

**МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ**

**ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
ТЕКУЩЕГО ПЛАНИРОВАНИЯ
РАБОТЫ С КОЛЬЦЕВЫМИ МАРШРУТАМИ
НА СТАНЦИИ ВЫГРУЗКИ**

**МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ
ГРУЗОВЫХ ПЕРЕВОЗОК В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРАЦИИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИНФРАСТРУКТУР**

**МОДЕЛЬ ФУНКЦИИ СТИМУЛИРОВАНИЯ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМ
ОБСЛУЖИВАНИЕМ И РЕМОНТОМ АВТОМОБИЛЕЙ**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПОТЕНЦИАЛА И РАСТЕКАНИЯ ТОКА
В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПУТИ**



TRANSPORT

SCIENTIFIC JOURNAL OF THE URALS

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
11. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
12. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
13. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
15. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
16. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasilii Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyayev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
11. Say Vasilii Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
12. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
13. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
15. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
16. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

И. Ф. Мустафин.

Алгоритм определения параметров внутригородского движения с учетом технико-технологических особенностей и перспективы развития пригородно-городского движения в крупнейших агломерациях на сети ОАО «РЖД»..... 3

И. Н. Пугачев, Н. Г. Шешера, Д. Е. Григоров.

Методология интеллектуального управления дорожным движением с учетом изменения погодных условий 10

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, В. В. Харламов.

Интенсивность изнашивания материала колес двухосных тележек вагонов метрополитена при движении в кривых рельсовой колеи..... 17

ВАГОНЫ И ВАГОННОЕ ХОЗЯЙСТВО

А. Г. Галкин, Н. Ф. Сирина, Г. А. Бубнова.

Анализ технического состояния разных типов грузовых вагонов..... 24

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

А. Э. Александров, В. Ю. Пермикин, И. В. Пытель.

Оптимизационная модель текущего планирования работы с кольцевыми маршрутами на станции выгрузки..... 34

А. В. Мартыненко, Е. Г. Филиппова.

Модель городского кольцевого железнодорожного маршрута с учетом пространственной неоднородности пассажиропотоков..... 38

О. Н. Ларин, Амарсанаа Оюунгарав.

Методы планирования грузовых перевозок в условиях интеграции железнодорожных инфраструктур..... 44

В. С. Колокольников, О. В. Осокин, А. В. Шипулин.

Моделирование монгольских железных дорог: задачи и результаты 51

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Е. С. Козин.

Модель функции стимулирования при управлении техническим обслуживанием и ремонтом автомобилей 56

ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

А. С. Трошин, И. А. Новиков, Н. О. Блудян, В. Ю. Линник.

Особенности региональных интегрированных логистических систем (на примере АПК Белгородской области)..... 61

С. Д. Подолинная, Р. Г. Король.

Определение места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах..... 69

ПУТЬ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина.

Исследование вертикальной жесткости рельсовых скреплений при переменных значениях жесткостей прокладок..... 76

А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина.

Исследование вертикальной жесткости рельсовых скреплений при постоянных значениях жесткостей прокладок 82

А. В. Чонка, А. Р. Исламов.

К вопросу о применимости бикадионид в геометрии трассы железнодорожного пути 88

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

В. А. Третьяков, А. В. Паранин.

Разработка модели распределения потенциала и растекания тока в поперечном сечении пути 100

А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков.

Разработка вероятностной модели прогнозирования продолжительности гололедоопасного периода в границах дистанции электроснабжения 106

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

А. А. Иванов, Е. А. Третьяков.

Совершенствование установки по восстановлению изоляционных свойств обмоток тяговых электродвигателей путем внедрения автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов 113

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

I. F. Mustafin.

Algorithm for determining the parameters of intra-urban traffic, taking into account technical and technological features and prospects for development of suburban and urban traffic in the largest agglomerations on the Russian Railways network 3

I. N. Pugachev, N. G. Sheshera, D. E. Grigоров.

Methodology of intelligent traffic control taking into account changing weather conditions..... 10

ROLLING STOCK AND TRACTION

V. F. Kuznetsov, S. G. Shantarenko, V. V. Kharlamov.

Intensity of wear of the material of the wheels of two-axle bogies of subway cars when moving in curves of the rail gauge 17

RAILWAY CARS AND CARRIAGE EQUIPMENT

A. G. Galkin, N. F. Sirina, G. A. Bubnova.

Analysis of the technical condition for different types of freight cars..... 24

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

A. E. Alexandrov, V. Yu. Permikin, I. V. Pytel.

Optimization model for the current planning of work with ring routes at the unloading station 34

A. V. Martynenko, E. G. Filippova.

Model of an urban ring railway route taking into account the spatial heterogeneity of passenger flows..... 38

O. N. Larin, Amarsanaa Oyuungarav.

Methods of freight transportation planning in the context of rail infrastructure integration 44

V. S. Kolokolnikov, O. V. Osokin, A. V. Shipulin.

Modeling of Mongolian railways: tasks and results..... 51

MOTOR TRANSPORT

E. S. Kozin.

Model of incentive function in management of vehicle maintenance and repair 56

TRANSPORT AND LOGISTICS PROCESSES

A. S. Troshin, I. A. Novikov, N. O. Bludyan, V. Yu. Linnik.

Features of regional integrated logistics systems (on the example of agro-industrial complex of Belgorod region) 61

S. D. Podolinnaya, R. G. Korol.

Determining of location for transport and logistics facility in special economic and geographical zones 69

RAILWAY CONSTRUCTION AND RAILWAY TRACK

A. A. Loktev, V. V. Korolev, I. V. Shishkina.

Investigation of vertical stiffness rail fasteners with variable values of gasket stiffness..... 76

A. A. Loktev, V. V. Korolev, I. V. Shishkina.

Investigation of vertical stiffness rail fasteners at constant values of gasket stiffness 82

A. V. Chonka, A. R. Islamov.

On the applicability of bicadioids in the geometry of railway track 88

ELECTRIC SUPPLY

V. A. Tretyakov, A. V. Parinin.

Development of model of potential distribution and current flow in the cross-section of the track..... 100

A. N. Smerdin, A. V. Tarasenko, I. E. Chertkov, A. S. Golubkov.

Development of a probabilistic forecasting model duration of the ice-hazardous period within the boundaries of the power supply distance 106

ELECTRIC TRACTION

A. A. Ivanov, E. A. Tretyakov.

Improving the installation for restoring the insulating properties of the windings of traction electric motors by introducing automatic regulation of the viscosity of impregnating materials..... 113

Научная статья

УДК 656.02

Алгоритм определения параметров внутригородского движения с учетом технико-технологических особенностей и перспективы развития пригородно-городского движения в крупнейших агломерациях на сети ОАО «РЖД»

Ильдар Фавилович Мустафин¹¹АО «Институт экономики и развития транспорта», Москва, Россия

Algorithm for determining the parameters of intra-urban traffic, taking into account technical and technological features and prospects for development of suburban and urban traffic in the largest agglomerations on the Russian Railways network

Ildar F. Mustafin¹¹Institute for Transport Economics and Development JSC, Moscow, Russia

Аннотация

В статье рассмотрены такие технико-технологические параметры внутригородского железнодорожного транспорта, оказывающие влияние на величину пассажиропотока, как график движения поездов, классы транспортного обслуживания, подвижной состав, топология транспортной сети. Проанализированы основные взаимозависимости пассажиропотока от социально-экономических и градостроительных факторов. Исходя из технико-технологических и социально-экономических показателей разработан алгоритм определения параметров организации внутригородского движения в крупнейших агломерациях.

Ключевые слова: внутригородское железнодорожное движение, размеры движения поездов, график движения, подвижной состав, классы транспортного обслуживания, прогноз пассажиропотока, агломерации

Abstract

The article considers such technical and technological parameters of intercity railway transport that affect the amount of passenger traffic as train schedules, classes of transport services, rolling stock, and the topology of the transport network. The main interdependencies of passenger traffic on socio-economic and urban factors are analyzed. Based on technical, technological and socio-economic indicators, an algorithm has been developed for determining the parameters of the organization of intra-urban traffic in the largest agglomerations.

Keywords: intercity railway traffic, train traffic sizes, timetable, rolling stock, classes of transport services, passenger traffic forecast, agglomerations

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-3-9

ВВЕДЕНИЕ

Организация внутригородского железнодорожного сообщения имеет большое значение для развития экономики и улучшения качества жизни, позволяя решать многие проблемы, связанные с транспортным обеспечением населения агломераций.

Одной из основных таких проблем являются дорожные заторы, которые из-за растущего уровня автомобилизации и недостатка альтернативных маршрутов происходят все чаще. Рост темпов автомобилизации приводит к критическому увеличению времени на путь городских жителей от селитебных зон до мест приложения труда. При этом резервы расширения улично-дорожной сети в крупных агломерациях практически исчерпаны. Кроме того, провозная способность рельсового транспорта в час пик в несколько раз больше, чем автотранспорта. Таким образом, транспортное обеспечение населения агломераций в долгосрочной перспективе возможно только при условии развития рельсового транспорта. Железнодорожное сообщение может стать хорошей альтернативой для людей, живущих далеко от центра города или работающих в удаленных районах. Быстрый, удобный и дешевый маршрут железнодорожного сообщения может стать важным фактором, побуждающим людей использовать общественный транспорт вместо личных автомобилей.

Проекты по созданию новых железнодорожных путей сообщения способствуют и развитию экономики города. Строительство новых железнодорожных линий и станций приводит к созданию селитебных зон, новых рабочих мест и привлечению инвестиций. Помимо этого железнодорожный транспорт может улучшить доступность торговых центров и других объектов инфраструктуры, что, в свою очередь, создаст условия для увеличения потребления и повышения экономической активности.

3

Наконец, организация внутригородского железнодорожного сообщения позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду, поскольку железнодорожный транспорт более экологичный, чем автомобильный, с точки зрения загрязнения воздуха. Кроме того, уменьшение количества автомобилей на дорогах будет способствовать снижению уровня шума и повышению качества жизни горожан.

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ

Параметры организации внутригородского железнодорожного движения зависят от множества переменных, прежде всего от величины прогнозного пассажиропотока, которая, в свою очередь, зависит от различных факторов, таких как:

- время в пути (пассажиры предпочитают маршруты с минимальными затратами времени);

- стоимость проезда (она может влиять на выбор маршрута, особенно если есть альтернативные варианты с разной стоимостью);

- частота и регулярность маршрутов (если есть несколько вариантов маршрутов с разным расписанием, пассажиры, скорее всего, выберут более частые и регулярные);

- удобство маршрута (доступность транспорта, удобство пересадок, наличие комфортабельных сидений и т.д.);

- демографические факторы (в зависимости от численности населения, возраста, пола, социального статуса и других демографических характеристик пассажиров их предпочтения при выборе маршрута могут различаться);

- градостроительные факторы (исходя из развития девелоперских проектов, общественно-деловой застройки и создания рекреационных зон определяются перспективы развития маршрутной сети общественного транспорта);

- реклама и маркетинг (рекламные кампании и маркетинговые стратегии также могут влиять на выбор пассажиров и, следовательно, на величину прогнозного пассажиропотока).

Если демографическое и градостроительное развитие, стоимость проезда, реклама и маркетинг относятся к социально-экономическим факторам, влияющим на пассажиропоток [1], то время в пути, частота, регулярность и удобство маршрута относятся к технико-технологическим факторам, которые можно корректировать при организации внутригородского железнодорожного движения. Рассмотрим принципы определения таких технико-технологических параметров.

Время в пути имеет важное значение, так как влияет на удобство, удовлетворенность и выбор пассажиром вида транспорта. Чем меньше время в пути потратит пассажир, тем большая вероятность того, что он выберет данный вид транспорта и будет доволен поездкой. Кроме того, меньшие затраты времени, проведенного в пути, позволяют пассажирам точнее планировать распорядок дня, снижают стресс и усталость от поездки, улучшают общую удовлетворенность сервисом.

Следует отметить, что время в пути необходимо учитывать не только как непосредственно проведенное в транспортном средстве, но также с учетом выполнения терминальных операций в пунктах отправления и назначения (пересадки, прохождение турникетов, пунктов транспортной безопасности и т.д.) и ожидания поездов:

$$T_{\text{общ}} = t_{\text{под}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{дв}} + t_{\text{отх}} \quad (1)$$

где $t_{\text{под}}$, $t_{\text{ож}}$, $t_{\text{дв}}$, $t_{\text{отх}}$ — соответственно время на подход к остановочному пункту, на ожидание транспортной единицы, на поездку в транспорте, на отход от остановочного пункта к месту назначения, мин.

Сократить время, проведенное в пути, можно за счет корректировки нескольких технико-технологических параметров, таких как размеры движения (такт движения) и график движения поездов.

В частности, правильно подобранный такт движения позволяет уменьшить временные интервалы между поездами, что способствует сокращению времени ожидания пассажиров на станциях. Кроме того, на время в пути следования и на время ожидания влияет график движения. Число пригородных поездов существенно зависит от типа графика, по которому организованы перевозки. Например, в крупных агломерациях в интенсивные часы пригородных перевозок целесообразно применять зонный параллельный график движения пригородных поездов, при котором поезда останавливаются на всех остановочных пунктах и зонных станциях участка, что позволяет максимально эффективно использовать наличную пропускную способность железнодорожной инфраструктуры. В периоды спада пассажиропотока можно использовать классический зонный непараллельный график, он обеспечивает наибольшую скорость продвижения поездов на участке, так как каждый поезд останавливается лишь на промежуточных пунктах своей зоны и на соответствующей зонной станции. График движения определяет равномерное распределение пассажиропотока и позволяет эффективно использовать весь потенциал железнодорожной системы [2–4].

Основным средством транспортного обслуживания при железнодорожных перевозках является подвижной состав. От его эффективности, надежности и комфортности напрямую зависит уровень обслуживания пассажиров. Во внутригородском сообщении, для которого характерен высокий коэффициент сменяемости пассажиров, важно обеспечить удобные условия для посадки-высадки. Существующая планировка вагонов с использованием торцевых тамбуров имеет самые низкие показатели комфортабельности и времени на посадку-высадку, что обусловлено высокой частотой остановок и большими объемами пассажирообмена (рис. 1а). Основными недостатками таких решений по планировке вагонов являются:

- большая продолжительность посадки-высадки при высоком уровне сменяемости пассажиров;
- наиболее стесненные условия для пассажирообмена при высоком уровне населенности вагона;
- низкий уровень санитарных условий тамбурной зоны.

Преимущество тамбурной планировки заключается в сохранении температурного режима внутри салона вагона в зимний период.

Использование компоновки подвижного состава со смещением дверных проемов от торцов вагонов к середине (на междоосевое расстояние дверей в половину длины вагона) является наиболее оптимальным планировочным вариантом для внутригородского сообщения (рис. 1б).

Дальнейшая оптимизация качественных параметров пассажирообмена может быть реализована за счет увеличения числа дверных проемов (рис. 1в).

Предоставление услуг различного класса транспортного обслуживания в зависимости от потребности населения городских агломераций является ключевым аспектом для обеспечения эффективной и удобной транспортной системы. Этот выбор в значительной мере зависит от уникальных потребностей пассажиров и особенностей каждой конкретной агломерации [5, 6].

Наличие разнообразных классов транспортного обслуживания, таких как внутригородские, региональные, скорые пригородные поезда, позволяет адаптировать предложение к потребностям различных категорий пассажиров. Например, более комфортные и быстрые пригородные поезда могут быть предпочтительны для пассажиров, совершающих дальние поездки, в то время как внутригородские поезда более удобны для коротких поездок внутри города.

Разнообразие классов транспортного обслуживания позволяет более равномерно распределять пассажиропотоки по маршрутам и видам транспорта. Это способствует снижению перегрузок на ключевых участках и оптимизации использования доступной транспортной инфраструктуры.

Таким образом, адаптивный выбор классов транспорта играет важную роль в создании удобной, доступной и эффективной транспортной системы в городских агломерациях.

Развитая топология транспортной сети имеет важное значение для организации перемещений в агломерациях. Возможность выбрать наиболее удобный маршрут позволяет пользователям транспортной системы находить оптимальные варианты поездки с учетом таких факторов, как время в пути, комфорт и стоимость проезда.

