издательство Московского университета, 1984. – 238 с. – Текст: непосредственный.
7. Loktev A.A., Sycheva A.V., Vershinin V.V. Modeling of Work of a Railway Track at the Dynamic Effects of a Wheel Pair. Proceeding of the 2014. International Conference on Theoretical Mechanics and Applied Mechanics, Venice, Italy, March 15–17, 2014. P. 32–35.
8. Путевые машины: учебник / А.Ю. Абдурашитов, А.В. Атаманюк, В.Б. Бредюк, В.М. Бугаенко, А.П. Вецель, Б.Г. Волковойнов, М.А. Володин, Ю.А. Гамоля, Р.В. Грачев, Г.В. Завгородний, В.В. Карпик, А.С. Клементов, В.Ф. Ковальский, И.А. Мазунов, С.В. Петуховский, М.В. Попович, С.Л. Скрипка, Р.Д. Сухих, В.П. Сычев, В.М. Хавин; под ред. М.В. Попович, В.М. Бугаенко. – Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 960 с. – ISBN 978-5-907055-69-8. – Текст: непосредственный.

9. Абдурашитов, А.Ю. Оценка остаточного ресурса объектов инфраструктуры на основе анализа динамики изменения технического состояния в процессе эксплуатации / А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев. – Текст: непосредственный // Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах. Сборник трудов ученых АО «ВНИИЖТ» (АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»). – Москва, 2017. – С. 60–67.

10. Сычева, А.В. Расчет осадки полотна железнодорожного пути от действия динамической нагрузки с помощью лучевого метода / А.В. Сычева, А.А. Локтев, А.В. Залетдинов. – Текст: непосредственный // Нелинейный мир. – 2013. – № 11. – С. 67–76.

11. Loktev A, Sychev V., Gridasova E. and Stepanov R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters // Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. V.1. Theoretical and Applied Mathematics. – 2017. – С. 291–307.

12. Сычева, А.В. Исследование динамических характеристик верхнего строения железнодорожного пути при динамическом воздействии / А.В. Сычева, А.А. Локтев. – Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 4. – С. 64–70.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ЗОН ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫЕ МОСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ



О.И. Поддаева

В статье рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением безопасности труда работников при выполнении работ на большепролетных мостовых конструкциях с учетом ветрового воздействия. Представлены основные подходы к решению задачи динамического взаимодействия мостовых сооружений и ветрового потока, включая экспериментальные исследования и численное моделирование, с последующим выявлением опасных зон нахождения работников на сооружении. По результатам исследования выявлена необходимость определения параметров опасных зон для работников и доработки норм охраны труда.

Ключевые слова: мостовое сооружение, колебания, аэродинамическая труба, экспериментальное моделирование, численные методы, CFD

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_100

Использование в строительстве современных конструкционных материалов позволило инженерам существенно увеличить вертикальные и горизонтальные размеры зданий и сооружений, появились высотные и большепролетные конструкции. Появление таких конструкций в свою очередь привело к необходимости ужесточения требований к проектированию, обеспечивающих надежность и безопасность зданий и сооружений, а также к изменению норм охраны труда при производстве ремонтных, диагностических и иных работ на таких объектах. Появление новых и актуализация имеющихся нормативно-правовых документов в области охраны труда происходит в области проведения работ на высоте, над водой, при воздействии ветровых потоков и т.д. Но вместе с конкретными количественными значениями, определяющими, например, скорость ветрового потока, в нормативных документах есть и качественные характеристики: «напор ветра», «сильный ветер» (Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11. 2020 №782н «Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте»). Оценка

возможности определения количественных параметров состояния и поведения большепролетных мостовых переходов, рабочей среды в непосредственной близости от них и опасных зон вблизи различных элементов рассматриваемых конструкций и является одной из задач настоящего исследования наряду с изучением аэродинамического поведения мостовой конструкции при действии ветровых потоков.

Одной из основных особенностей высотных и большепролетных строительных конструкций является их восприимчивость к динамическим нагрузкам, в том числе к ветровым. Значительное число катастроф с такими сооружениями произошло именно вследствие природных кинематических воздействий. Стоит вспомнить наиболее известные аварии – разрушение Такоумского моста (США), колебания Волгоградского моста, моста на остров Русский (РФ) и многие другие. Данные эффекты напрямую связаны с явлениями аэродинамической неустойчивости. Классификация этих явлений широко представлена как в нормативной документации [1;2], так и в научно-технической литературе [3;4]. Несмотря на то, что фиксация подобных

Поддаева Ольга Игоревна, кандидат технических наук, доцент, заведующий Учебно-научно-производственной лабораторией по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ). Область научных интересов: строительная аэродинамика, механика деформируемого твердого тела. Автор более 110 научных работ.

явлений не всегда приводит к разрушению конструкции их исследованию стоит уделять внимание, как с точки зрения обеспечения расчетной долговечности, так и с точки зрения обеспечения требований охраны труда в части воздействия на работников, участвующих в технологических процессах непосредственно на мостовом переходе, негативные воздействия могут быть связаны как с повышенной вибрацией и шумом, так и с ветровыми потоками, имеющими скорость более 15 м/с.

Основным методом оценки аэродинамической устойчивости большепролетных мостовых конструкций и распределения ветровых потоков вокруг них является экспериментальное моделирование в аэродинамических трубах [5–7]. При этом, в зависимости от решаемой задачи, исследования проводятся на разных типах моделей (отсечных, масштабных динамически подобных) с использованием различных испытательных стендов и измерительного оборудования. Бурное развитие в последние годы получили исследования с использованием численных методов (CFD) [5;8–10] и, хотя данные методы по-прежнему имеют ряд существенных ограничений, на основании таких исследований можно получить предварительную оценку устойчивости конструкции в ветровом потоке [11;12], распределения частот собственных и вынужденных колебаний отдельных элементов конструкции, распределения ветровых потоков на мостовом переходе, что в будущем позволит сформировать картину расположения опасных зон при проведении различных работ [13;14].

В данной статье приведены основные достоинства и недостатки различных методов и подходов к оценке аэродинамической устойчивости мостовых конструкций и формирования ветровых потоков вокруг них [11;12], а также примеры исследований, выполненных на базе Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям НИУ МГСУ.

Экспериментальное моделирование

Наиболее распространенным методом экспериментальных исследований являются исследования на отсечных моделях. Алгоритм исследований достаточно подробно описан в научно-технической литературе [2;6;7]. При проведении данных исследований изготавливается максимально жесткая геометрически подобная модель центральной части (секции) пролета мостового сооружения [15;16]. Помимо геометрического подобия непосредственно при изготовлении модели соблюдается подобие по распределению масс, и, соответственно, моментов инерции.

Сами исследования проводятся в специализированных стендах, позволяющих позиционировать модель в потоке, а также разместить требуемое измерительное оборудование (рис. 1).

Исследования проводятся в два этапа — статические испытания и динамические испытания.