Кроме того, разветвленная транспортная сеть способствует снижению нагрузки на транспортную инфраструктуру. Распределение трафика по различным маршрутам уменьшает перегрузки на ключевых участках, обеспечивает более равномерное

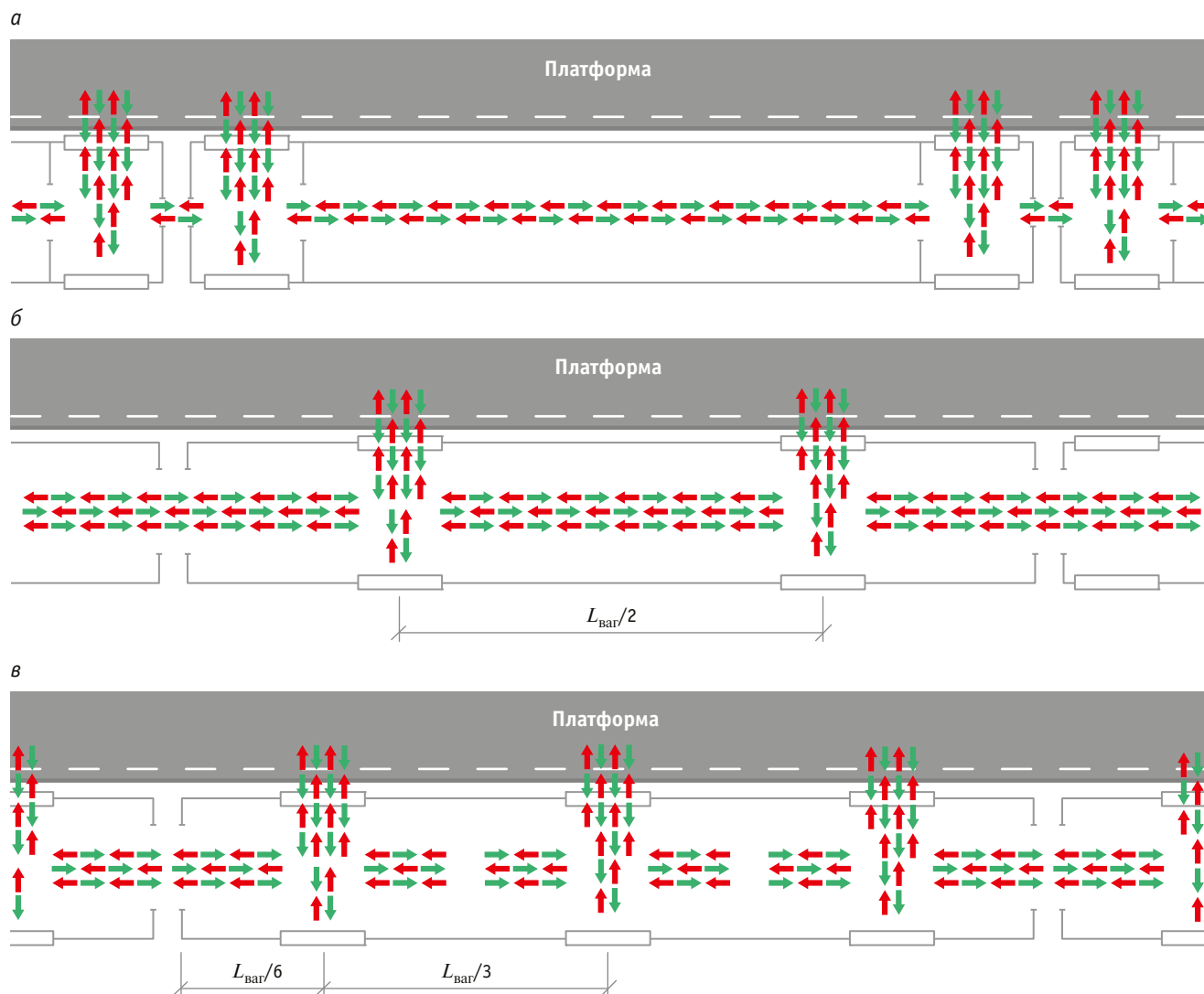


Рис. 1. Типы планировки вагонов моторвагонного подвижного состава во внутригородском сообщении

движение и сокращение времени в пути для всех участников транспортного процесса.

Таким образом, развитая топология транспортной сети не только улучшает доступность и удобство поездки, но также способствует эффективному использованию транспортной инфраструктуры и снижению ее нагрузки.

Исходя из вышеизложенного формируется алгоритм организации движения внутригородских поездов, представленный на рис. 2.

При разработке модели прогнозирования учитываются факторы, заложенные в программах социально-экономического развития страны и регионов, параметры развития железнодорожного и альтернативных видов транспорта, а также соответствующие изменения условий рынка пассажирских перевозок.

К факторам снижения объема перевозок относятся оптимизация эксплуатационных расходов перевозчиков; рост уровня автомобилизации населения, конкуренция со стороны автобусного транспорта, сокращение численности населения.

К факторам роста объема перевозок относятся миграция населения, генеральные схемы развития крупных железнодорожных узлов, рост подвижности населения, критический уровень загрузки автодорог.

На первоначальном этапе анализируются статистическая отчетность, расписание движения, проводятся маркетинговые исследования. Далее определяются доли перевозок пассажиров альтернативными видами транспорта в общем объеме перевозок транспортной системой, а также выполняется мониторинг аналогичных проектов исследования пассажирских перевозок альтернативными видами транспорта.

По полученным данным об объемах перевозок пассажиров железнодорожным и альтернативными видами транспорта разрабатываются корреляционно-регрессионные и эконометрические модели прогнозирования перевозок без учета проектов развития внутригородского железнодорожного движения на основе перспектив социально-экономического развития региона и транспортной системы страны.

На следующем этапе рассчитываются доли пассажиров, которых планируется привлечь с других видов транспорта. При этом учитываются возможные изменения в распределении пассажиропотоков между видами транспорта. Эти изменения могут произойти вследствие модификации маршрутной сети, требований к интервалам движения, графиков движения поездов, классов транспортного обслуживания, времени в пути и общих транспортных затрат. На основании полученных результатов прогнозируются объемы пассажирских перевозок и определяется перспективная густота пассажиропотока.

На последнем этапе на основании анализа качественных и технико-эксплуатационных характеристик перспективного подвижного состава строится модель расчета перспективных размеров движения по сообщениям и корреспонденциям.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВНУТРИГОРОДСКОГО ДВИЖЕНИЯ

В настоящее время в Центральном транспортном узле (ЦТУ) успешно реализованы проекты внутригородского движения: Московское центральное кольцо, МЦД-1 Одинцово — Лобня,

МЦД-2 Подольск — Нахабино, МЦД-3 Зеленоград — Раменское, МЦД-4 Железнодорожная — Апрелевка. В 2023 г. пассажиропоток ЦТУ составил 747 млн пасс., или 73 % от всего пассажиропотока на сети ОАО «РЖД». Данный опыт реализации внутригородского движения необходимо проецировать на другие агломерации Российской Федерации с развитой топологией сети железных дорог.

Например, в Санкт-Петербургской агломерации перспективное развитие внутригородских перевозок определено «Концепцией по развитию железнодорожной инфраструктуры в целях организации пригородных и внутригородских пассажирских перевозок в Санкт-Петербургском железнодорожном узле» [7]. В рамках Концепции предполагается организация двух внутригородских маршрутов: Ораниенбаум — Белоостров (через аэропорт Пулково) и Токсово — Гатчина-Варшавская (интервал движения на каждом маршруте до 20 мин) с комплексной реконструкцией северного полукольца. В рамках Концепции уже реализовано тактовое движение на следующих маршрутах:

Санкт-Петербург-Витебский — Павловск (дата запуска 12.12.2022 г., интервал в час пик 10 мин);

Санкт-Петербург-Балтийский — Ораниенбаум (дата запуска 22.05.2023 г., интервал в час пик 15 мин);

Санкт-Петербург-Балтийский — Красное Село (дата запуска 11.12.2023 г., интервал в час пик 15 мин);

Санкт-Петербург-Финляндский — Мельничный Ручей (дата запуска 27.05.2024 г., интервал в час пик 15 мин).

Кроме того, планируется организация тактового движения до станций Гатчина-Варшавская, Выборг, Сестрорецк, Тосно.

Кроме того, в настоящее время ОАО «РЖД» совместно с Правительством Российской Федерации в рамках Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации прорабатывают стратегическое направление Рабочей группы № 2 «Агрессивное развитие инфраструктуры» и для других городов. Одна из задач этого направления — формирование интегрированных транспортных сетей путем слияния городских пространств с пригородными зонами в рамках инициативы № 3 «Мобильный город».

Проект предусматривает создание новых транспортных продуктов в семи крупнейших мегаполисах России (рис. 3) — Нижнем Новгороде, Краснодаре, Уфе, Самаре, Казани, Екатеринбурге и Новосибирске. Там будет улучшена транспортная доступность аэропортов федерального значения Курумоч (Самара), Казань, Пашковский (Краснодар), Кольцово (Екатеринбург), Толмачево (Новосибирск), а также увеличен уровень интеграции железнодорожного транспорта с городской транспортной системой за счет сокращения интервалов движения, создания новых остановочных пунктов и транспортно-пересадочных узлов.

Исходя из топологии транспортной сети и социально-экономического развития агломерации внутригородские перевозки при соответствующем развитии железнодорожной инфраструктуры могут быть реализованы в Перми, Красноярске, Сочи, Ростове-на-Дону, Владивостоке, Южно-Сахалинске, а в долгосрочной перспективе — в таких крупных агломерациях, как Саратов, Волгоград, Челябинск, Иркутск, Ярославль и др.

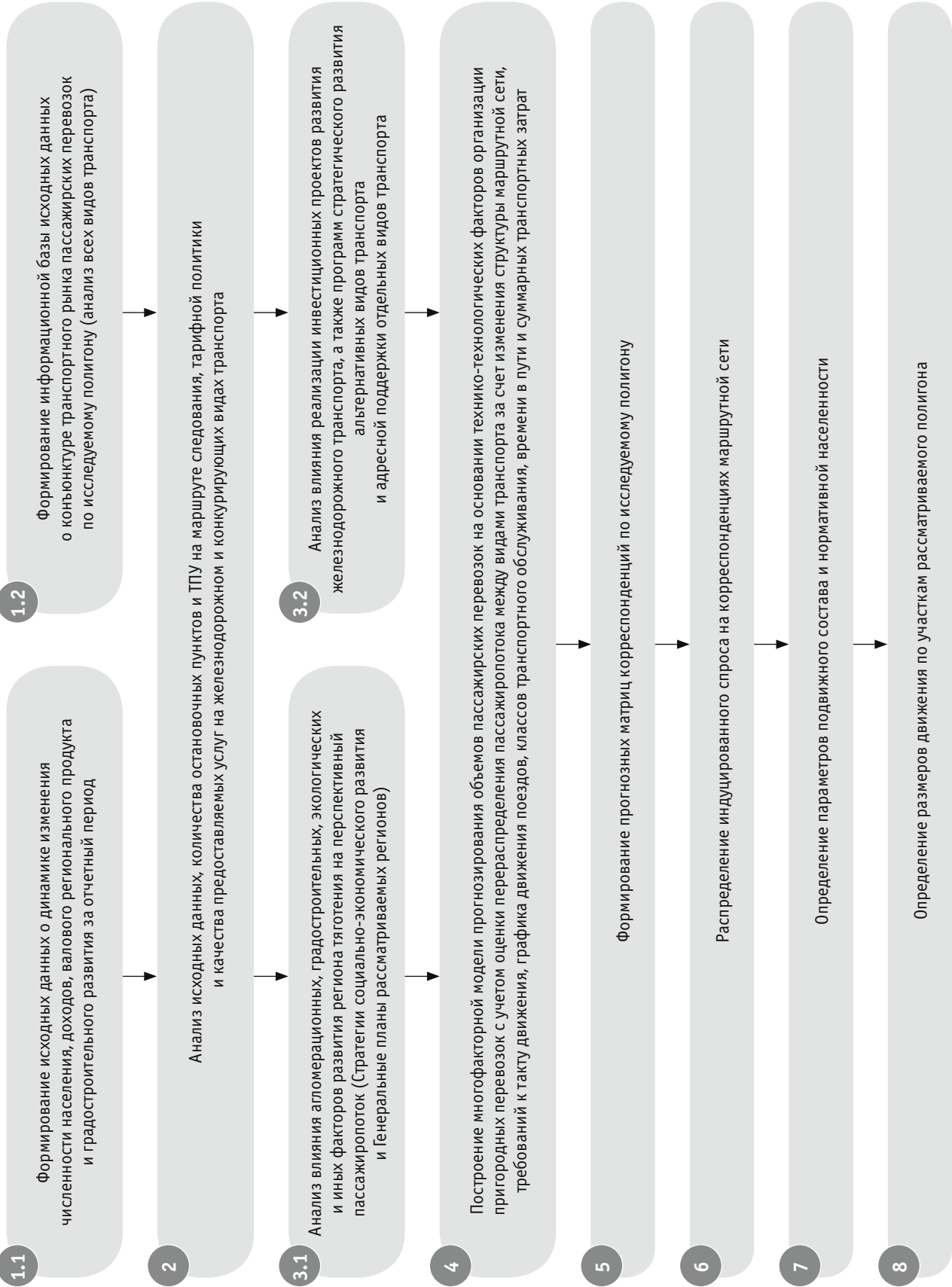


Рис. 2. Алгоритм определения параметров движения внутригородских поездов

[illegible]

Map of the city of Yekaterinburg and its surrounding areas, showing the city center, the city limits, and the surrounding districts. The map includes labels for various districts and landmarks, such as the city center, the city limits, and the surrounding districts. The map also shows the city's location relative to the surrounding districts and landmarks.

[illegible]

8

Суммарная численность населения агломераций, в которых предполагается внедрение нового транспортного продукта — городской электрички, составит порядка 56,3 млн чел. (40 % от общей численности населения Российской Федерации).

Определение характеристик внутригородского сообщения, таких как график движения поездов, периодичность курсирования, класс транспортного обслуживания, тип подвижного состава, — важный элемент планирования и управления транспортной инфраструктурой, который позволяет обеспечить эффективную и удобную мобильность для жителей агломераций,

улучшить связь с городскими центрами, сократить время в пути и уменьшить дорожные заторы.

С увеличением плотности населения и ростом потока пассажиров возникает необходимость совершенствования городского общественного транспорта. Это включает в себя не только развитие сети метро, расширение сети автобусных маршрутов, трамваев, но и преобразование пригородного железнодорожного транспорта во внутригородской, что позволит улучшить качество транспортного обслуживания пассажиров.

Сведения об авторе:

Ильдар Фавилович Мустафин,

начальник отдела развития пригородных пассажирских перевозок АО «Институт экономики и развития транспорта»

Author's information:

Ildar F. Mustafin,

Head of Suburban Passenger Transportation Development Department, Institute for Transport Economics and Development JSC

Литература

1. Правдин Н. В., Негрей В. Я. Прогнозирование пассажирских потоков (методика, расчеты, примеры). Москва : Транспорт, 1980. 222 с.
2. Пазойский Ю. О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, 2000. 229 с.
3. Организация пригородных железнодорожных перевозок / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, А. В. Колин [и др.]. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 270 с.
4. Бородин А. Ф., Мустафин И. Ф., Николаев К. Ю. Принципы определения эффективных параметров организации движения поездов в пригородно-городском сообщении с учетом дифференциации классов транспортного обслуживания // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т. 80. № 2. С. 108–117. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-108-117.
5. О критериях определения категорий поездов для перевозки пассажиров в зависимости от скорости их движения и расстояния следования : приказ Минтранса России от 28.06.2021 г. № 213. URL: <https://base.garant.ru/402783498> (дата обращения: 17.11.2024).
6. О нумерации поездов для графика движения : распоряжение ОАО «РЖД» от 05.04.2014 г. № 859р. URL: <https://base.garant.ru/70638506> (дата обращения: 14.01.2021).
7. Концепция по развитию железнодорожной инфраструктуры в целях организации пригородных и внутригородских пассажирских перевозок в Санкт-Петербургском железнодорожном узле. URL: <http://iedt.ru/projects/316> (дата обращения: 17.11.2024).

References

1. Pravdin N. V., Negrey V. Ya. Passenger flow forecasting (methodology, calculations, examples). Moscow : Transport, 1980. 222 p. (In Russian).
2. Pazoyskiy Yu. O. Optimization of the parameters of the system for the development of suburban passenger traffic in a megapolis : DSc in Engineering Thesis. Moscow, 2000. 229 p. (In Russian).
3. Pazoyskiy Yu. O., Vakulenko V. P., Kolin A. V. [et al.]. Organization of suburban railway transportation. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 270 p. (In Russian).
4. Borodin A. F., Mustafin I. F., Nikolaev K. Yu. Principles for determining effective parameters for organizing train traffic in suburban-urban traffic, taking into account the differentiation of service classes. *Russian Railway Science Journal*. 2021. Vol. 80. No. 2. Pp. 108–117. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-2-108-117. (In Russian).
5. On the criteria for determining the categories of trains for the transport of passengers depending on their speed and distance of travel : the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 28.06.2021 No. 213. URL: <https://base.garant.ru/402783498> (access date: 17.11.2024). (In Russian).
6. On the numbering of trains for the timetable the Order of the JSC «Russian Railways» dated 05.04.2014 No. 859r. URL: <https://base.garant.ru/70638506> (access date: 14.01.2021). (In Russian).
7. The concept for the development of railway infrastructure in order to organize suburban and intercity passenger transportation in the St. Petersburg railway hub. URL: <http://iedt.ru/projects/316> (access date: 17.11.2024). (In Russian).

Объем статьи 0,86 авторских листа



Научная статья
УДК 65.011.56

Методология интеллектуального управления дорожным движением с учетом изменения погодных условий

Игорь Николаевич Пугачев¹, Николай Геннадьевич Шешера², Денис Евгеньевич Григоров²

¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

²Дальневосточный юридический институт МВД России им. И. Ф. Шилова, Хабаровск, Россия

Methodology of intelligent traffic control taking into account changing weather conditions

Igor N. Pugachev¹, Nikolay G. Sheshera², Denis E. Grigorov²

¹Khabarovsk Federal research center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

²Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I. F. Shilov, Khabarovsk, Russia

Аннотация

С развитием цифровых технологий появились новые возможности сбора и обработки информации. Эти данные стали важной частью жизнеобеспечения, в том числе для организации и безопасности дорожного движения.

Известно, что развитие страны во многом зависит от эффективности использования автомобильного транспорта внутри населенных пунктов и для взаимодействия регионов друг с другом. Такая эффективность определяется бесперебойным функционированием улично-дорожной сети, перепусканием автомобильных и пешеходных потоков с максимальной производительностью на основе данных о транспортных характеристиках. Важнейшим показателем качества транспортного узла является интенсивность автомобильного потока, который рассчитывается и обобщается для формирования модели светофорного регулирования в пределах населенного пункта. При этом изменения режимов движения из-за погодных условий не учитываются.

В статье предложена концепция централизованного светофорного регулирования населенного пункта. Представлен разработанный алгоритм информационной поддержки центрального аппарата прогнозом погоды, на основе которого строится прогноз интенсивности транспортного потока. Для этой цели используется модель, обученная методом глубокого обучения.

Научной новизной исследования является комплексный подход к моделированию интенсивности транспортного потока в зависимости от погодных и природных условий, направленный на эффективное управление дорожным движением и включающий в себя автоматизацию процесса сбора и обработки данных.

Цель работы заключается в создании эффективной и с научной точки зрения взвешенной программной поддержки центрального аппарата управления дорожным движением.

Ключевые слова: организация дорожного движения, прогноз погоды, метод глубокого обучения

Abstract

With the development of digital technologies, new opportunities for collecting and processing information have emerged. Data has become an important part of life support, including in the field of organization and road safety.

The development of a country depends on the effectiveness of interaction between its regions using road transport. This efficiency is determined by the uninterrupted functioning of the road network, bypassing vehicular and pedestrian flows with maximum performance based on data on transport characteristics. The most important indicator of the quality of a transport hub is the intensity of traffic flow, which is calculated and generalized to form a model of traffic light regulation within a populated area. This does not take into account changes in driving patterns due to weather conditions.

This article proposes the concept of centralized traffic light regulation of a populated area. An algorithm has been developed for information support of the central office with a weather forecast, on the basis of which a forecast of traffic flow intensity is built. For this purpose, a model trained by deep learning is used.

The scientific novelty of the study is a comprehensive approach to modeling the intensity of traffic flow from weather and natural conditions for the purpose of effective traffic management, which includes automation of the process of data collection and processing.

The aim of the work is to create an effective and scientifically balanced software support for the central apparatus of traffic management.

Keywords: traffic management, weather forecast, deep learning method

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-10-16

Для обеспечения безопасности дорожного движения необходимо реализовать комплекс мероприятий по эффективному взаимодействию пешеходов и автомобилей в безаварийном режиме. Концепция распределения участников дорожного движения должна учитывать интересы конфликтующих потоков и предоставить возможность беспрепятственного движения отдельно едущего автомобиля из пункта А в пункт Б с максимальной скоростью [1]. Для этого разрабатывают эффективные системы светофорного регулирования, которые учитывают интересы всей улично-дорожной сети (УДС) населенного пункта. Алгоритм перепуска автомобилей и пешеходных потоков заключается в сбивании их в «пачки», чтобы обеспечить беспрепятственное движение «зеленой волны». Для этого проводят научно-исследовательские работы по анализу пропускных возможностей и технических потребностей дорог населенного пункта. Разработанный алгоритм распределения автомобильных потоков строится на основе суточного изменения транспортных характеристик. Например, на одном светофорном объекте утром комбинации фаз имеют одни временные интервалы для каждого сигнала, а вечером — другие.

Такие принципы организации дорожного движения не корректируются с изменением транспортных характеристик в случае дорожных работ, ДТП или изменения погодных условий, приводящих к ухудшению видимости, снижению коэффициента сцепления в результате обильных осадков и т.п. [2]. Именно поэтому целью исследования, представленного в статье, стало создание эффективной и с научной точки зрения взвешенной программной поддержки центрального аппарата управления дорожным движением.

В некоторых городах России для решения этой проблемы применяется адаптивное светофорное регулирование. Перед пересечением проезжей части при помощи специализированных датчиков или на основе использования аналитической обработки видеопотока с камер наблюдения определяется интенсивность транспортного потока. Исходя из полученных значений меняются режимы работы светофорного объекта. Эта технология находится в стадии развития.

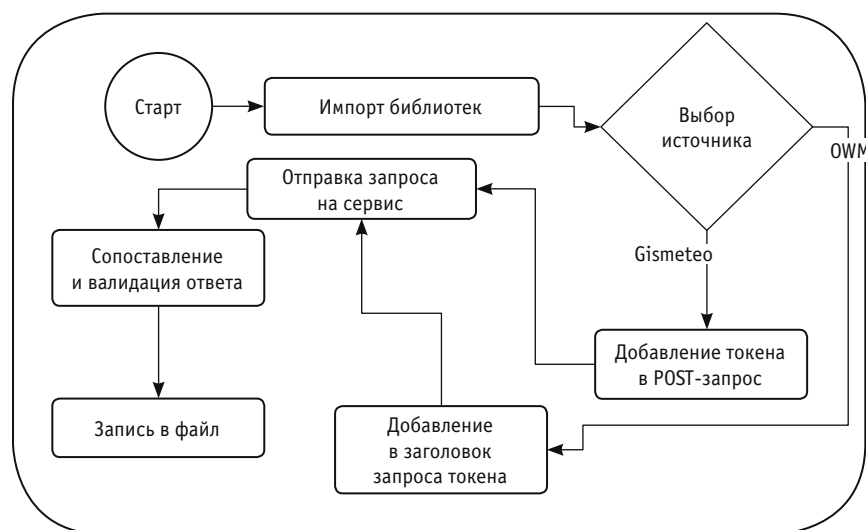


Рис. 1. Блок-схема программы запроса данных с ресурсов OpenWeatherMap и Gismeteo

Максимальной эффективности можно добиться только при переходе всех светофорных объектов населенного пункта на адаптивный режим и на автоматизированное интеллектуальное централизованное управление. Собирая данные перед светофорным объектом, вычислительное устройство будет оценивать аналогичную информацию с других объектов управления и давать команды с учетом пропускных возможностей всей УДС [3].

Централизованное автоматизированное управление может распределять транспортные потоки с учетом данных, поступающих от различных информационных ресурсов, и в результате анализа обеспечивать безопасность дорожного движения.

Погодно-климатические условия значительно меняют сложившиеся режимы движения. Прогноз погоды составляется на основе сбора, анализа и интерпретации метеорологических данных, таких как температура, давление, влажность, направление ветра, осадки и т.п. Для прогноза используются метеорологические модели, которые учитывают текущее состояние атмосферы и ее вероятное развитие в ближайшем будущем. В зависимости от метеорологических условий прогноз может быть составлен на период от нескольких часов до нескольких недель.

Использование данных прогноза погоды позволяет корректировать систему управления УДС. Но для этого необходимо определить транспортные харак-

теристики с позиции погодных изменений и сформировать модель. Также необходимо обеспечить центральный аппарат управления систематическим пополнением данных о погодных условиях.

Для этих целей была разработана программа автоматизированного сбора данных с электронных ресурсов OpenWeatherMap и Gismeteo [4] — популярных онлайн-сервисов, предоставляющих информацию о погоде. OpenWeatherMap дает возможность пользователю получать данные с метеорологических станций, формирует прогноз погоды на различные временные интервалы, имеет публичный API для использования метеоданных в приложениях и на веб-сайтах. Gismeteo содержит аналогичный функционал, но имеет другие подходы к получению информации. OpenWeatherMap использует сеть метеостанций и прочие открытые источники для составления прогнозов, в то время как Gismeteo основывается на собственных метеорологических измерениях и наблюдениях. Поэтому для повышения точности при реализации программы и комплексного представления о погоде были использованы оба сервиса (рис. 1).

С использованием виртуального окружения среды разработки PyCharm были подготовлены три модуля. Два из них содержат методы для работы с ресурсами OpenWeatherMap и Gismeteo, а третий — команду для вызова первых двух. Каждый

метод реализует функционал получения данных о погодных условиях на территории Хабаровска и их подготовку для записи в табличный процессор Excel.

Для доступа к ресурсу OpenWeatherMap после регистрации был получен цифровой сертификат, позволяющий обращаться к ресурсу в режиме разработчика и использовать установленные на сайте правила обработки информации.

После импорта необходимых для работы библиотек был создан метод process, в котором на первом этапе при помощи цифрового ключа происходит идентификация пользователя, определяется язык взаимодействия и населенный пункт, с которого необходимо получить данные о погоде.

Кроме того, была сформирована структура промежуточного слоя данных, состоящего, согласно архитектуре OpenWeatherMap, из переменных различного типа, которые используются в функциональных алгоритмах обработки [4, 5].

Полученная информация была подготовлена для записи в табличный процессор Excel.

По аналогии с OpenWeatherMap для работы с Gismeteo в режиме разработчика от администраторов ресурса получен цифровой сертификат (X-Gismeteo-Token). Обращение к API-сервису Gismeteo осуществляется через протокол HTTP/2 с использованием правил архитектурного стиля REST и передачей цифрового сертификата в заголовке пакета, что позволяет на этапе реализации алгоритмов приложения исключить партикулярные (неофициальные) и непроверенные источники данных.

Данные API-сервиса Gismeteo имеют формат JSON, с учетом этой особенности созданы переменные для каждой климатической характеристики.

На основе созданных переменных по аналогии с OpenWeatherMap информация, полученная от API-сервиса Gismeteo, была подготовлена для записи в табличный процессор Excel.

После создания методов process для получения данных с OpenWeatherMap и Gismeteo и записи в файл Excel была написана команда их вызова с целью одновременного выполнения.

Для проверки программы модули виртуального окружения объединены в один исполняемый файл exe командой pyinstaller, на запуск которого через каждый час был настроен планировщик задач операционной системы вычислитель-

ного устройства. Таким образом был автоматизирован процесс сбора данных о погодных условиях на территории Хабаровска с веб-ресурсов OpenWeatherMap и Gismeteo (рис. 2).

Разработанная программа позволяет не только пополнять банк данных центрального аппарата управления дорожным движением [6]: представленный код написан на языке программирования Python, что дает возможность интегрировать его в программу построения прогнозов транспортных процессов. Полный код программы размещен в публичном доступе на портале GitLab (<https://git.idapp.ltd/glfs/collector-weather>).

Методом машинного обучения в среде разработки PyCharm модель была обучена для прогноза интенсивности транспортного потока в зависимости от некоторых характеристик системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» (ВАДС), в том числе от погодных условий [7, 8]. Использован метод глубокого обучения. Полный код программы приведен на портале GitHub (https://github.com/glowfisch8lan/road_neural_network). Метод глубокого обучения основан на применении искусственных нейронных сетей для обучения компьютерных систем на большом количестве данных.

Компьютерные системы могут самостоятельно извлекать высокоуровневые признаки из набора данных, что помогает им эффективно решать широкий спектр задач. Одно из основных преимуществ метода глубокого обучения — способность работать с массивными объемами данных и извлекать из них сложные закономерности, что позволяет создавать более точные и эффективные модели.

При изучении влияния погодных условий на интенсивность транспортного потока использовалась статистика часовых интервалов времени с метеорологической станции Хабаровск, интенсивность транспортного потока исследовалась на территории Хабаровска. Данные для анализа и обучения модели собраны программно-аппаратным комплексом системы Интегра-КДД, которая имеет 107 рубежей контроля.

Для получения единой модели можно объединить данные со всех 107 рубежей. Однако метод глубокого обучения чувствителен к обобщению признаков, так как существуют неучтенные параметры, отличающие рубежи контроля друг от друга. Поэтому для каждого из них была создана собственная прогно-

Время, ч:м:с	Тем., t°C	Темп., max, t°C	Темп., min, t°C	Ощущается, t°C	Temp_kf, t°C	Давление, гПа	Отн. влажность, %	Процент облачности	Инф. об осадках, мм	Скорость ветра, м/с	Напр. ветра, град.	Расст. видимости, м
8:57:41	-12.4	-12.11	-12.36	-12.36		1016	60	0	{'lh': 0.35}	0	0	10000
10:00:02	-12.4	-12.11	-12.36	-12.36		1014	66	20	{}	0.89	10	10000
10:58:20	-13.5	-13.11	-13.47	-17.74		1013	78	0	0	1.79	350	10000
12:00:01	-13.5	-13.11	-13.47	-17.74		1013	71	0	{'lh': 0.18}	1.79	340	10000
13:00:01	-13.5	-13.11	-13.47	-19.85		1012	78	40	{'lh': 0.65}	3.13	20	10000
13:56:04	-14.6	-14.11	-14.58	-21.58		1011	84	40	{}	4.02	10	4000
15:58:24	-14.6	-14.11	-14.58	-21.58		1008	84	75	{'lh': 0.42}	4.92	360	2000
16:59:59	-13.5	-13.11	-13.47	-20.47		1007	84	90	{'lh': 0.56}	5.81	360	2200
17:57:03	-13.5	-13.11	-13.47	-20.47		1005	84	90	{'lh': 0.74}	7.15	350	1700
18:58:03	-13.5	-13.11	-13.47	-20.47		1003	84	90	{'lh': 0.77}	8.05	360	1800
19:59:58	-11.3	-11.11	-11.25	-18.25		1002	85	90	{'lh': 0.81}	7.15	360	1600

Рис. 2. Результат записи данных в Excel

стическая модель, что позволило охарактеризовать интенсивность транспортного потока не только с позиции погодных условий, но и по геометрическим элементам дорог, при которых работает рубеж [4, 9].

Построена структура нейронной сети, в которой экспериментальным подбором количества скрытых слоев и нейронов в каждом из них подобрана наилучшая точность прогноза после обучения. Аналогичным способом определены функции активации в каждом слое [10].

При обучении статистические данные поступают в нейронную сеть, используя входной слой, где через функции активации переходят на другой (скрытый) слой и т.д. (рис. 3).