При проведении статических испытаний модель жестко крепится к шестикомпонентным сило-моментным датчикам и измеряются нагрузки и крутящие моменты. На основании результатов таких испытаний



Рис. 1. Испытания отсечной модели пролетного строения в специализированном стенде на базе УНУ БИГАТ НИУ МГСУ

рассчитываются значения безразмерных аэродинамических коэффициентов — аэродинамического сопротивления, подъемной силы и крутящего момента, далее на основании полученных значений оценивается возможность возникновения эффекта галопирования по критерию Глауэрта — Ден-Гартога, а также возможность возникновения дивергенции. Важность данных исследований трудно недооценить, ведь по общепринятым стандартам явления галопирования и дивергенции являются недопустимыми для любых строительных конструкций и могут привести к их полному разрушению и созданию угрозы здоровью и жизни работников, находящихся на данной конструкции или вблизи от нее [17;18].

При проведении статических испытаний модель размещается на пружинных подвесах, с помощью которых моделируются две формы колебаний — первая изгибная и первая крутильная (рис. 2).

Критериями подобия при проведении таких испытаний являются число Струхаля (подобие по собственным частотам колебаний), число Ньютона (подобие по распределению масс), число Скрутона (подобие по логарифмическому декременту затухания). При проведении данных испытаний измеряются амплитуды колебаний пролетного строения при различных скоростях и углах атаки ветрового потока. Данные испытания позволяют зафиксировать возможность возникновения наиболее распространенного на практике явления аэродинамической неустойчивости — вихревого возбуждения, а также оценить полученные значения амплитуд колебаний и виброускорений. Данные зна-

чения сравниваются с критическими, определенными на этапе проектирования или предельно допустимыми в соответствии с действующими нормативными документами, что позволяет обеспечить прочность и долговечность конструкции, комфортность и безопасность пребывания на ней работников, а также предложить научно обоснованные способы и системы защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов во время проведения мониторинга, ремонтных работ и работ по текущему содержанию конструкции (рис. 3).

В отдельных случаях оценка аэродинамической устойчивости мостовых сооружений и распределение ветровых потоков вокруг них выполняется на полных динамически подобных моделях [5]. При этом проектируется и изготавливается модель не только участка пролетного строения, а модель всего сооружения с опорами и пилонами (при их наличии). Такие испытания незаменимы для оценки устойчивости большепролетных мостов на стадии строительства методом надвигки, а также актуальны для вантовых и подвесных мостовых сооружений [14;19].

Исследования на полных динамически подобных моделях в теории позволяют получить наиболее полную информацию о нелинейном динамическом взаимодействии мостового сооружения с ветровым потоком. При проведении испытаний учитывается рельеф и окружающая застройка, рассматриваются различные направления ветрового потока. В тоже время данный вид моделирования имеет ряд существенных недостатков, в первую очередь это высокие слож-



Рис. 2. Монтаж отсечной модели пролетного строения в специализированном стенде на пружинных подвесах на базе УНУ БИГАТ НИУ МГСУ

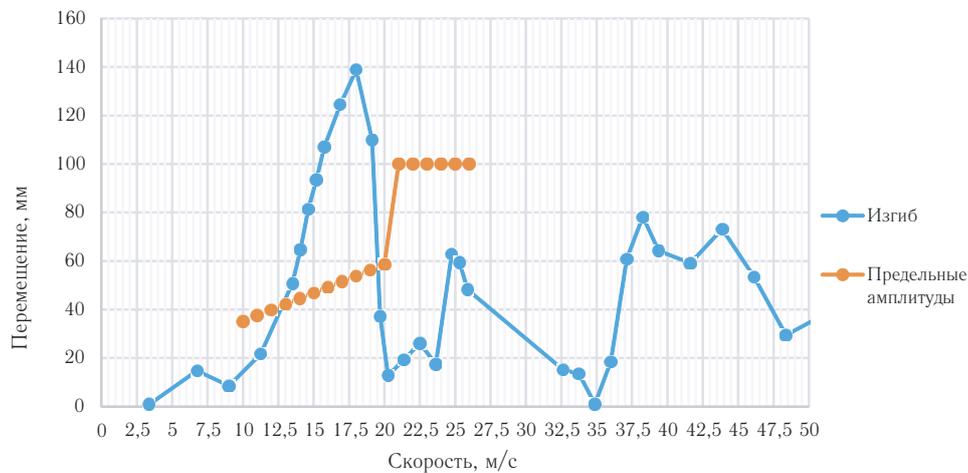


Рис. 3. Сопоставление амплитуд колебаний, полученных в результате экспериментальных исследований с предельно допустимыми значениями

ность, стоимость и сроки проектирования и создания модели, необходимость соблюдения большого количества критериев подобия, что с учетом параметров реальных сооружений (размеры, динамические характеристики и др.) чрезвычайно затруднительно и, зачастую, невозможно [3;4].

Развитие данного направления экспериментального моделирования является наиболее приоритетной и наукоемкой задачей как современной архитектурно-строительной аэродинамики, так и техносферной безопасности, связанной со строительством и эксплуатацией таких сооружений. Эта задача имеет как фундаментальную ценность с точки зрения развития аэродинамики — моделирование нелинейных динамических процессов взаимодействия зданий и сооружений с ветровым потоком, так и прикладную с точки зрения разработки методик проектирования и испытания полных динамически подобных моделей большепролетных мостовых сооружений и прогнозирования параметров состояния опасных зон на мостовых переходах для работников, отвечающих за эксплуатацию моста, водителей, пассажиров и пешеходов.

Численное (математическое) моделирование

Развитие аппаратного и программного обеспечения современной вычислительной техники открывает широкие возможности для решения задач аэродинамики зданий и сооружений методами численного моделирования (CFD). Классические задачи данного направления, такие как определение ветровой нагрузки на здания и сооружения в статической поста-

новке, оценка пешеходной комфортности городской застройки и др., в настоящее время практически не уступают по достоверности аналогичным результатам экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, при этом обладая рядом преимуществ — сравнительно низкие стоимость и сроки выполнения работ, большая вариативность и изменяемость численных моделей. Основным недостатком при этом являются высокие требования к квалификации специалиста, занимающегося расчетами, существенная зависимость результатов моделирования от параметров расчетной сетки, граничных условий и др., что говорит о необходимости использования верифицированных программных комплексов и/или проведения валидации с результатами экспериментальных исследований по отдельным объектам.

Решение нелинейных задач динамического взаимодействия сооружений с ветровым потоком, воздействия ветрового потока на работников, находящихся в непосредственной близости от элементов конструкции, существенно повышает роль перечисленных выше недостатков, и тем самым усложняет решение данных задач методами численного моделирования. Тем не менее отказываться от данного инструмента нецелесообразно.

Применение классических подходов математического моделирования основанных на системе уравнений RANS, на предварительном этапе исследований позволяет оценить характер обтекания пролетного строения мостового сооружения, зафиксировать периодический срыв турбулентных вихрей с конструкции (образование дорожек Кармана). На дан-

ном этапе можно сделать предварительные выводы об форме пролетного строения с точки зрения аэродинамики и рассмотреть варианты ее оптимизации (рис. 4) [10;11].

Более сложные вихреразрешающие подходы (метод DES в сочетании с моделированием динамики моста по симплектическому методу Эйлера) позволяют получать физически адекватные картины течения (рис. 5), по которым можно составить карту расположения и состояния опасных зон на мостовом переходе в зависимости от направления и скорости воздействующего ветрового потока. Несмотря на то, что в настоящее время данные подходы являются очень ресурсо- и трудоемкими, полученные на их

основе результаты хорошо коррелируются с экспериментальными данными, а развитие вычислительной техники вскоре позволит перейти к их повсеместному использованию [8;12].

Заключение

Проблема оценки аэродинамической устойчивости является одной из наиболее актуальных в архитектурно-строительной аэродинамике, а проблемы прогнозирования параметров состояния опасных зон, научного обоснования систем, средств и способов защиты работника от воздействия вредных и опасных факторов при выполнении технологических процессов на мостовом переходе, актуальны и своев-

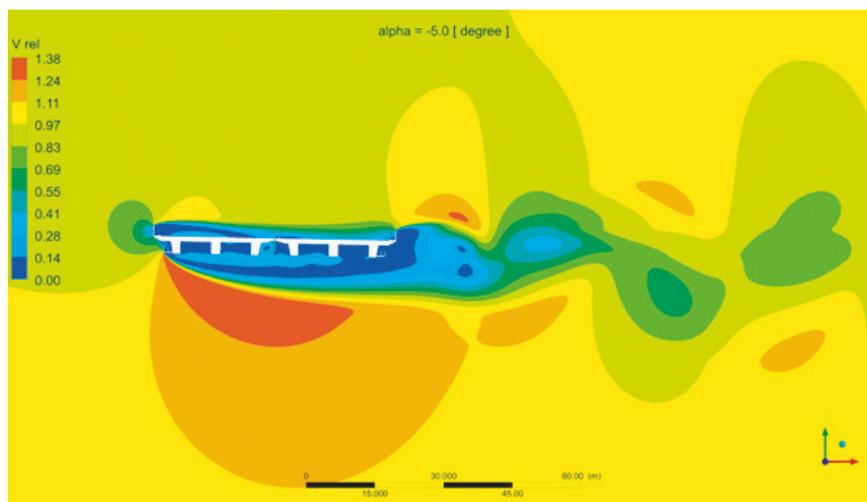


Рис. 4. Предварительное численное моделирование

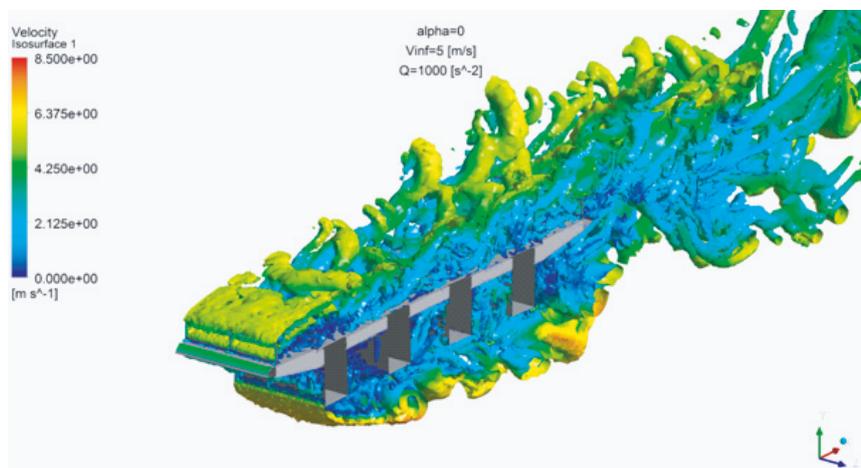


Рис. 5. Визуализация вихревой системы моста

ременны для охраны труда и техносферной безопасности в целом. Несмотря на то, что решением данной проблемы ученые со всего мира занимаются начиная с середины прошлого столетия, однозначного решения они не имеют.

Действующие в области надежности и безопасности строительных конструкций, а также в области охраны труда нормативные документы регламентируют проведение испытаний в аэродинамических трубах, как правило такие испытания проводятся на отсечных моделях в статической и динамической постановке. В отдельных случаях требуется проведение существенно более сложных испытаний на полных динамически подобных моделях, при этом методики как изготовления таких моделей, так и проведения самих испытаний фактически отсутствуют.

Численное (математическое) моделирование используется как вспомогательный инструмент. В рамках предварительного численного моделирования осуществляется оптимизация формы пролетного строения, выполняются предварительные расчеты основных аэродинамических характеристик. При этом использование современных вихререзающих подходов к численному моделированию (DES), позволяет получать адекватные результаты, хорошо коррелирующиеся с результатами эксперимента и

определять координаты расположения и параметры состояния опасных зон для работников, находящихся на мостовых переходах различных конструктивных схем.

На практике наиболее оптимальным в настоящее время является использование комплексного расчетно-экспериментального подхода, позволяющего использовать все плюсы и минусы экспериментальных и численных методов, включающего предварительное численное моделирование методом RANS, статические и динамические испытания на отсечных моделях в аэродинамических трубах. В рамках же передовых научных исследований необходимо развивать современные подходы к численным методам решения нелинейных задач динамического взаимодействия строительных конструкций с ветровым потоком, а также совершенствовать методы изготовления полных динамически подобных моделей. 

Благодарность

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

Литература

1. BD 49/01 (2001). Design rules for aerodynamic effects on bridges. BD 49/01, vol. 1, Sect. 3, Part 3. The Highways Agency.
2. CNR-DT, 207/2008. (2010). Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. 2008 National Research Council.
3. Kazakevich, M.I. (2014). Aerodynamics of engineering structures. Moscow: Institute Giprostroymost, ISBN 978-5-93307-014-6.
4. Kazakevich, M.I. (2010). Fundamentals of calculations of structures for wind effects. Moscow: Publishing house MISI-MGSU, ISBN 978-5-7264-1932-9.
5. Diana, G., Fiammenghi, G., Belloli, M., & Rocchi, D. (2013). Wind tunnel tests and numerical approach for long span bridges: The Messina bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 122, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.07.012>
6. Poddaeva, O., Fedosova, A., & Gribach, J. (2019). The study of wind effects on the bridge constructions. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 97, p. 03030). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199703030>
7. Churin, P., & Fedosova, A. (2019, November). Aerodynamic Stability of Bridge Structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 661, No. 1, p. 012050). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/661/1/012050>
8. Bai, Y., Sun, D., & Lin, J. (2010). Three dimensional numerical simulations of long-span bridge aerodynamics, using block-iterative coupling and DES. *Computers & Fluids*, 39(9), 1549-1561. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2010.05.005>
9. Abbas, T., Kavrakov, I., & Morgenthal, G. (2017, December). Methods for flutter stability analysis of long-span bridges: a review. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* (Vol. 170, No. 4, pp. 271–310). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jbren.15.00039>