На каждом таком этапе определяется вес нейронов. После прохождения скрытых слоев данные обрабатываются на выходном слое, где программа интерпретирует веса, значения прогноза и реальные значения, запоминает свою ошибку, изменяя коэффициент, и с новыми весовыми значениями повторно

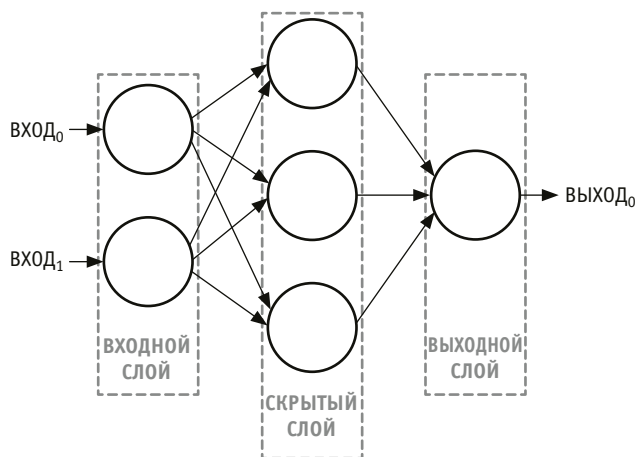


Рис. 3. Схема обработки данных в нейронной сети

Таблица 1

Прогноз интенсивности

День недели: 1 — пн., 2 — вт., 3 — ср. и т.д.	Время суток, ч	Температура воздуха, °С	Температура почвы, °С	Температура точки росы, °С	Парциальное давление, Па	Влажность воздуха, %	Видимость (шифр), VV	Дефицит насыщения, г/м ³	Давление над уровнем моря, гПа	Погода (шифр), ww	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с	Осадки, мм	Естественное освещение: 0 — ночь, 1 — день.	Фактическая инт., авт/ч	Прогноз интенсивности, интервал, авт/ч
4	0	-15	-17	-21	1	61	0	1	1014.2	2	54.33	0	0	0	111	0-250
4	1	-16	-17	-21	1	68	0	1	1014	2	0	0	0	0	59	0-250
4	2	-15	-16	-19	1	72	0	1	1014	2	76.33	1	0	0	23	0-250
4	3	-14	-16	-18	2	75	0	1	1014.1	2	152.7	2	0	0	8	0-250
4	4	-13	-15	-16	2	79	0	0	1014.1	70	229	3	0	0	10	0-250
4	5	-14	-15	-17	2	80	0	0	1014.1	70	224.3	4	0	0	6	0-250
4	6	-14	-15	-17	2	81	0	0	1014	70	219.7	4	0	0	15	0-250
4	7	-15	-15	-17	2	82	0	0	1014	71	215	5	0	1	58	0-250
4	8	-16	-16	-19	1	80	0	0	1012.9	71	216	5	0	1	227	251-500
4	9	-18	-17	-21	1	77	0	0	1011.9	71	217	5	0	1	452	251-500
4	10	-19	-18	-22	1	75	98	0	1010.8	71	218	5	0	1	845	1001-1250
4	11	-18	-16	-22	1	73	98	0	1010.5	71	219.7	4	0	1	1072	1001-1250
4	12	-18	-15	-22	1	71	98	0	1010.2	71	221.3	4	0	1	1200	1001-1250
4	13	-17	-13	-21	1	69	98	1	1009.9	22	223	3	0	1	1272	1001-1250
4	14	-17	-14	-21	1	70	98	0	1010	22	220.7	3	0	1	1142	1251-1500
4	15	-17	-14	-21	1	71	98	0	1010.2	22	218.3	4	0	1	896	751-1000
4	16	-16	-15	-20	1	72	97	0	1010.3	71	216	4	0	1	836	1001-1250
4	17	-17	-16	-21	1	72	97	0	1010.4	71	219	4	0	1	1273	1251-1500
4	18	-17	-17	-21	1	71	97	0	1010.6	71	222	4	0	1	537	1001-1250
4	19	-17	-18	-21	1	71	0	0	1010.7	2	225	4	0	1	541	501-750
4	20	-18	-18	-22	1	73	0	0	1011.2	2	223.3	4	0	0	532	251-500
4	21	-19	-18	-22	1	74	0	0	1011.7	2	221.7	4	0	0	327	251-500
4	22	-19	-18	-23	1	76	0	0	1012.2	71	220	4	0	0	192	251-500
4	23	-20	-19	-23	1	77	0	0	1011.8	71	220.7	4	0	0	166	251-500

выполняет итерацию, пропуская данные через все этапы нейронных преобразований [11]. Так программа уточняет коэффициенты, сравнивая значения прогноза с реальными данными и используя метрику ассигасу — показатель точности или верности результатов.

Для реализации алгоритмов использовалась надстройка библиотеки TensorFlow (открытая библиотека глубокого обучения) — Keras, которая обладает большим перечнем инструментов по проверке, подготовке, очистке и представлению данных, необходимых для повышения точности.

После завершения обучения в модели для прогноза интенсивности транспортного потока веса нейронов сохраняются.

Из существующих методов прогноза использовался метод классификации. Класс — это интервал интенсивности с шагом 250 авт/ч. Для улучшения метрики ассигасу можно увеличить ширину интервала, но тогда детализация классификации уменьшится.

В результате обучения не все рубежи имели достаточную точность прогнозирования. В среднем ассигасу составил около 60 %. Это значит, что из 100 % модель способна безошибочно спрогнозировать только 60 %. Но будет неправильным утверждать, что результат нельзя считать информативным для использования.

После обучения модели с применением нейронной сети был выполнен пробный прогноз для оценки точности. Использовалась выборка независимых признаков за одни сутки. Результат прогноза приведен в табл. 1.

Организация и безопасность дорожного движения — сложный динамический процесс сбалансированного движения транспортных и пешеходных потоков. Для достижения их гармонии в безаварийном режиме необходимы четкое распределение направлений движения и централизованное интеллектуальное управление для экстренного изменения режимов работы объектов управления с учетом изменения условий функционирования УДС под влиянием погодных условий [12].

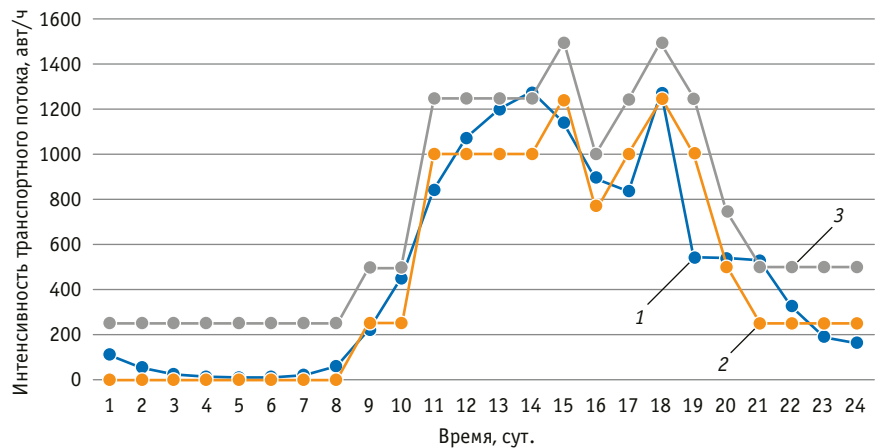


Рис. 4. Анализ точности прогноза на тестовых данных:

1 — фактическая интенсивность; 2 — нижний порог прогностического интервала; 3 — верхний порог прогностического интервала

Важным показателем качества движения является интенсивность транспортного потока. Именно этот параметр оценивался с позиции погодных условий при различных геометрических элементах дорог.

Современные информационные центры больших городов создают платформу для организации адаптивного программного управления светофорными объектами. Задача центрального аппарата — проанализировать поступающую информацию, обработать ее с учетом существующих прогностических моделей и дать команды по управлению ими [13].

Для развития прогноза интенсивности транспортных потоков методом машинного обучения была разработана программа автоматизированного запроса к веб-ресурсам OpenWeatherMap и Gismeteo с целью получения независимых переменных для классификации зависимого признака. Методом глубокого обучения разработана прогностическая модель со средним показателем ассигасу 60 %. При обучении модели использована статистика программно-аппаратного комплекса системы Интегра-КДД и метеорологической станции Хабаровск [14, 15].

Интерпретация результатов на графике позволяет сделать вывод о достаточности прогноза для принятия решений по управлению (см. табл. 1, рис. 4).

На рис. 4 построен прогностический коридор шириной интервала зависимого признака 250 авт/ч. Фактические значения интенсивности находятся если не внутри, то около него. Это значит, что если программа ошиблась с прогнозом интервала интенсивности, то нужный — это следующий или предыдущий интервал. Неточность модели 40 % можно считать незначительной для исследуемого показателя с учетом высокой динамики его изменения.

Как уже было отмечено, метод глубокого обучения чувствителен к детализации обучающих данных, и низкая точность, скорее всего, связана с неучтенными признаками.

Тем не менее разработанная интеллектуальная программная поддержка центрального аппарата управления дорожным движением с теоретической точки зрения обоснована, а эффективность алгоритмов информационного обеспечения погодными условиями для прогноза интенсивности транспортных потоков методом глубокого обучения доказана.

Отличительная особенность предложенной методологии состоит в полной автоматизации работы с данными — от сбора независимых переменных до прогноза интенсивности транспортного потока. Это позволит в процессе работы программы уточнять существующие математические модели под новые условия функционирования УДС.

Сведения об авторах:

Игорь Николаевич Пугачев,

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Николай Геннадьевич Шешера,

кандидат технических наук, доцент кафедры информационного и технического обеспечения ОВД Дальневосточного юридического института МВД России имени И. Ф. Шилова

Денис Евгеньевич Григоров,

начальник кабинета специальных дисциплин кафедры информационного и технического обеспечения ОВД Дальневосточного юридического института МВД России имени И. Ф. Шилова

Authors information:

Igor N. Pugachev,

DSc in Engineering, Associate Professor, Deputy Director for scientific work, Khabarovsk Federal research center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Nikolay G. Sheshera,

PhD in Engineering, Associate Professor of Information and Technical Support of Internal Affairs Bodies Department, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I. F. Shilov

Denis E. Grigorov,

Head of office of special disciplines of Information and Technical Support of Internal Affairs Bodies Department, Far Eastern Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after I. F. Shilov

Литература

1. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г., Григоров Д. Е. Совершенствование системы безопасности дорожного движения, стремящейся к нулевой смертности на автомобильных дорогах : монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2024. 183 с.
2. Управление безопасностью дорожной инфраструктуры / И. Н. Пугачев, А. В. Каменчуков, Д. В. Капский [и др.]. Хабаровск, 2022. 147 с.
3. Пугачев И. Н., Каменчуков А. В., Нестерова Н. С. Эксплуатация автомобильных дорог. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2022. 168 с.
4. Пугачев И. Н., Скрипко П. Б., Шешера Н. Г. Программный подход к комплексному сбору и подготовке данных об интенсивности движения транспортных средств, погодных условий и естественной освещенности в часовых интервалах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 10. С. 43–51. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-10-43-51.
5. Руденко Н. В. Характеристики дорожного движения по автомобильным дорогам и методы оценки безопасности дорожного движения // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2022. Т. 7. № 3-3 (25). С. 100–106.
6. Батищева О. М., Ганичев А. И., Старикова А. Г. Факторы, влияющие на обеспечение безопасности дорожного движения в крупных городах // Вестник транспорта Поволжья. 2023. № 2 (98). С. 110–115. ISSN 1997-0722.
7. Бакланова К. В. Влияние параметров транспортного потока и характеристик дорог на безопасность дорожного движения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 2. С. 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99.
8. Мосин К. К., Ковалевский В. Э., Жукова Н. А. Использование методов автоматизированного машинного обучения для классификации дорожно-транспортных происшествий // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2023. № 2 (34). С. 15–26. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-234-15-26.
9. Конончук Э. В., Ермоленко Т. В., Шишунов Т. О. Модели машинного обучения для оценки вероятности появления ДТП и его серьезности // Проблемы искусственного интеллекта. 2022. № 1 (24). С. 4–12. ISSN 2413-7383.
10. Арутюнян М. А. Разработка алгоритмического аппарата по обеспечению безопасности дорожного движения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 3 (42). С. 9–10. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.013.

References

1. Pugachev I. N., Sheshera N. G., Grigorov D. E. Improving the road safety system striving for zero mortality on highways. Khabarovsk : Publishing House of FASTU, 2024. 183 p. (In Russian).
2. Pugachev I. N., Kamenchukov A. V., Kapsky D. V. [et al.]. Road infrastructure safety management. Khabarovsk, 2022. 147 p. (In Russian).
3. Pugachev I. N., Kamenchukov A. V., Nesterova N. S. Operation of highways. Khabarovsk : Publishing House of FASTU, 2022. 168 p. (In Russian).
4. Pugachev I. N., Skripko P. B., Sheshera N. G. A software approach to the integrated collection and preparation of data on vehicle traffic intensity, weather conditions and natural light at hourly intervals. *T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2023. Vol. 17. No. 10. Pp. 43–51. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-10-43-51. (In Russian).
5. Rudenko N.V. Characteristics of traffic on highways and methods for assessing road safety. *International Journal of Information Technology and Energy Efficiency*. 2022. Vol. 7. No. 3-3 (25). Pp. 100–106. (In Russian).
6. Batishcheva O. M., Ganichev A. I., Starikova A. G. Factors influencing road safety in large cities. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2023. No. 2 (98). Pp. 110–115. ISSN 1997-0722. (In Russian).
7. Baklanova K. V. Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety. *Intelligence. Innovation. Investments*. 2023. No. 2. Pp. 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99. (In Russian).
8. Mosin K. K., Kovalevsky V. E., Zhukova N. A. Automated Machine Learning Methods for Traffic Accidents Classification. *Intelligent Technologies in Transport*. 2023. No. 2 (34). Pp. 15–26. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-234-15-26. (In Russian).
9. Kononchuk E. V., Ermolenko T. V., Shishunov T. O. Machine learning models for assessing the probability of accident and its severity. *Problems of artificial intelligence*. 2022. No. 1 (24). Pp. 4–12. ISSN 2413-7383. (In Russian).
10. Arutiunian M. A. Development of an algorithmic apparatus to ensure road safety. *Modeling, optimization and information technology*. 2023. Vol. 11. No. 3 (42). Pp. 9–10. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.013. (In Russian).

11. Пушкарева Г. В., Халтурин Д. Д. Анализ методов повышения безопасности движения на нерегулируемых перекрестках крупных городов (на примере города Томска) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 198–223. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-198-223.
12. Анализ климатических условий посредством аппарата матрицы переходных вероятностей / Э. С. Шаршеев, Б. М. Жакеев, У. Т. Чоротмбаев, И. Д. Базарбаева // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 3. С. 25–33. ISSN 1694-8483.
13. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г., Щеглов В. И. Анализ геометрических элементов дорог с помощью современных геоинформационных систем при оценке их аварийности // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 127–133. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-127-133.
14. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г. Применение методов статистического анализа для оценки параметров транспортных потоков и характеристик улично-дорожной сети. Хабаровск : РИО ДВЮИ МВД России, 2020. 108 с.
15. Пугачев И. Н., Шешера Н. Г. Применение методики коэффициентов травматизма в целях контроля качества будущих и эксплуатируемых дорог // Качество и жизнь. 2016. № 1 (9). С. 58–61. ISSN 2312-5209.

11. Pushkareva G. V., Khalturin D. D. Analysis of traffic calming techniques at unsignalized intersections in large cities. *Journal of Construction and Architecture*. 2023. Vol. 25. No. 5. Pp. 198–223. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-5-198-223. (In Russian).
12. Sharsheev E. S., Zhakeev B. M., Chortombaev U. T., Bazarbaeva I. D. Analysis of climatic conditions using the apparatus of a matrix of transition probabilities. *Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*. 2022. No. 3. Pp. 25–33. ISSN 1694-8483. (In Russian).
13. Pugachev I. N., Sheshera N. G., Shcheglov V. I. Analysis of geometric elements of roads when assessing their accident rate by means of modern geoinformational systems. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021. No. 3 (86). Pp. 127–133. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-127-133. (In Russian).
14. Pugachev I. N., Sheshera N. G. Application of statistical analysis methods for assessing the parameters of transport flows and characteristics of the road network. Khabarovsk, 2020. 108 p. (In Russian).
15. Pugachev I. N., Sheshera N. G. Application of the technique of coefficients of the injury in order to control the quality of future and existing roads. *Quality and life*. 2016. No. 1 (9). Pp. 58–61. ISSN 2312-5209. (In Russian).