10. Jeong, W., Liu, S., Bogunovic Jakobsen, J., & Ong, M. C. (2019). Unsteady RANS simulations of flow around a twin-box bridge girder cross section. *Energies*, 12(14), 2670. <https://doi.org/10.3390/en12142670>
11. De Miranda, S., Patruno, L., Ricci, M., & Ubertini, F. (2015). Numerical study of a twin box bridge deck with increasing gap ratio by using RANS and LES approaches. *Engineering Structures*, 99, 546-558. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.017>
12. Ageev, N., Poddaeva, O., Fedosova, A., & Egorychev, O. (2020, June). Numerical and experimental assessment of frequencies and amplitudes when swirling excitation of bending vibrations of construction structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 869, No. 5, p. 052002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052002>
13. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11. 2020 № 782н «Об утверждении правил по охране труда при работе на высоте». – URL: <https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1822> (дата обращения 26.09.2021). – Текст: электронный.
14. Локтев, А.А. Математическое моделирование аэродинамического поведения антенномачтовых сооружений при организации связи на железнодорожном транспорте / А.А. Локтев, В.В. Королёв, О.И. Поддаева, К.Д. Степанов, И.Ю. Черников. – Текст: непосредственный // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2018. – Т.77, № 2. – С. 77–83.
15. Локтев, А.А. Моделирование мостотоннеля для пропуска легкового транспорта через объекты инфраструктуры / А.А. Локтев, В.П. Сычёв, О.И. Поддаева, А.В. Потапов, Г.Н. Талашкин. – Текст: непосредственный // *Наука и техника транспорта*. – 2017. – № 1. – С. 73–78.
16. Локтев, А.А. Перспективные конструкции мостовых переходов на транспортных магистралях / А.А. Локтев, В.В. Королёв, Д.А. Локтев, Д.Р. Шукюров, П.А. Гелюх, И.В. Шишкина. – Текст: непосредственный // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2018. – Т. 77, № 6. – С. 331–336.
17. Локтев, А.А. Высокочастотные вибрации в элементах подвижного состава на мостовых сооружениях / А.А. Локтев, П.А. Гелюх, В.В. Королёв. – Текст: непосредственный // *Путь и путевое хозяйство*. – 2018. – № 5. – С. 13–15.
18. Королёв, В.В. Особенности работы пролетного строения мостового перехода при смещении оси рельсошпальной решетки / В.В. Королёв, А.А. Локтев, И.В. Шишкина, Е.А. Гридасова. – Текст: непосредственный // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2020. – Т.79, № 3. – С. 127–138.
19. Кочнев, В.А. Моделирование ветровой нагрузки на мостотоннель для пропуска пассажирского транспорта в сложных природных условиях / В.А. Кочнев, Т.А. Ковалева, А.А. Локтев, В.П. Сычев. – Текст: непосредственный // В сборнике: *Строительство в прибрежных курортных регионах. Материалы X Международной научно-практической конференции*; Под научной редакцией К.Н. Макарова, 2018. – С. 81–85.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СТАТИСТИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА НА ТРАНСПОРТЕ

В статье представлены некоторые аспекты статистики производственного травматизма на транспорте по результатам анализа данных Роструда. Показано влияние на статистические данные о травматизме классификации по видам экономической деятельности, инспекционных мероприятий уполномоченных органов, видов транспорта и др. Анализ статистических данных необходим для принятия взвешенных решений по управлению охраной труда с целью минимизации несчастных случаев на производстве.



М.В. Графкина

Ключевые слова: производственный травматизм, транспорт, статистические данные, автомобильный транспорт, причины травматизма

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_107

Транспорт решает важнейшие социально-экономические задачи по перевозке пассажиров и грузов, и как любой вид деятельности, сопряжен для работников этой сферы с определенными профессиональными рисками, реализация которых приводит к несчастным случаям на производстве. Федеральная служба по труду и занятости отмечает, что наиболее высокий уровень производственного травматизма со смертельным исходом традиционно наблюдается в организациях таких видов экономической деятельности как строительство, обрабатывающие производства, добыча полезных ископаемых, а также транспортировка и хранение (к которым по ОКВЭД 2 относится транспорт) и др. [1]. Статистические данные о производственном травматизме являются основой для принятия управленческих решений в области охраны труда с целью реализации мероприятий, направленных на минимизацию производственного травматизма (в идеальном случае Vision Zero). Таким образом, проблема

анализа статистических данных производственного травматизма на транспорте является актуальной.

Используя данные Роструда [2], проведен анализ несчастных случаев на производстве (НСП) в сфере транспорта, результаты анализа представлены на рис.1.

Статистические данные показывают изменение тенденций в показателях производственного травматизма. В 2015–2016 гг. значительное количество несчастных случаев можно было объяснить в том числе и тем, что до 2017 г. экономические виды деятельности классифицировались по ОКВЭД ОК 029-2001 (КДЕС Ред.1). В раздел I Транспорт и связь, помимо экономической деятельности, непосредственно связанной с транспортировкой пассажиров и грузов, входили также деятельность в области электросвязи и деятельность туристических агентств, что на взгляд автора было неоправданным, т.к. причины травматизма в этих сферах деятельности свя-

Графкина Марина Владимировна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экологическая безопасность технических систем» факультета химической технологии и биотехнологии Московского политехнического университета, лауреат премии Правительства РФ в области образования, член Российской академии транспорта, Почетный работник высшего профессионального образования. Область научных интересов: развитие теории и методологии оценки экологической безопасности технических систем на этапе их разработки, в том числе электромагнитной безопасности. Автор более 300 научных работ, в том числе шести монографий.

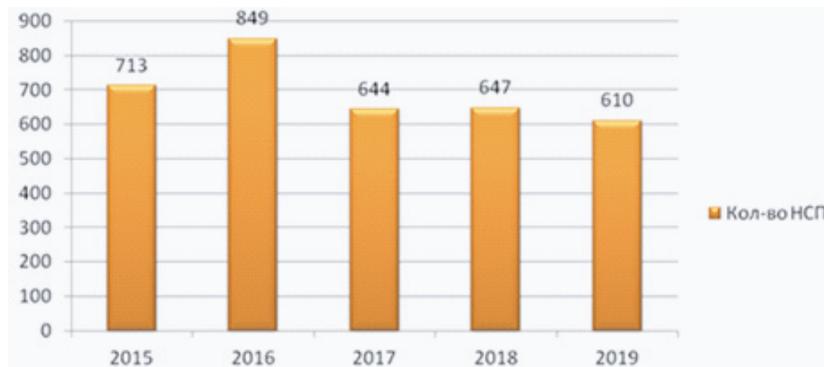


Рис. 1. Изменения количества несчастных случаев в сфере транспорта

заны с совершенно различными технологическими процессами, оборудованием, правилами и требованиями охраны труда.

С 2017 г. принята новая редакция ОКВЭД-2 (версия ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2)). В настоящее время транспорт входит в Раздел Н Транспортировка и хранение. В этот раздел входит деятельность, связанная непосредственно с транспортировкой пассажиров и грузов. Этот раздел включает в себя перевозку грузов и пассажиров по железной дороге, трубопроводам, автомобильной дороге, водным или воздушным транспортом, а также сопряженную с ней деятельность, такую как деятельность вокзалов, стоянок для транспортных средств; обработку и хранение груза и т.д.

Анализ содержания видов деятельности по кодам ОКВЭД-2 показывает, что виды деятельности, входящие в раздел Н Транспортировка и хранение, действительно имеют много общего, что важно для выявления причин производственного травматизма с целью разработки инспекционных и контрольных мероприятий, а также эффективных управляющих воздействий по профилактике и снижению несчастных случаев на производстве. Целесообразно продолжать работу по совершенствованию принципов и практики использования ОКВЭД, что позволяет получать уполномоченным органам статистические данные о производственном травматизме по схожим видам экономической деятельности и соответственно принимать более взвешенные решения [3].

Анализ типологии несчастных случаев на производстве с тяжелыми последствиями, происшедших в 2017–2019 гг. в организациях Российской Федерации, свидетельствует о том, что 6,8% несчастных случаев произошло в результате транспортных происшествий. Из общего количества зарегистрированных несчастных случаев на транспорте 95% произошли

на наземном транспорте. Проведенный прогнозный анализ с помощью полиномиальной линии тренда в программе Microsoft Office Excel на два будущих периода (года) показал позитивную тенденцию к снижению показателя травматизма на транспорте (рис.2), что не противоречит данным Роструда за 2020 г., в соответствии с которыми удалось достичь снижения количества погибших в результате несчастных случаев с тяжелыми последствиями по сравнению с 2019 г. в таких отраслях, как строительство, обрабатывающие производства, транспортировка и хранение, а также в ряде других видов экономической деятельности [4].

Анализ показателей производственного травматизма по различным видам транспорта позволил выявить следующее распределение, представленное на рис. 3, из которого следует, что наименьшее число травматизма приходится на водный транспорт, далее идут железнодорожный транспорт, воздушный транспорт и наибольшее число пострадавших на производстве приходится на наземный транспорт.

По положению о Федеральной службе по труду и занятости, она осуществляет государственный контроль и надзор за выполнением трудового законодательства, в том числе трудового законодательства и других нормативных правовых актов, содержащих нормы охраны труда, в порядке реализации предоставленных полномочий. За период 2016–2018 гг. государственными инспекциями труда было организовано и проведено 420,2 тыс. проверок по вопросам соблюдения законодательства о труде (2016 г. –134,5 тыс., 2017 г. –148,9 тыс., 2018 г. –136,8 тыс. соответственно). Из них проверок в сфере транспорта было организовано и проведено порядка 25 тыс. (2016 г. –7,1 тыс., 2017 г. –11,5 тыс., 2018 г. –6,7 тыс. соответственно), что наглядно представлено на рис. 4.

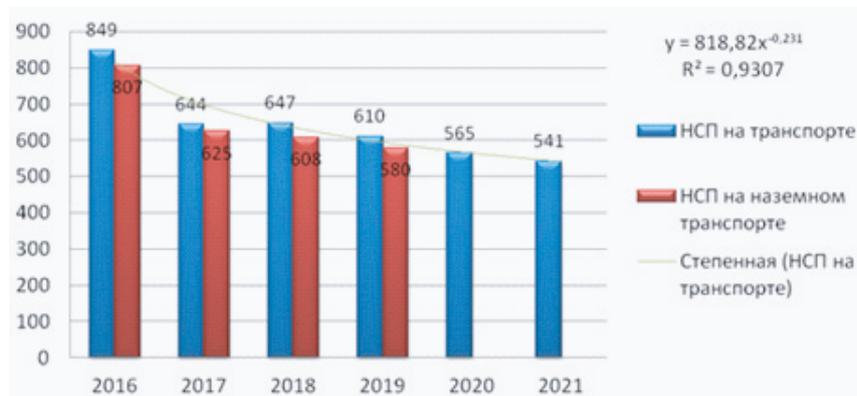


Рис. 2. Тренд изменения производственного травматизма

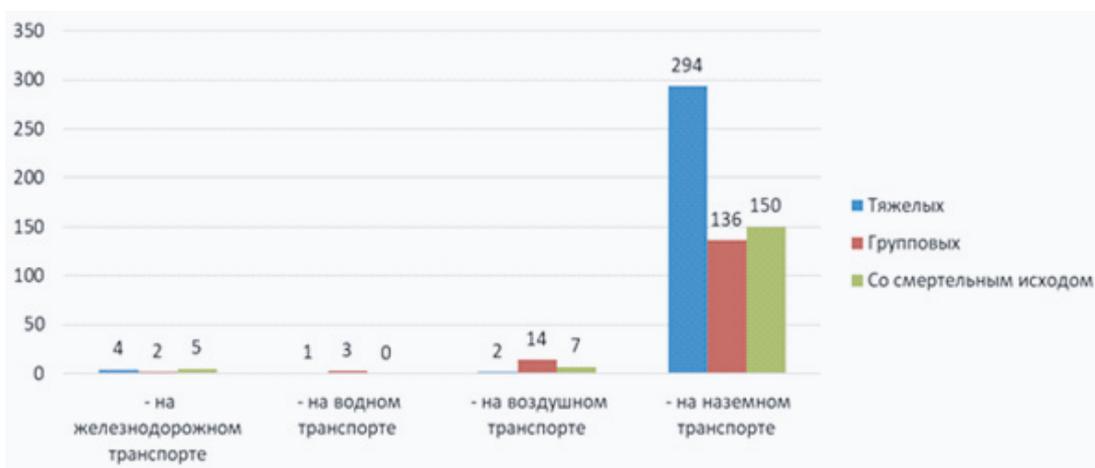


Рис. 3. Показатели производственного травматизма на различных видах транспорта

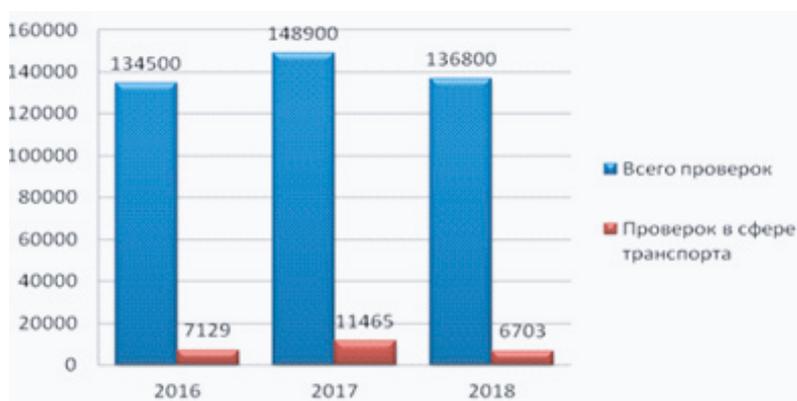


Рис. 4. Количество проверок за 2016–2019 гг.