Объем статьи 0,79 авторских листа

Научная статья

УДК 629.4.027.23: 629.4.015:625.1.03

Интенсивность изнашивания материала колес двухосных тележек вагонов метрополитена при движении в кривых рельсовой колеи

Виктор Федорович Кузнецов¹, Сергей Георгиевич Шантаренко¹, Виктор Васильевич Харламов¹¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Intensity of wear of the material of the wheels of two-axle bogies of subway cars when moving in curves of the rail gauge

Victor F. Kuznetsov¹, Sergey G. Shantarenko¹, Victor V. Kharlamov¹¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

В статье рассмотрено движение вагона метрополитена в кривой заданного радиуса. Получены формулы для расчета скорости и пути проскальзывания точки контакта гребня колеса с рельсом. На основе выражения для глубины проникновения головки рельса в материал гребня колеса выведены формулы для оценки объема, интенсивности и скорости изнашивания в расчете на один оборот колеса. Полученные формулы являются основой расчета интенсивности изнашивания гребня колеса для конкретных участков эксплуатации вагонов метро.

Ключевые слова: силовой контакт, глубина проникновения, скорость проскальзывания, интенсивность изнашивания

Abstract

The article discusses the movement of a subway car in a curve of a given radius. Formulas have been obtained for calculating the speed and slip path of the point of contact between the wheel flange and the rail. Based on the expression for the depth of penetration of the rail head into the material of the wheel flange, formulas are derived for estimating the volume, intensity and rate of wear per one revolution of the wheel. The resulting formulas are the basis for calculating the rate of wear of the wheel flange for specific areas of operation of subway cars.

Keywords: force contact, penetration depth, slip rate, intensity rate

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-17-23

ВВЕДЕНИЕ

Колесная пара считается наиболее уязвимым и ответственным узлом подвижного состава. Безопасность движения поезда во многом зависит от технического состояния колес, определяемого величиной проката, диаметром и толщиной гребня.

Колесные пары поездов метрополитена работают в условиях высоких динамических нагрузок, определяемых большим количеством разгонов, торможений и кривых малого радиуса при движении по перегону. В процессе эксплуатации колесные пары подвижного состава подвергаются естественному износу в виде проката по кругу катания и уменьшения толщины гребня [1].

Проведенные учеными РУТ (МИИТ) исследования надежности колесных пар электропоездов 81-740.1/741.1 «Русич», эксплуатируемых на Арбатско-Покровской, Кольцевой и Бутовской линиях Московского метрополитена, с анализом данных по толщине гребня в реальных условиях эксплуатации показали, что интенсивность изнашивания гребней колес остается высокой, особенно в интервале от 0 до 100 тыс. км пробега [2].

Изнашивание материала контактирующих тел происходит только при наличии их относительного проскальзывания. Величина износа и интенсивность изнашивания во многом зависят от характера относительного скольжения тел, силы их прижатия, геометрической конфигурации тел в точке контакта и физико-механических свойств их материалов. Определяющим параметром характера изнашивания материала при фрикционном трении является глубина взаимного проникновения (сближения) неровностей поверхностей контактирующих тел в области их силового контакта. Такое взаимодействие характерно для контактирующих поверхностей колеса и рельса при движении мотор-вагонного подвижного состава в кривых участках рельсовой колеи. Величины пути и скорости проскальзывания будут различными для колес колесной пары, двигающихся по внутреннему и внешнему рельсу в кривых участках пути.

СКОЛЬЖЕНИЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ПО РЕЛЬСАМ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

Радиус кривой $R_{кр}$ измеряется от ее центра до середины рельсовой колеи. Значения ширины колеи S_p в зависимости от радиуса кривой приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ширина рельсовой колеи в зависимости от радиуса кривой

$R_{кр}$, м	Прямой участок	> 600	600–400	399–125	124–100	< 100
S_p , м	1,520	1,524	1,530	1,535	1,540	1,544

На рис. 1 и 2 представлены схематические изображения и размеры колесной пары и профиля поверхности катания колеса [3].

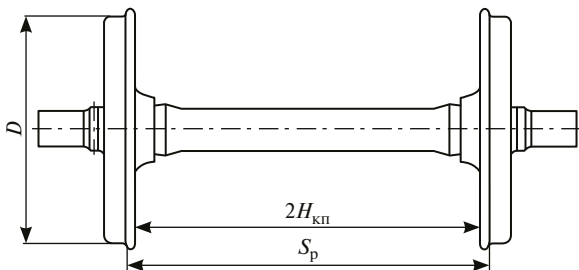


Рис. 1. Колесная пара на рельсовой колеи:

$H_{кп} = 0,720$ м — расстояние от центра колесной пары до внутренней грани колеса; S_p — ширина рельсовой колеи

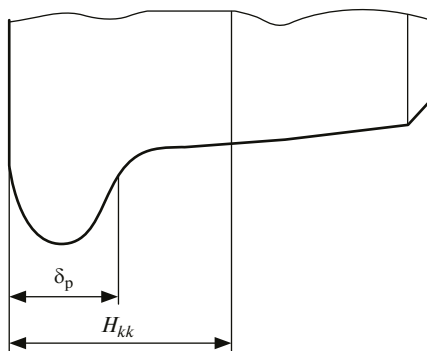


Рис. 2. Профиль поверхности катания колеса

На расстоянии 70 мм от внутренней грани колеса находится воображаемый круг его катания, на котором измеряют диаметр и прокат колеса. Толщину гребня δ_p измеряют на расстоянии 18 мм от его вершины. У новых бандажей она равна 33 мм. Диаметр нового колеса по кругу катания составляет 860 мм.

Нам необходимо получить формулы для расчета протяженности пути и скорости скольжения колес при движении вагона в кривых. При этом следует учитывать, что характер скольжения будет различным для колесных пар моторных и немоторных тележек.

Для моторной тележки колесные пары будут двигаться в кривой с постоянным проскальзыванием колес по внутреннему рельсу. При этом износу по кругу катания в основном будут подвержены колеса,двигающиеся по внутреннему рельсу.

Вращение колесных пар немоторной тележки будет происходить с наличием скольжения (юза) у колес,двигающихся по внешнему рельсу. И у этих колес будет наибольший износ по кругу катания.

Схема движения колесной пары в кривой радиуса $R_{кр}$ представлена на рис. 3.

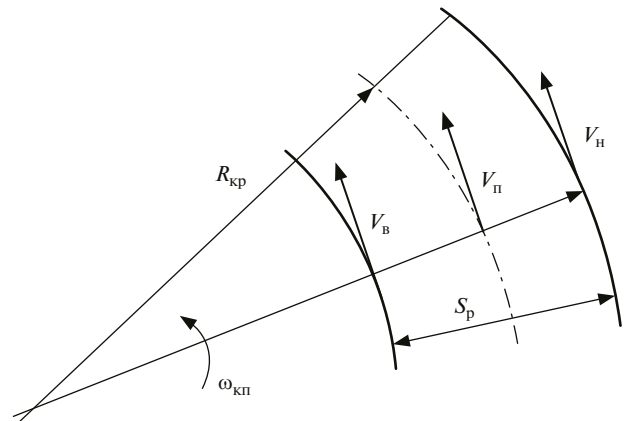


Рис. 3. Движение колесной пары в кривой радиуса $R_{кр}$

СКОЛЬЖЕНИЕ КОЛЕС НЕМОТОРНЫХ ТЕЛЕЖЕК

За счет непогашенных центробежных сил наиболее вероятной для немоторных тележек будет хордовая установка. Следовательно, при движении в кривых колесные пары будут прижаты к внешнему рельсу [4].

Точки кругов катания колес колесной пары движутся по кривым участкам пути с радиусами:
для внешнего колеса

$$R_{н} = R_{кр} + S_{kk} + \Delta_{kk}; \quad (1)$$

для внутреннего колеса

$$R_{в} = R_{кр} - S_{kk} + \Delta_{kk}; \quad (2)$$

где $S_{kk} = H_{кп} + H_{kk}$ — расстояние от центра колесной пары до кругов катания ее колес; $H_{кп} = 0,720$ м — расстояние от центра колесной пары до внутренней грани колеса; $H_{kk} = 0,070$ м — расстояние от внутренней грани колеса до плоскости круга катания.

Смещение центра колесной пары относительно центра рельсовой колеи до контакта гребня колеса с гранью головки рельса Δ_{kk} зависит от толщины гребня δ_p , измеряемой в точке его контакта с гранью головки рельса. Эта величина меняется по мере износа гребня (от 33 до 25) и определяется как

$$\Delta_{kk} = \frac{S_p}{2} - (H_{kk} + \delta_p). \quad (3)$$

Внутреннее колесо будет двигаться без скольжения. Путь, пройденный этим колесом за один оборот,

$$S_B = 2\pi R_{\text{кол}}. \quad (4)$$

Центральный угол, соответствующий этому пути,

$$\varphi = \frac{S_B}{R_B}. \quad (5)$$

При этом внешнее колесо пройдет путь

$$S_H = \varphi R_H = 2\pi R_{\text{кол}} \frac{R_H}{R_B}. \quad (6)$$

Путь скольжения внешнего колеса по рельсу (движение изом) за один оборот колесной пары

$$L_{\text{ск}} = S_H - S_B = 2\pi R_{\text{кол}} \left(\frac{2S_{kk}}{R_B} \right). \quad (7)$$

Путь, пройденный электропоездом за один оборот колесной пары, равен пути, пройденному центром колесной пары,

$$S = \varphi(R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}) = \frac{2\pi R_{\text{кол}}}{R_B} (R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}). \quad (8)$$

Интенсивность скольжения внешнего колеса

$$J_{\text{ск}} = \frac{L_{\text{ск}}}{S} = \frac{2S_{kk}}{R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}}. \quad (9)$$

Скорость движения электропоезда $V_{\text{п}}$ определяется линейной скоростью центра колесной пары.

Угловая скорость вращения колесной пары относительно центра кривой рельсовой колеи

$$\omega_{\text{кп}} = \frac{V_{\text{п}}}{R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}}. \quad (10)$$

Линейная скорость внутреннего колеса

$$V_B = \frac{V_{\text{п}}}{R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}} R_B. \quad (11)$$

Линейная скорость внешнего колеса

$$V_H = \frac{V_{\text{п}}}{R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}} R_H. \quad (12)$$

Внешнее колесо будет двигаться со скоростью скольжения

$$V_{\text{ск}} = V_{\text{п}} \left(\frac{2S_{kk}}{R_{\text{кр}} + \Delta_{kk}} \right). \quad (13)$$

Работа сил трения на пути скольжения за один оборот колесной пары

$$A = P f_{\text{ск}} L_{\text{ск}}, \quad (14)$$

где P — нагрузка на колесо; $f_{\text{ск}}$ — коэффициент трения скольжения.

Интенсивность работы сил трения

$$J_A = \frac{A}{S}. \quad (15)$$

ДВИЖЕНИЕ В КРИВЫХ КОЛЕСНЫХ ПАР МОТОРНОЙ ТЕЛЕЖКИ

Установка тележки и ее колесных пар при движении в кривой определяется действием непогашенных центробежных сил. Силы тяги, развиваемые колесными парами, передаются через буксы к раме тележки и приложены к ее центру, не создавая вращающих моментов. Поперечная составляющая этих сил может только усилить или ослабить силы прижатия гребней колесных пар к внешнему рельсу [5].

Таким образом, при движении моторных тележек в кривых участках пути гребни колесных пар будут прижаты к внешнему рельсу.

Исследуем скольжение колес колесных пар. Согласно формулам (1) и (2), точки кругов катания колес движутся по кривым с радиусами:

для внешнего колеса

$$R_H = R_{\text{кр}} + S_{kk} + \Delta_{kk};$$

для внутреннего колеса

$$R_B = R_{\text{кр}} - S_{kk} + \Delta_{kk}.$$

Внешнее колесо будет двигаться без проскальзывания. Путь, пройденный этим колесом за один оборот колесной пары,

$$S_H = 2\pi R_{\text{кол}}. \quad (16)$$

Центральный угол, соответствующий этому пути,

$$\varphi = \frac{2\pi R_{\text{кол}}}{R_H}. \quad (17)$$

При этом внутреннее колесо пройдет путь

$$S_B = \varphi R_B = 2\pi R_{\text{кол}} \frac{R_B}{R_H}. \quad (18)$$

Путь проскальзывания внутреннего колеса по рельсу

$$L_{\text{пр}} = S_H - S_B = 2\pi R_{\text{кол}} \left(\frac{2S_{kk}}{R_H} \right). \quad (19)$$

Таблица 2

Интенсивность скольжения колеса новой колесной пары

$R_{кр}$, м	>600	600–400	399–125	124–100
S_p , м	1,524	1,530	1,535	1,540
$R_{кр} + \frac{S_p}{2} - 0,742$, м	600,02	500,023	262,025	112,028
$J_{ск}$, мм/мм	0,002633	0,00316	0,00603	0,0141

Путь, пройденный электропоездом за один оборот колесной пары, равен пути, пройденному центром колесной пары,

$$S = \varphi(R_{кр} + \Delta_{kk}) = \frac{2\pi R_{кол}}{R_H}(R_{кр} + \Delta_{kk}). \quad (20)$$

Интенсивность проскальзывания внутреннего колеса

$$J_{пр} = \frac{L_{пр}}{S} = \frac{2S_{kk}}{R_{кр} + \Delta_{kk}}. \quad (21)$$

Скорость движения электропоезда $V_{п}$ определяется линейной скоростью центра колесной пары.

Внешнее колесо будет двигаться без проскальзывания с линейной скоростью

$$V_H = \omega_{кп} R_H = \frac{V_{п}}{R_{кр} + \Delta_{kk}} R_H. \quad (22)$$

Внутреннее колесо будет двигаться с проскальзыванием с линейной скоростью

$$V_B = \frac{V_{п}}{R_{кр} + \Delta_{kk}} R_B. \quad (23)$$

Скорость проскальзывания внутреннего колеса по рельсу

$$V_{пр} = V_{п} \left(\frac{2S_{kk}}{R_{кр} + \Delta_{kk}} \right). \quad (24)$$

Таким образом, мы определили скорость и интенсивность проскальзывания внутреннего колеса колесной пары моторной тележки. Работа сил трения и ее интенсивность вычисляются по формулам (14) и (15).

Расчетные формулы интенсивности и скорости скольжения в обоих случаях совпадают, хотя характер относительного скольжения совершенно различный.

С учетом выражений (1)–(3) формула для вычисления интенсивности относительного скольжения колеса колесной пары по головке рельса принимает вид

$$J_{ск} = \frac{2(H_{кп} + H_{kk})}{R_{кр} + \frac{S_p}{2} - (H_{кп} + \delta_p)}, \quad (25)$$

где $H_{кп} = 0,720$ м — расстояние от центра колесной пары до внутренней грани колеса; $H_{kk} = 0,070$ м — расстояние от внутренней грани колеса до плоскости круга катания; S_p — ширина рельсовой колеи; $R_{кр}$ — радиус кривой.

Результаты расчета интенсивности скольжения колеса новой колесной пары ($\delta_p = 0,033$ м) в зависимости от радиуса кривой при $J_{ск} = \frac{1,58}{R_{кр} + \frac{S_p}{2} - 0,742}$ приведены в табл. 2.

ИЗНОС МАТЕРИАЛА КОЛЕСА ПО КРУГУ КАТАНИЯ

Основной характеристикой износа материала контактирующих тел при их относительном скольжении является интенсивность изнашивания. Объем материала, подверженного износу, зависит от характера контакта тел при их силовом взаимодействии [6].

Контакт колеса по кругу катания и головки рельса можно представить как силовое взаимодействие двух накрест расположенных цилиндров. Начальное соприкосновение этих цилиндров происходит в точке, поэтому область силового контакта будет ограничена эллипсом с полуосями a и b . В дальнейшем принимаем, что a — малая полуось, b — большая полуось. Все геометрические и физические величины, характерные для области контакта, выражаются через главные радиусы кривизны поверхностей контактирующих тел и представлены функциями сжимающей силы P и отношения $\frac{A}{B}$ для накрест расположенных цилиндров [7]:

$$A = \frac{1}{2R}, B = \frac{1}{2r},$$

где $2R$ — диаметр большого цилиндра; $2r$ — диаметр малого цилиндра.

При этом:

$$a = m_a \sqrt[3]{\frac{PR}{E_0}}; \quad (26)$$

$$b = a \sqrt[2]{1 - e^2}, \quad (27)$$

где E_0 — модуль упругости; e — эксцентриситет эллипса.

Напряжение в центре площадки контакта

$$q_0 = m_q \sqrt[3]{\frac{PE_0^2}{R^2}}. \quad (28)$$

Сближение соприкасающихся тел в результате деформации [8]

$$\delta = m_\delta \sqrt[3]{\frac{P^2}{E_0^2 R}}. \quad (29)$$

Коэффициенты m_a , m_q , m_δ и эксцентриситет e выражают через эллиптические интегралы, их значения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные для расчета силового контакта колеса и рельса

$\frac{A}{B}$	e	m_q	m_a	m_δ
1	0	0,388	1,109	1,230
0,9	0,35	0,4	1,130	1,256
0,8	0,5	0,42	1,156	1,280
0,7	0,61	0,44	1,180	1,300
0,6	0,7	0,468	1,214	1,330
0,5	0,78	0,49	1,242	1,370
0,4	0,84	0,536	1,282	1,420
0,3	0,89	0,6	1,324	1,470
0,2	0,93	0,716	1,390	1,550
0,1	0,97	0,97	1,500	1,690
...
0,007	0,999	3,202	1,826	2,142

Большим радиусом является радиус головки рельса $R = 500$ мм (взят для наиболее широко применяемых на метрополитене рельсов Р50 и Р65).

Радиус колеса по кругу катания $r = 430$ мм. Следовательно,

$$A = \frac{1}{2R} = \frac{1}{1000}; B = \frac{1}{2r} = \frac{1}{860}.$$

Отношение $\frac{A}{B} = 0,86$.

Из табл. 3 находим $m_a = 1,13$; $m_q = 0,4$; $m_\delta = 1,256$.

Для стали модуль упругости $E_0 = 200$ кН/мм².

Расчетные формулы для величин a , b , q_0 и δ представляются функциями от сжимающей силы P [9].

Сжимающей силой будет нагрузка на рельс от колеса колесной пары, максимальное значение которой 125 кН.

При этом

$$q_0 = 0,295\sqrt[3]{P} = 1,086\left(\frac{\text{кН}}{\text{мм}^2}\right). \quad (30)$$

Наибольшее напряжение в центре контактной площадки превышает предел пластичности для рельсовой и колесной сталей (0,250 кН/мм²).

Силовой контакт гребня бандажа и рельса происходит в основном в пределах пластической деформации материала.

Сближение δ обусловлено взаимным проникновением контактирующих тел за счет пластического деформирования (смятия) их материалов:

$$\delta = 0,004627\sqrt[3]{P^2} = 0,116 \text{ мм}. \quad (31)$$

На рис. 4 представлен характерный микропрофиль шероховатости поверхности головки рельса и колеса по кругу катания с базовой длиной неровностей $l = 8$ мм и полной высотой профиля шероховатости $R_{\max} = 80$ мкм [10].

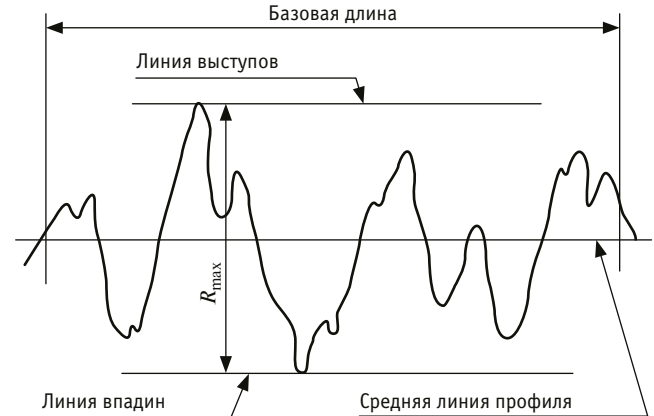


Рис. 4. Микрорельеф шероховатости поверхности головки рельса и поверхности катания колеса

Как видно, максимальная высота неровностей 0,08 мм меньше величины смятия 0,116 мм.

Силовой контакт рельса и колеса по кругу его катания происходит в пределах пластичности материала контактирующих тел, при этом их сближение ограничивается неровностями, расположенными на площадке контакта.

Сближение δ можно представить в виде суммы двух составляющих

$$\delta = \delta_p + \delta_k, \quad (32)$$

где δ_p и δ_k — смятие материалов рельса и колеса соответственно.

Для определения этих величин воспользуемся понятием объемной твердости, которая выражается отношением нагрузки к объему отпечатка [11, 12]. Тогда соотношения объемных твердостей материалов рельса и колеса соответственно определяются следующим образом:

$$H_p = \frac{P}{V_p}; \quad (33)$$

$$H_k = \frac{P}{V_k}, \quad (34)$$

где объем полуэллипсоида смятия материала рельса

$$V_p = \frac{2}{3}\pi ab\delta_p, \quad (35)$$

объем полуэллипсоида смятия материала колеса

$$V_k = \frac{2}{3}\pi ab\delta_k. \quad (36)$$

Соотношение объемных твердостей рельса и колеса с учетом выражений (33)–(36)

$$K = \frac{H_p}{H_k} = \frac{\delta_p}{\delta_k}. \quad (37)$$

Так как

$$\delta_k = \delta - \delta_p$$

то

$$\delta_k = \frac{K\delta}{K+1};$$

$$\delta_p = \frac{\delta}{K+1}.$$

Очевидно, что величина смятия одного из контактирующих тел равна глубине проникновения в него другого тела.

В итоге получены выражения для расчета глубины взаимного проникновения материалов колеса и головки рельса:

$h_p = \delta_k = \frac{K\delta}{K+1}$ — глубина проникновения головки рельса в материал колеса;

$h_k = \delta_p = \frac{\delta}{K+1}$ — глубина проникновения колеса в материал головки рельса.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

взаимное проникновение происходит на уровне шероховатостей поверхностей контактирующих тел;

глубина проникновения неровностей рельса в материал колеса зависит от соотношения твердостей материалов рельса и колеса.

Контактная площадка ограничена эллипсом с полуосями:

$$a = 1,534\sqrt[3]{P}; \quad (38)$$

$$b = 0,93675a. \quad (39)$$

Наибольшая полуось a расположена поперек головки рельса. Эта полуось определит объем материала колеса, подверженного износу [8]. Принимаем, что сечением фигуры, образован-

ной за счет проникновения головки рельса в материал колеса, является половина эллипса с размерами a и h_p . Ее площадь

$$S_{сч} = \frac{\pi}{2} h_p a. \quad (40)$$

Объем материала колеса, вытесненного рельсом и подверженного дальнейшему износу,

$$V = L_{сч} S_{сч}. \quad (41)$$

Расчет интенсивности изнашивания материала колеса производится по формуле

$$J_v = J_{сч} S_{сч}. \quad (42)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В криволинейном участке пути колесные пары немоторных тележек поездов метрополитена движутся с относительным скольжением внешних колес по головке рельса. У внутренних колес скольжение по головке рельса отсутствует. Износу по кругу катания в большей мере подвержены колеса, движущиеся по внешнему рельсу.

Для колесных пар моторных тележек при их движении в кривых характерно проскальзывание внутренних колес по рельсу, в то время как внешние колеса движутся без проскальзывания. Следовательно, при движении в кривых больший износ по кругу катания будет наблюдаться у колес, находящихся на внутреннем рельсе.

Действенным инструментом для снижения износа колес моторных и немоторных тележек вагонов метрополитена является технология смазки поверхности катания рельсов в кривых радиусом менее 800 м с использованием современных модификаторов, уменьшающих коэффициент трения в зоне контакта системы «колесо — рельс». Применение такой технологии позволяет снижать боковое воздействие колес на путь в среднем до 30 %, что приводит к уменьшению нормальной реакции на гребне набегающего колеса и соответствующему снижению износа гребней колес немоторных и моторных вагонов [13, 14].

Сведения об авторах:

Виктор Федорович Кузнецов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Омского государственного университета путей сообщения

Сергей Георгиевич Шантаренко,
доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения

Виктор Васильевич Харламов,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Victor F. Kuznetsov,
PhD in Engineering, Associate Professor of Higher Mathematics Department, Omsk State Transport University

Sergey G. Shantarenko,
DSc in Engineering, Professor of Technologies of Transport Engineering and Rolling Stock Repair Department, Omsk State Transport University

Victor V. Kharlamov,
DSc in Engineering, Professor, Head of Electric Machines and General Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Шутов Д. С., Лакин И. И. Прогнозирование остаточного ресурса колесных пар вагонов метрополитена «Русич» моделей 81-740/741 // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3. С. 13–20. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-2.
2. Шутов Д. С., Воробьев А. А. Анализ надежности колесных пар электропоездов серии 81-740/741 «Русич» // Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов. 2021. № 2. С. 14–18.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. приказом Минтранса России от 23.06.2024 № 250. Москва, 2024. 72 с.
4. Теоретическая механика. Ч. 2. Кинематика / М. В. Максименко, Н. В. Кузнецова, В. Е. Головкин [и др.]. Санкт-Петербург, 2013. 57 с.
5. Беляев Н. М. Вычисление наибольших расчетных напряжений при сжатии соприкасающихся тел // Сборник ЛИИПС. 1929. Вып. 109.
6. Марков Д. П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте // Труды ВНИИЖТ. Москва : Интекст, 2007. 408 с.
7. Штаерман И. Я. Контактная задача теории упругости. Москва ; Ленинград, 1949. 270 с.
8. Определение напряжений и глубины взаимного проникновения головки рельса и гребня бандажа колеса в области их силового контакта / В. Ф. Кузнецов, С. Г. Шантаренко, В. А. Болотюк, С. В. Савинкин // Известия Транссиба. 2022. № 3. С. 90–99. ISSN 2220-4245.
9. Икрин В. А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности. Москва : АСВ, 2004. 424 с.
10. ГОСТ 25142–82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2018. 14 с.
11. Объемная твердость как фактор регулирования процессов обработки древесины / А. П. Комиссаров, Е. А. Памфилов, Ю. И. Тракало, Ю. Б. Левинский // Лесной вестник. 2007. № 8. С. 184–187. ISSN 1727-3749.
12. ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2016. 8 с.
13. Лубрикация рельсов тяговым локомотивом в составе поезда / В. С. Коссов, А. А. Лунин, Ю. А. Панин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 57–60. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-1-57-60.
14. Бартенева Л. И., Никитин В. Е. Технология комплексного снижения износа гребня колеса и рельса с помощью передвижных рельсосмазывателей // Железные дороги мира. 2004. № 1. С. 62–68. ISSN 0321-1495.

References

1. Shutov D. S., Lakin I. I. Forecasting the residual resource of wheeled pairs of cars of the metro «Rusich» models 81-740/741. *World of Transport and Transportation*. 2022. Vol. 20. No. 3. Pp. 13–20. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-2 (In Russian).
2. Shutov D. S., Vorobyov A. A. Reliability analysis of wheel pairs of electric trains of the 81-740/741 «Rusich» series. *Modern Methods of Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing of Parts and Assemblies*. 2021. No. 2. Pp. 14–18. (In Russian).
3. Rules for the technical operation of railways of the Russian Federation : approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 23.06.2024 No. 250. Moscow, 2024. 72 p. (In Russian).
4. Maximenko M. V., Kuznetsova N. V., Golovko V. E. [et al.]. Theoretical mechanics. Part 2. Kinematics. St. Petersburg, 2013. 57 p. (In Russian).
5. Belyaev N. M. Calculation of the greatest design stresses in the compression of contacting bodies. *Proceedings of Leningrad Institute of Railway Engineers*. 1929. Issue 109. (In Russian).
6. Markov D. P. Tribology and its application in railway transport. Moscow : Intext, 2007. 408 p. (In Russian).
7. Shtaerman I. Ya. Contact problem of the theory of elasticity. Moscow ; Leningrad, 1949. 270 p. (In Russian).
8. Kuznetsov V. F., Shantarenko S. G., Bolotyuk V. A., Savinkin S. V. Determination of stresses and the depth of mutual penetration of the materials of the rail head and the locomotive wheel tire fresh in the area of their force contact. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2022. No. 3 Pp. 90–99. ISSN 2220-4245. (In Russian).
9. Ikrin V. A. Resistance of materials with elements of the theory of elasticity and plasticity. Moscow : ASV, 2004. 424 p. (In Russian).
10. GOST 25142–82. Surface roughness. Terms and definitions. Moscow : Standardinform, 2018. 14 p. (In Russian).
11. Komissarov A. P., Pamphilov E. A., Trakalo Y. L., Levinskiy Y. B. Volumetric hardness as factor of the regulation of the processes woodworking. *Forestry Bulletin*. 2007. No. 8. Pp. 184–187. ISSN 1727-3749. (In Russian).
12. GOST 7524–2015. Grinding steel balls for ball mills. Specifications. Moscow : Standardinform, 2016. 8 p. (In Russian).
13. Kossov V. S., Lunin A. A., Panin Yu. A. [et al.]. Lubrication of rail by traction unit in the train. *Russian Railway Science Journal*. 2017. Vol. 76. No. 1. Pp. 57–60. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-1-57-60. (In Russian).
14. Barteneva L. I., Nikitin V. E. Technology of comprehensive wear reduction of the wheel flange and the rail via mobile lubricating car. *Rail International*. 2004. No. 1. Pp. 62–68. ISSN 0321-1495. (In Russian).

Объем статьи 0,6 авторских листа

Научная статья
УДК 656.225: 629.46

Анализ технического состояния разных типов грузовых вагонов

Александр Геннадьевич Галкин¹, Нина Фридриховна Сирина¹, Гузаль Арсеновна Бубнова¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Analysis of the technical condition for different types of freight cars

Alexander G. Galkin¹, Nina F. Sirina¹, Guzal A. Bubnova¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье проанализированы отказы, выявленные при техническом обслуживании разных типов грузовых вагонов. Показано, что задача управления рисками состоит в укрупнении групп тех грузовых вагонов, для которых характерны частые отказы в процессе технического обслуживания. С помощью пакета Excel выполнены численные расчеты показателей основных групп технических неисправностей разных типов вагонов. В дальнейшем полученные уравнения будут использоваться в модели оценки функционирования пункта технического обслуживания.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагонное хозяйство, техническое обслуживание, грузовые вагоны, риски отказов, отцепки, коэффициент детерминации

Abstract

The article analyzes the failures identified during the maintenance of various types of freight cars. It is shown that the task of risk management is to consolidate the groups of those freight cars, which are characterized by frequent failures during maintenance. Numerical calculations of the indicators of the main groups of technical faults of different types of cars were performed using the Excel package. In the future, the obtained equations will be used in a model for evaluating the functioning of a maintenance point.

Keywords: railway transport, carriage industry, maintenance, freight cars, failure risks, uncoupling, coefficient of determination

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-24-33

Основная идея представленного в статье исследования заключается в определении того, как техническое состояние разных типов грузовых вагонов влияет на функционирование пункта технического обслуживания (ПТО). Каждый тип вагона рассматривается как отдельный фактор, а совокупность типов — как критерий многофакторности. За счет снижения риска отказов разных типов вагонов планируется повысить пропускную способность ПТО. Сокращение времени технического обслуживания и текущего отцепочного ремонта вагонов (при сохранении и/или повышении качества выполняемых работ) позволит увеличить скорость доставки грузов и соответственно размер грузоперевозок [1–3]. Известно, что тип вагонов зависит от цели их использования и от рода пере-

возимых грузов или пассажиров (рис. 1). Согласно анализу грузовых вагонов, поступающих на ПТО, большая часть неисправностей приходится на полувагоны, а меньше всего отказов у вагонов-хопперов (рис. 2) [4, 5].

Для поддержания эффективного уровня перевозок необходимо осуществлять контроль за техническим состоянием грузовых вагонов, что позволит определить риски причинения вреда (финансового ущерба) перевозочному процессу и собственнику вагонов. Управление рисками включает следующие этапы [3].

Этап 1. Идентификация опасностей в вагонах разных типов (сбор и анализ информации о технических неисправностях, выявленных в процессе эксплуатации, ТО и ТОР различных типов вагонов в соответствии с [5]).