Из приведенных данных (см. рис. 1,4) видно, что повышение статистических данных по производственному травматизму вызывает соответствующую реакцию контролирующих и надзорных органов, выражающуюся в увеличении количества числа проверок, в 2017 г. их было 11 465. Такие меры реагирования и управляющего воздействия привели к последующему снижению показателей травматизма на транспорте.

Анализ причин НС с тяжелыми последствиями на транспорте показывает, что максимальное количество таких случаев обусловлено следующими причинами:

- неудовлетворительная организация производства работ;
- недостатки в организации и проведении обучения работников по охране труда;
- нарушение работником трудового распорядка и дисциплины труда;
- нарушение правил дорожного движения (ПДД);
- прочие причины, квалифицированные по материалам расследования НС.

Более детальное исследование и анализ материалов (за 2018 – 2019 гг.) расследования НСП (групповых и смертельных) в сфере транспорта позволили выявить другие причины и проблемы травмирования и смертельных случаев на производстве. Так, например, прием на работу водителей, которые неоднократно нарушали ПДД, увеличивает риски несчастных случаев на производстве из-за дорожно-транспортных происшествий. Например, в июле 2018 г. в городе Орле произошла авария по вине водителя, у которого неоднократно регистрировали нарушения ПДД.

Тяжесть травмы усугублялась еще и тем, что потерпевший имел значительный опыт вождения (более 20 лет) и не пользовался ремнем безопасности. Также установлено, что в соответствии с материалами, указанными в актах о несчастных случаях на производстве со смертельным исходом, часто встречаются следующие обстоятельства:

- 60% – нарушение ПДД;
- 27% – нарушение режима труда и отдыха водителями автотранспортных средств;
- 7% – неудовлетворительное состояние дорог и др. [5].

Таким образом анализ статистических данных о производственном травматизме на транспорте позволил выявить связь с таксономией по видам экономической деятельности, влияние на показатели производственного травматизма мер реагирования со стороны инспекционных и надзорных органов; установить общую тенденцию к снижению производственного травматизма. А также была выявлена связь производственного травматизма с общими экономическими и социальными проблемами (состояние дорог, соблюдение ПДД участниками дорожного движения и др.).

На взгляд автора целесообразно вести планомерную работу, направленную на совершенствование сбора, классификации, обработки статистических данных по производственному травматизму, являющихся важным условием для принятия взвешенных решений по управлению охраной труда с целью минимизации НСП. 

Литература

1. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2019. – URL: https://rostrud.gov.ru/upload/Doc/Doc-rostrud/Rostrud2020_15May.pdf. – Текст: электронный.
2. Федеральная служба по труду и занятости. Доклады об осуществлении и эффективности федерального государственного надзора за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права. – URL: https://www.rostrud.ru/press_center/doklady/doklady-ob-osushchestvlenii-i-effektivnosti-federalnogo-gosudarstvennogo-nadzora-za-soblyudeniem-tru/ (дата обращения: 23.09.2012). – Текст: электронный.
3. Графкина, М.В. Влияние таксономии видов экономической деятельности на управление охраной труда/М.В. Графкина, Е.Ю. Свиридова, И. Главацкая: – Текст: непосредственный // Экономика труда. – 2020. – Т.7, №1. – С. 69–78.
4. Отчет о деятельности Федеральной службы по труду и занятости за 2020 г. – URL: https://rostrud.gov.ru/rostrud/deyatelnost/?CAT_ID=14167 (дата обращения 23.09.21). – Текст: электронный.
5. Графкина, М.В. Анализ причин несчастных случаев на производстве, происшедших в результате дорожно-транспортных происшествий/ М.В. Графкина, Н.А. Сафрина // Электронный сетевой политематический журнал. По материалам I Международной научно-практической конференции «Безопасность и ресурсосбережение в техносфере». Научные труды КубГТУ. – 2017. – №7. – С. 9–15. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34903444> (дата обращения 23.09.2021). – Текст: электронный.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТРАВМАТИЗМА В СФЕРЕ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Проведено исследование и ранжирование несчастных случаев на объекте дорожного строительства согласно видам выполняемых работ, опасным факторам и причинам их возникновения в целях выявления общих тенденций и разработки превентивных мер.

Ключевые слова: дорожное строительство, производственный травматизм, причины травматизма, условия труда, безопасность

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_111



А.М. Сазонова



Д.П. Гурт

В настоящее время уровень производственного травматизма в отрасли дорожного строительства продолжает оставаться на высоком уровне. В результате нарушений требований безопасности на объектах происходит большое число происшествий, которые зачастую сопровождаются несчастными случаями, травмированием разной степени тяжести и гибелью людей. Порой это связано с невысоким уровнем квалификации и, довольно часто, с производственной дисциплиной рабочих. Стоит отметить, что в рассматриваемой отрасли задействовано большое количество людей, которое связано с разнообразным спектром работ, начиная с возведения зданий и закан-

чивая прокладкой дорог [1]. Дорожное строительство характеризуется наличием большого количества работающих, имеющих как постоянный, так и сезонный характер работ. Зачастую переменчивый характер работы, непостоянство кадрового состава, являются причиной отсутствия навыков в работе и уверенных знаний требований охраны труда. Таким образом, основной базой при разработке мероприятий по профилактике и предупреждению случаев травматизма, является детальное изучение статистических данных, проведение анализа и выявление причин и факторов произошедших несчастных случаев на конкретном объекте производственной деятельности [2–3].

Сазонова Анна Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС). Область научных интересов: охрана труда, условия труда, оценка условий труда, профессиональные риски (транспорт, строительство, подземные сооружения). Автор 47 научных работ. Имеет три свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Гурт Дарья Павловна, магистрант Донского государственного технического университета (ДГТУ). Область научных интересов: охрана труда, специальная оценка условий труда, промышленная безопасность.

Квиткина Марина Владимировна, аспирант Донского государственного технического университета (ДГТУ). Область научных интересов: охрана труда, специальная оценка условий труда, профессиональные риски, экологические риски. Автор 17 научных работ.

Стасева Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Производственная безопасность» Донского государственного технического университета (ДГТУ). Область научных интересов: методология управления рисками в охране труда, охрана и безопасность труда в строительстве, специальная оценка условий труда, обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов, антропогенное воздействие жизнедеятельности человека на окружающую среду, методы и способы защиты. Автор 181 научной работы, в том числе одной монографии. Имеет 12 патентов на полезную модель.