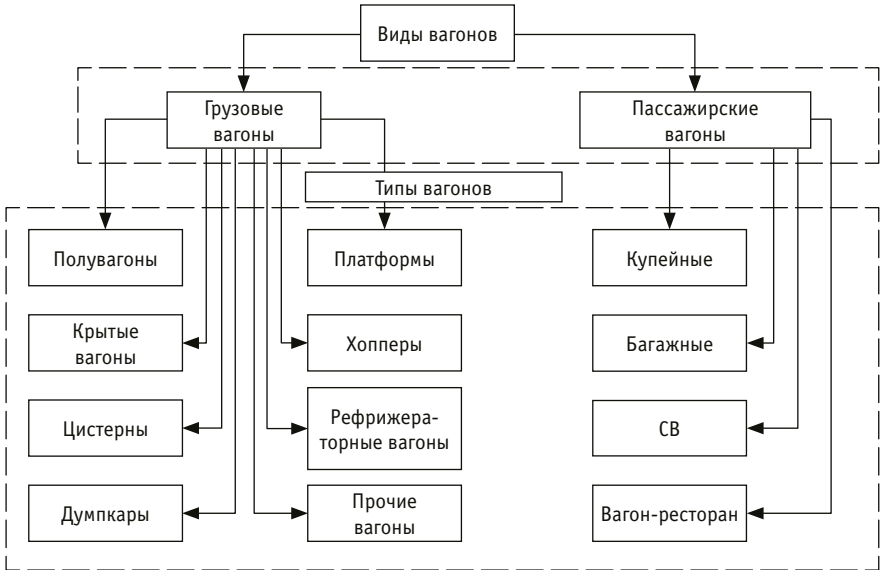


Рис. 1. Основные типы вагонов

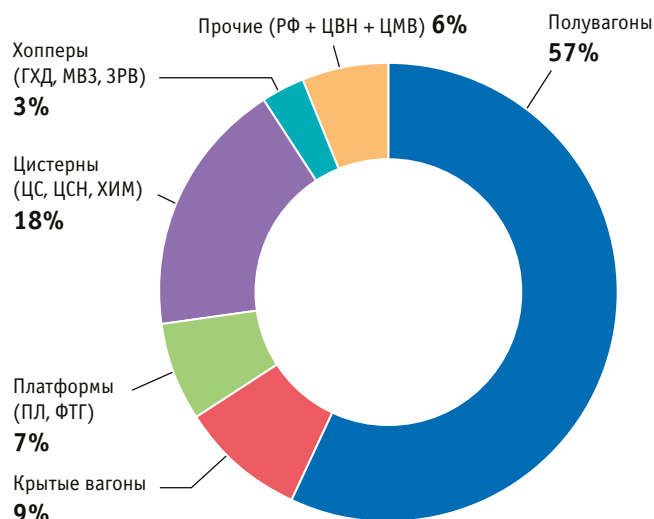


Рис. 2. Распределение неисправных грузовых вагонов по типам [5]

Этап 2. Определение вероятности и частоты наступления отказа различных типов грузовых вагонов согласно перечню [5] с учетом оценки материально-технического ущерба.

Этап 3. Оценка тяжести последствий (таких как возможные сходы, аварии, крушения, травмы и др.), связанных с воздействием опасных факторов, вызванных отказами разнотипных грузовых вагонов.

Этап 4. Оценка уровня риска (расчет комплексного показателя риска для каждого типа вагона на основе полученных данных об опасностях, вероятности и тяжести последствий).

Этап 5. Разработка мер по снижению риска нарушения безопасности либо функционирования ПТО (мероприятия по устранению или минимизации опасностей, а также по повышению безопасности труда работников).

Этап 6. Реализация и контроль мер по снижению риска (внедрение разработанных мероприятий и контроль за их эффективностью).

Источниками информации о техническом состоянии парка вагонов могут быть данные реальной эксплуатации или ре-

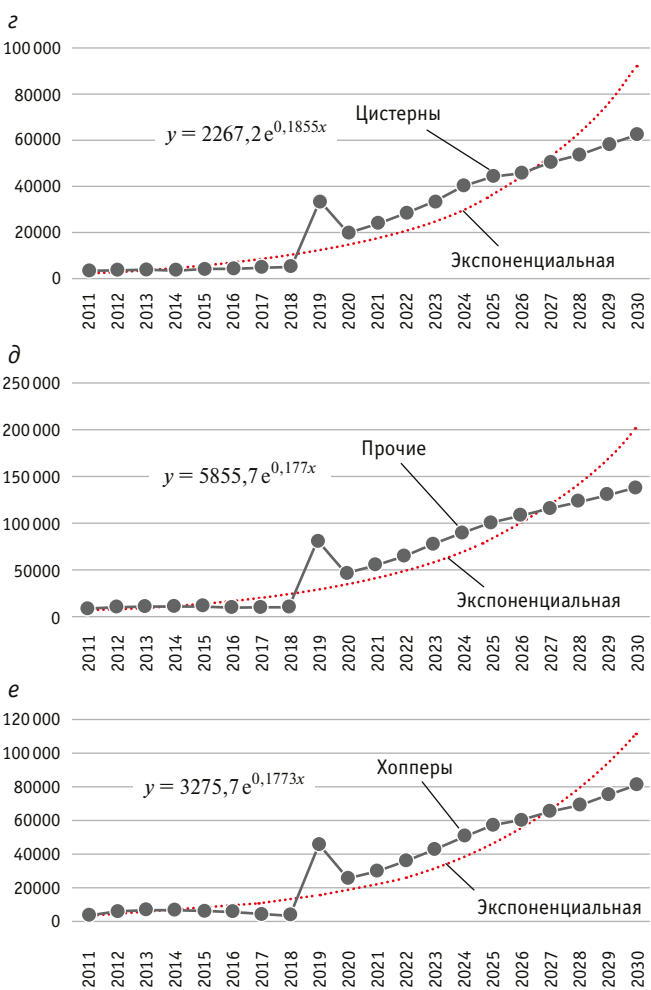
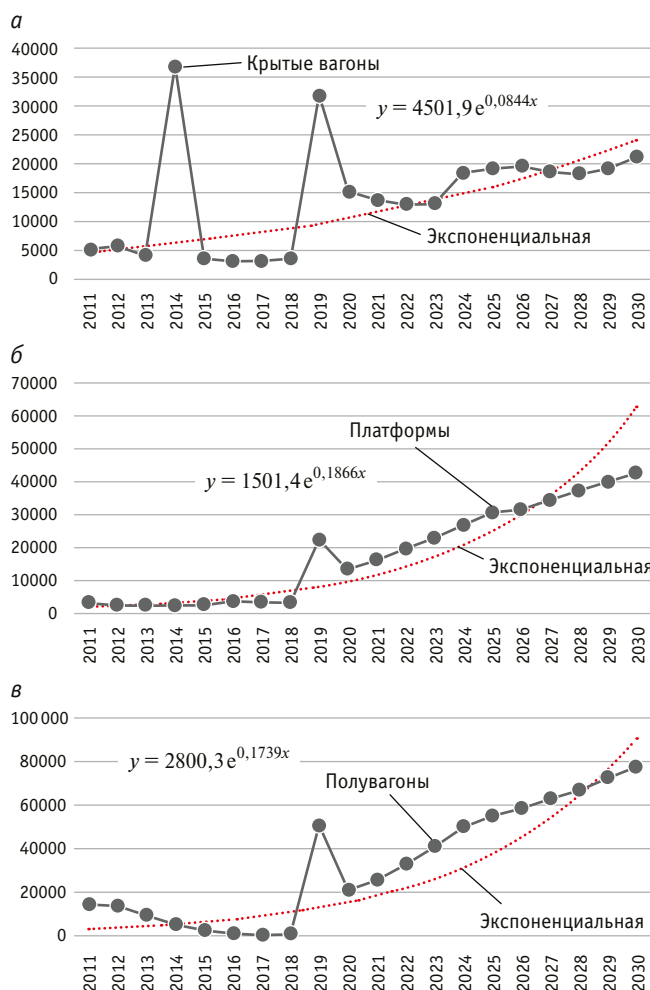


Рис. 3. Тенденция и уравнение линии тренда отцепок различных типов грузовых вагонов (по фактическим и прогнозным данным на период 2011–2030 гг.):

а — крытые вагоны; б — платформы; в — полувагоны; г — цистерны; д — прочие; е — вагоны-хопперы

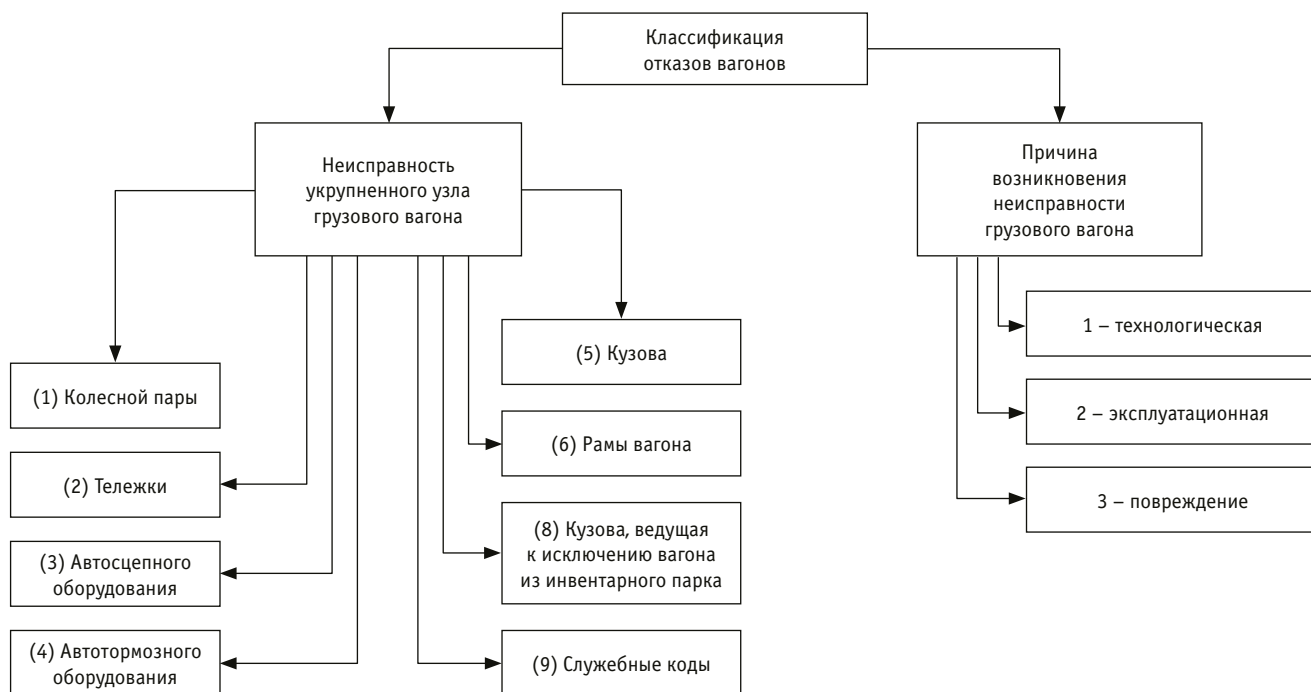


Рис. 4. Классификация отказов грузовых вагонов по укрупненным группам технических неисправностей

зультаты стендовых испытаний [6–9]. Выборочная совокупность вагонов должна соответствовать возрастному и техническому критериям (для одного года выпуска, для одного конструктивного исполнения) [4, 6, 8].

На основе фактических и прогнозных данных на рис. 3 показано распределение отцепок различных типов грузовых вагонов.

Значения частоты появления отказа могут быть получены путем проведения бесконечно большого количества опытов. Если число испытаний достаточно велико, то оценка будет близка к истинной вероятности [6].

Основные группы неисправностей грузовых вагонов представлены на рис. 4.

Частота появления отказа различных типов вагонов определяется на основе данных (которые можно отнести к статистическим), полученных в процессе эксплуатации грузовых вагонов:

модель отказа обусловлена природой влияющих на эксплуатацию и процесс движения подвижного состава отказов грузовых вагонов. Функция распределения принята как некая математическая зависимость величин технического состояния вагона за период наработки до возникновения отказа;

исследуются численные показатели надежности вагонов, к которым чаще всего относят среднее исковое значение наработки отказа, гамма-процентную наработку вагона, риск или вероятность безотказной работы вагона за определенный интервал времени (например, от момента погрузки до выгрузки и т.д.), остаточный ресурс вагона.

К числу основных критериев статистического анализа, помимо дисперсии и среднеквадратического отклонения, относится математическое ожидание, которое позволяет:

делать прогнозную оценку значения отказа грузового вагона на предстоящий период при условии, что накоплен массивный объем данных за предшествующие периоды [3];

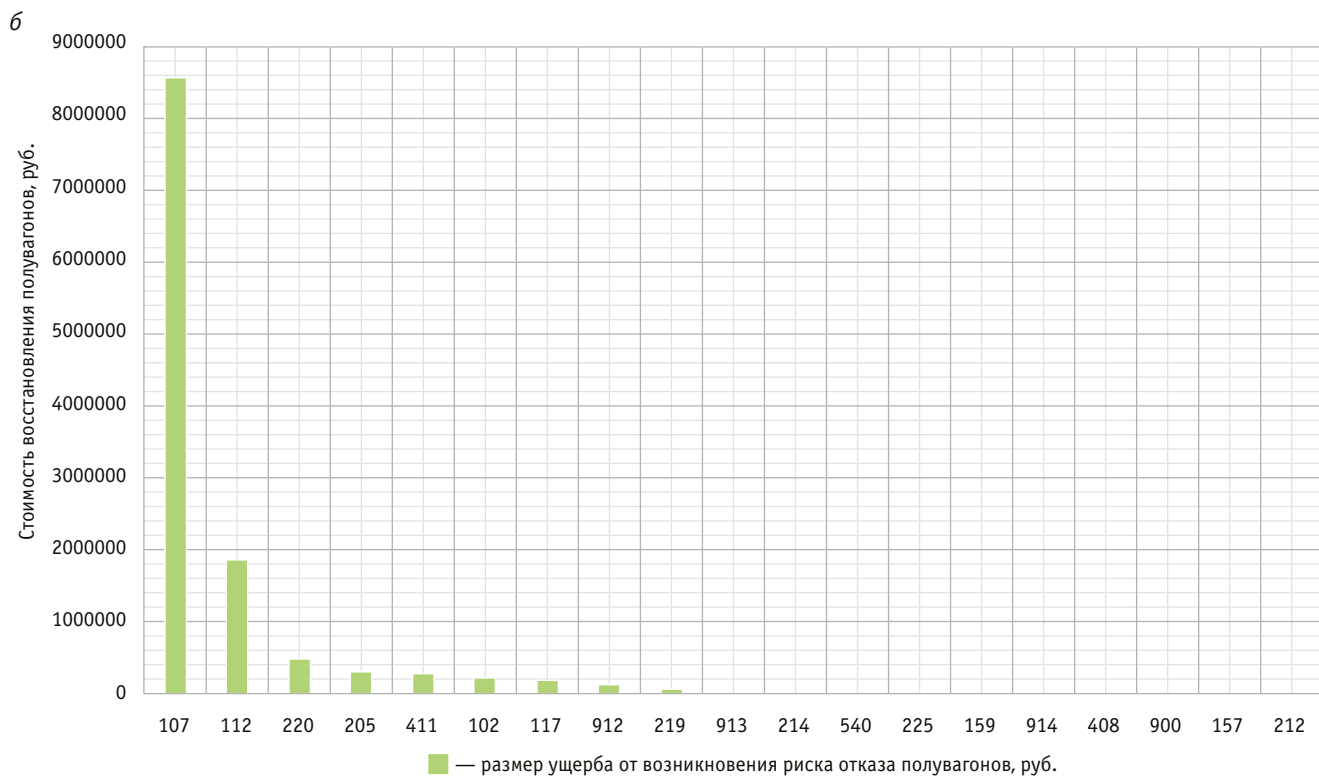
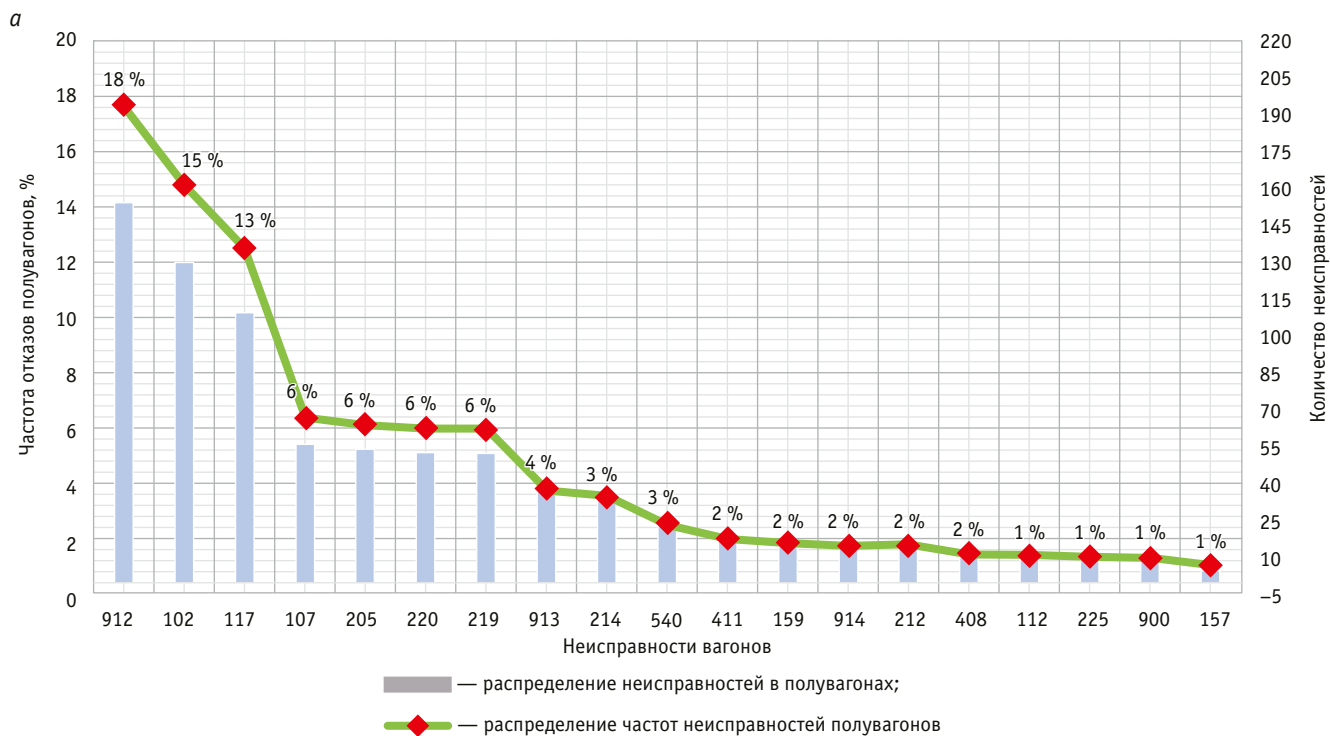
рассчитывать среднее значение оценки отказа грузового вагона в предстоящий период времени (в силу того, что математическое ожидание можно отнести к характеристикам положения распределения, например, таким, как мода, медиана);