Задачи проводимого исследования

Для проведения всестороннего анализа травматизма в отрасли дорожного строительства необходимо выполнить следующие задачи: исследовать несчастные случаи по видам выполняемых работ, травмирующим факторам и обстоятельствам, при которых они могли произойти, чтобы в итоге выявить причины несчастного случая, локализовать проявление производственного травматизма и разработать необходимые мероприятия для предотвращения нежелательных событий.

По итогу проведенного исследования необходимо установить: наиболее травмоопасную профессию, ведущую причину несчастных случаев, наиболее травмоопасное оборудование, критический возраст среди работников.

Под несчастным случаем на производстве будем понимать событие, в результате которого работающий получает травму или иное повреждение здоровья при исполнении им трудовых обязанностей, что повлекло временную или стойкую утрату им профессиональной трудоспособности либо смерть.

Методы

Применяются методы анализа производственного травматизма, а именно: статистический метод — анализ статистических данных травматизма на объекте дорожного строительства, методы идентификации причин возникновения несчастных случаев, выявления особенностей причин, приводящих к несчастным случаям на производстве. Статистические данные по несчастным случаям, выступающие в качестве базовой информации для исследования, собраны на реальном объекте.

Объект и предмет исследования

В работе рассмотрено ГУП «Кировское МДРСУ», которое специализируется на выпуске асфальтобетона для строительства и ремонта автомобильных дорог. В структуре предприятия имеются следующие подразделения:

1. Юридический отдел.
2. Основное производство.
3. Асфальтобетонный завод (АБЗ).
4. Ремонтно-механическая мастерская (РММ).
5. Электроцех.
6. Дорожный участок.
7. Автоучасток.
8. СИ-204.

Одним из основных производственных подразделений предприятия является АБЗ. По своей технологической схеме и наличию используемого оборудования — это сложная система, состоящая из различных

машин, оборудования, механизмов. Общее количество рабочих на АБЗ составляет 111 человек, из них: мужчин — 103 человека, женщин — 8 человек, лиц в возрасте до 18 лет — 0 человек. Число мужчин значительно превышает число женщин, так как на предприятии преобладают тяжелые условия труда.

Предмет исследования — несчастные случаи на ГУП «Кировское МДРСУ».

Анализ несчастных случаев на объекте

В работе выполнен анализ несчастных случаев на базе статистических данных по травматизму в ГУП «Кировское МДРСУ» за период 5 лет по: видам происшествий, приведших к несчастному случаю; причинам; профессиям; виду оборудования; возрасту пострадавших. Результаты анализа представлены в виде диаграмм (рис. 1–5).

В ГУП «Кировское МДРСУ» зафиксированы следующие виды происшествий (см. рис. 1).

Основная часть случаев травматизма произошла в результате физических перегрузок — на их долю приходится 27% всех случаев. Работа с грузами, работа в неудобной и статической позе и т.п. — все это является показателями вредного и опасного производственного фактора — тяжести труда, приводящей к различным видам происшествий. Также хочется выделить воздействие вредных веществ. Основным загрязняющим веществом, образующимся и выделяющимся при дорожном строительстве, является пыль неорганическая, которая негативно влияет на здоровье рабочего персонала. Пыль образуется при работе «горячего» элеватора, грохочения сухого песка и щебня, при подаче и дозировании минерального порошка и сухих горячих каменных материалов, перемещении материалов транспортерами, а также в процессе дробления. Вдыхаемая пыль задерживается в органах дыхания и приводит к заболеванию легких — пневмокониозу. Постоянное наличие пыли в окружающем пространстве со временем может вызвать сенсibiliзирующий эффект даже у абсолютно здорового человека [4–6]. Но это уже больше вопрос в области профессиональных заболеваний.

Вероятность возникновения травматизма на предприятии напрямую зависит от условий труда, технологии выполняемой работы, личностных качеств самого работника и ряда других конкретных условий производства [7;8].

В ГУП «Кировское МДРСУ» зафиксированы следующие причины происшествий (см. рис. 2).

Установлено, что несчастные случаи в основном происходят по причине несовершенства технологического процесса. Наибольшее их количество произошло на АБЗ.

На рис. 3 представлено распределение несчастных случаев по профессиям на рассматриваемом объекте.

Самой травмоопасной профессией на объекте является асфальтобетонщик, на них приходится 24% всех случаев. Специалисты по укладке асфальтобетонной продукции осуществляют ручной труд с помо-

щью лопат, виброплит либо ручных катков. Работа выполняется на открытом воздухе, чаще всего в жаркий период. Вредные испарения от дорожного покрытия, ненормированный график работы, неудобная рабочая поза — все это является причинами происшествий и травм, характерных для данной профессии.



Рис. 1. Виды происшествий



Рис. 2. Причины происшествий

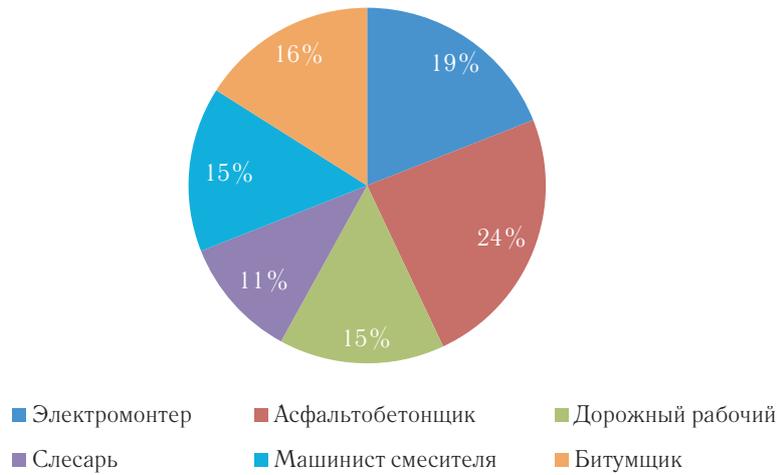


Рис. 3. Распределение несчастных случаев по профессиям

На рис. 4 показано распределение несчастных случаев по виду оборудования.

К наиболее травмоопасному оборудованию можно отнести дорожно-строительную технику, на долю которой приходится 30% несчастных случаев.

Распределение случаев травматизма в % по возрасту пострадавших, показано на рис. 5.

Наибольшее количество случаев травмирования приходится на работников в возрасте от 40 до 50 лет. Примечательно то, что несчастные случаи происходят чаще с хорошо обученными и имеющими достаточный практический опыт работниками, но пренебрегшими правилами безопасности из-за своей чрезмерной уверенности [7;8].

Результаты

Проведенное исследование показало, что основная часть случаев травматизма произошла в результате физических перегрузок, ведущей причиной травматизма является несовершенство технологического процесса, наиболее травмоопасной является профессия асфальтобетонщика, а к наиболее травмоопасному оборудованию можно отнести дорожно-строительную технику. Критический возраст среди работающих, на который приходится наибольшее количество случаев травмирования составляет 40–50 лет.

Отметим, что, занимаясь вопросами производственного травматизма, следует обращать внимание в большей степени на первостепенные причины его появления, а не на те, которые напрямую ведут к

травматизму работников, рассматривая всю цепочку причин, приводящих к несчастному случаю.

В целях профилактики и предупреждения несчастных случаев рекомендуется реализовывать следующий комплекс мероприятий, направленный на устранение возможности проявления всех выявленных причин [9–10]:

1. Систематическая идентификация опасностей и оценка производственных рисков.
2. Совершенствование технологического процесса с учетом современных разработок.
3. Замена наиболее травмоопасного оборудования на альтернативу по возможности или минимизация времени непрерывной работы.
4. Соблюдение режима труда и отдыха, введение дополнительных регламентированных перерывов в течение рабочей смены.
5. Организация на предприятии комнат психологической разгрузки.
6. Систематическое обучение и повышение квалификаций у рабочих, введение дополнительных внеочередных обучений и проверок знаний по требованиям безопасности у работников наиболее травмоопасной профессии и у работников критического возраста.
7. Стимулирование работы по обеспечению безопасности производственных процессов, снижению производственного травматизма.
8. Применение необходимых средств защиты коллективного и индивидуального характера.



Рис. 4. Распределение несчастных случаев по виду оборудования

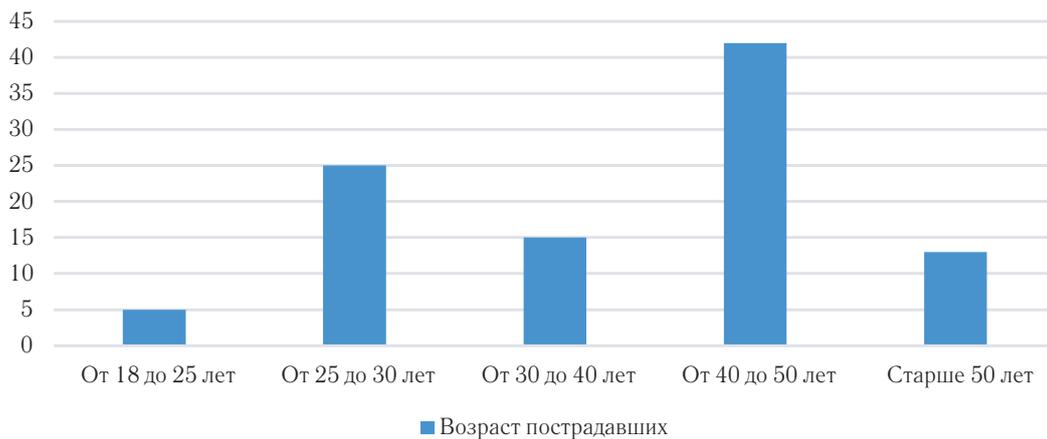


Рис. 5. Распределение случаев травматизма в %, по возрасту пострадавших

Заключение

Проведенное исследование позволило определить наиболее травмоопасную профессию в области дорожного строительства и установить ведущую причину несчастных случаев. Выявлено наиболее травмоопасное оборудование среди используемого в данной отрасли. Был определен критический возраст среди работающих, на который приходится наибольшее количество случаев травмирования. Предложенный алгоритм анализа травматизма применим к различным отраслям и может быть использован в практической деятельности. В целях профилактики и предупреждения случаев травматизма на рассматриваемом объекте был разработан комплекс мероприятий, направленный на устранение возможности проявления выявленных причин травматизма. Данные рекомендации могут быть применены на практике.



Литература

1. Квиткина, М.В. Анализ состояния условий и охраны труда на предприятиях Ростовской области по видам экономической деятельности / М.В. Квиткина, Е.В. Стасева. – Текст: непосредственный // *Материалы Международной научно-практической конференции «Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение»*. Вып. XVIII. – Ростов н/Д: Донской гос. ун-т, 2016. – С. 103–111.
2. Филатова, С.В. Проблемы травматизма и охраны труда в строительстве / С.В. Филатова. – Текст: непосредственный // *Сборник научных трудов и материалов III Международной научно-практической конференции с научной школой для молодежи. Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии*. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – С. 91–94.
3. Стасева, Е.В. Профилактика травматизма на основе комплексной оценки профессиональных рисков строителей / Е.В. Стасева, А.М. Сазонова, И.О. Цыгульский. – Текст: непосредственный // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – №2. – С. 11–13.
4. Квиткина, М.В. Исследование условий труда на рабочих местах участка укладки асфальтобетона по материалам СОУТ / М.В. Квиткина. – Текст: непосредственный // *Научное обозрение*. – 2017. – №10. – С. 129–131.
5. Копытенкова, О.И. Гигиеническая характеристика воздушного бассейна в районе интенсивной эксплуатации дорожно-автомобильного комплекса / О.И. Копытенкова, А.В. Леванчук, Г.Б. Еремин. – Текст: непосредственный // *Гигиена и санитария*. – 2019. – Т.98, №6. – С. 613–618.
6. Levanchuk A.V. The risk to the health of the population exposed to the influence of the road-car complex / A.V. Levanchuk, O.I. Kopytenkova // *Vestnik of Saint Petersburg University. Medicine*. – 2019. – V.14. – №1. – PP. 69–74.
7. Стасева, Е.В. Роль влияния человеческого фактора при оценке уровня травматизма на предприятии / Е.В. Стасева, А.Г. Багян. – Текст: непосредственный // *Сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в научной деятельности»*. – Астрахань: Научный центр «Олимп», 2017. – С. 58–59.
8. Багян, А.Г. Исследование влияния человеческого фактора на возникновение случаев травматизма / А.Г. Багян, Е.В. Стасева, А.М. Сазонова. – Текст: непосредственный // *Аспекты безопасности жизнедеятельности и медицины: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 110-й годовщине со дня рождения П.Е. Ладана*. Пос. Персиановский: Донской государственный аграрный университет, 2018. – С. 115–118.
9. Булгаков, О.Н. Оценка эффективности технических и технологических решений, направленных на снижение экологической опасности автомобилей при их эксплуатации и ремонте / О.Н. Булгаков, Т.С. Титова, А.М. Будюкин, В.Г. Кондратенко. – Текст: непосредственный // *Современные технологии, применяемые при обслуживании и ремонте автомобилей; сборник трудов национальной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых*, 2019. – С. 12–29.
10. Шилова, Е.А. Внедрение процессного подхода к управлению охраной труда и профессиональными рисками / Е.А. Шилова, Л.А. Леванчук, В.В. Рябец. – Текст: непосредственный // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2020. – №10 (238). – С. 3–7.