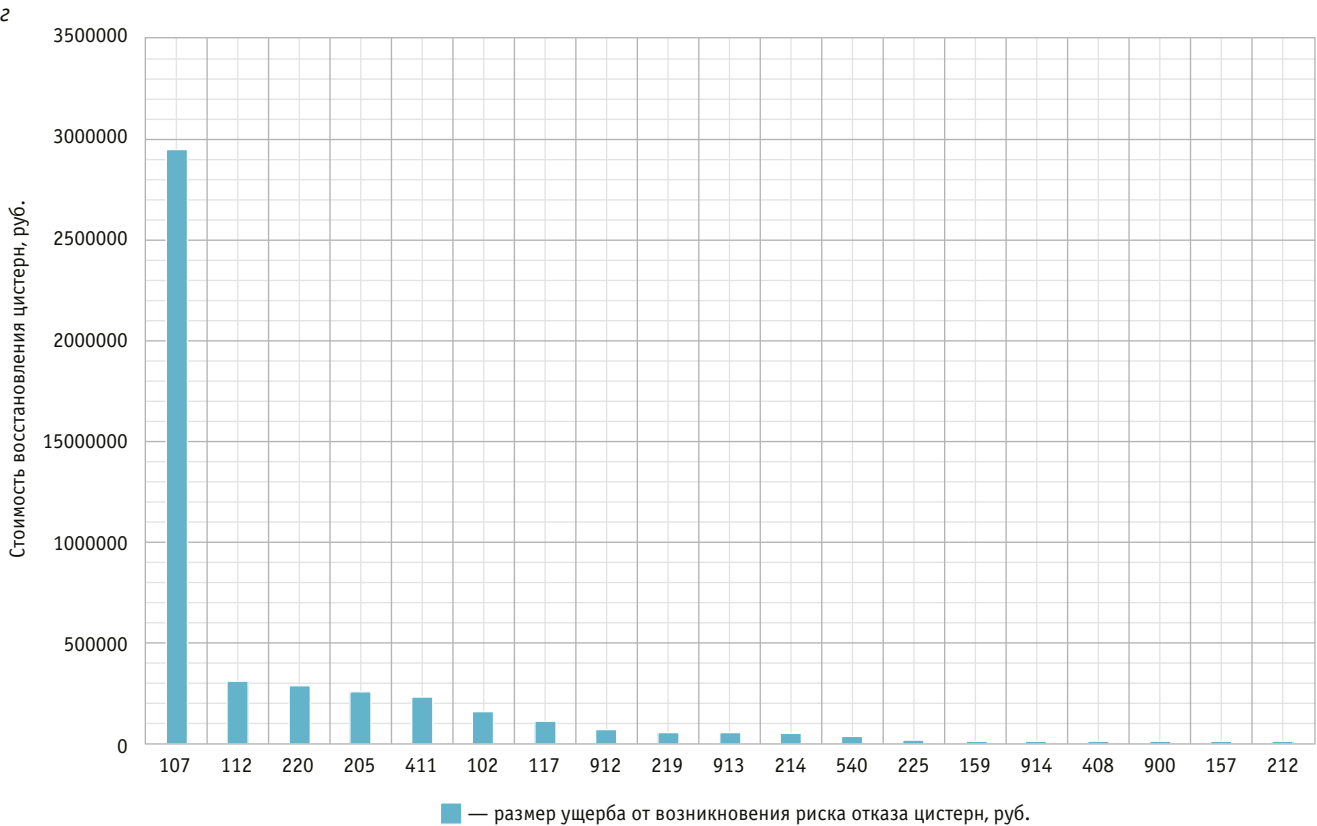
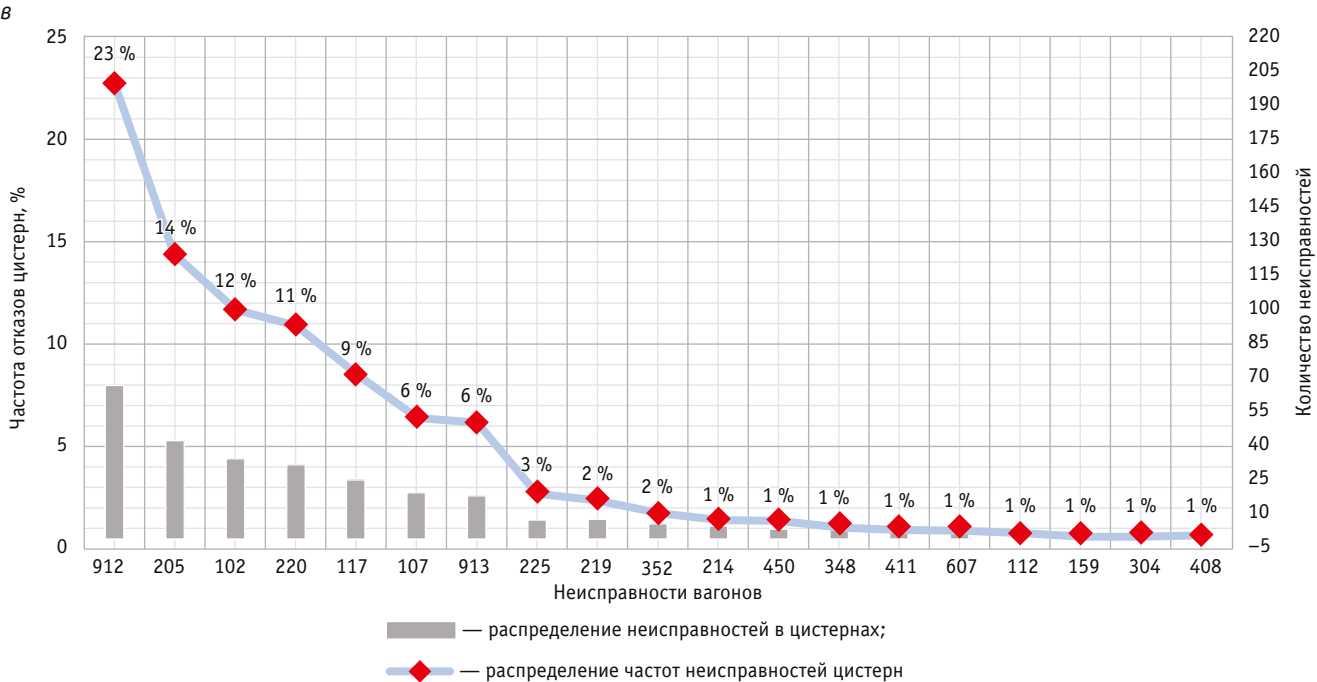
выявлять скрытые закономерности и тенденции данных (например, аналитическая оценка дисперсии как результата позволяет определять аномалии, паттерны, выбросы и другие выходящие за пределы нормы значения, которые в ито-

ге существенно влияют на всю совокупность данных [1]);

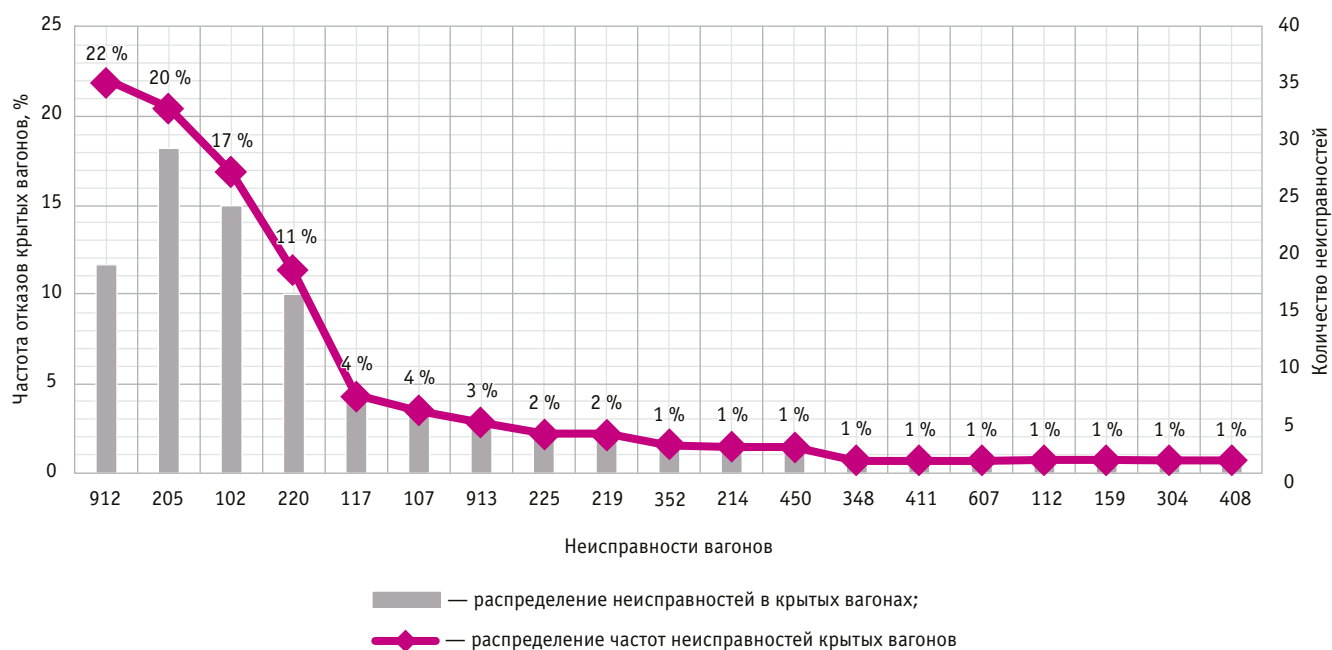
определять прогнозные значения на основе полученной дисперсии и соответственно прогнозировать, насколько сильно полученные впоследствии данные будут отклоняться от ранее принятого среднего значения.

Повышение провозной способности железных дорог и улучшение качества предоставляемых пользователям услуг требуют совершенствования технического состояния грузовых вагонов [10]. В условиях информатизации и автоматизации работ и выполняемых задач, оперативно решаемых в ОАО «РЖД», накопление данных о состоянии вагонного парка, его технических ресурсах не составляет труда и является основой для достоверной оценки. В свою очередь, внедрение полнораспределенного учета вагонов позволяет представить весь реальный процесс движения поездов как испытание на надежность, а использование методов статистического моделирования дает возможность получить данные о потоке отказов, погрузках, выгрузках и соответственно о прогнозном значении оценки эксплуатационных характеристик вагона. Так, на рис. 5 проанализированы основные неисправности, выявленные в вагонах различного типа (рис. 5).

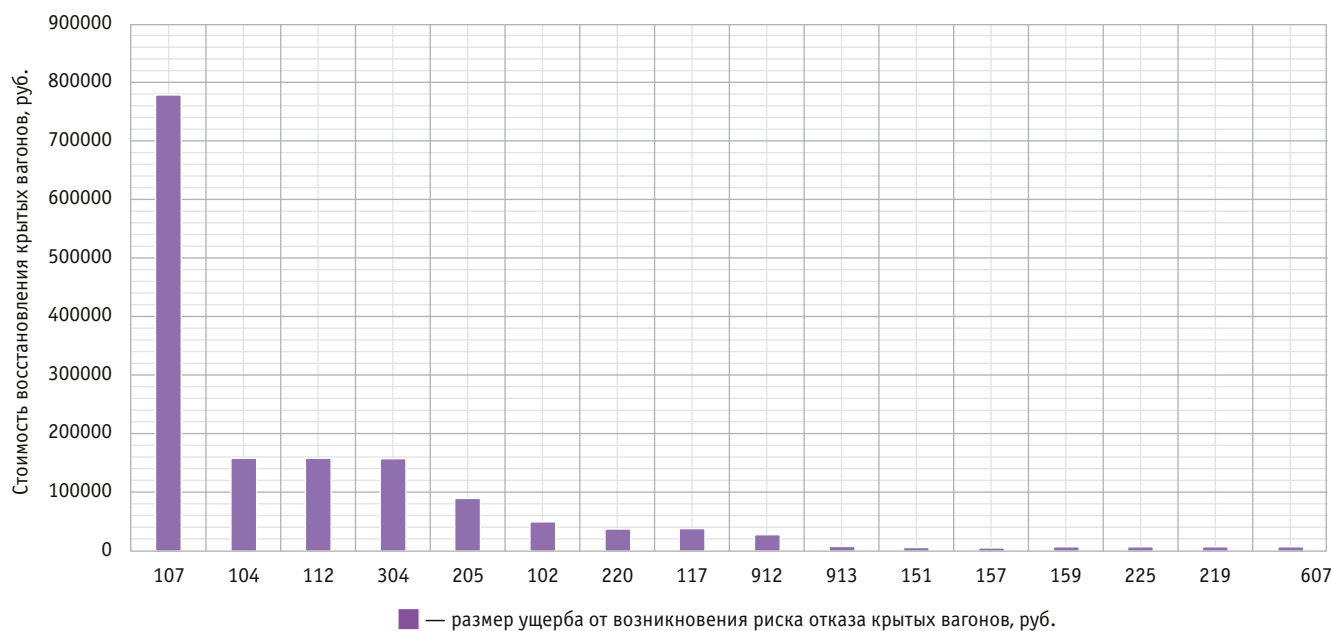


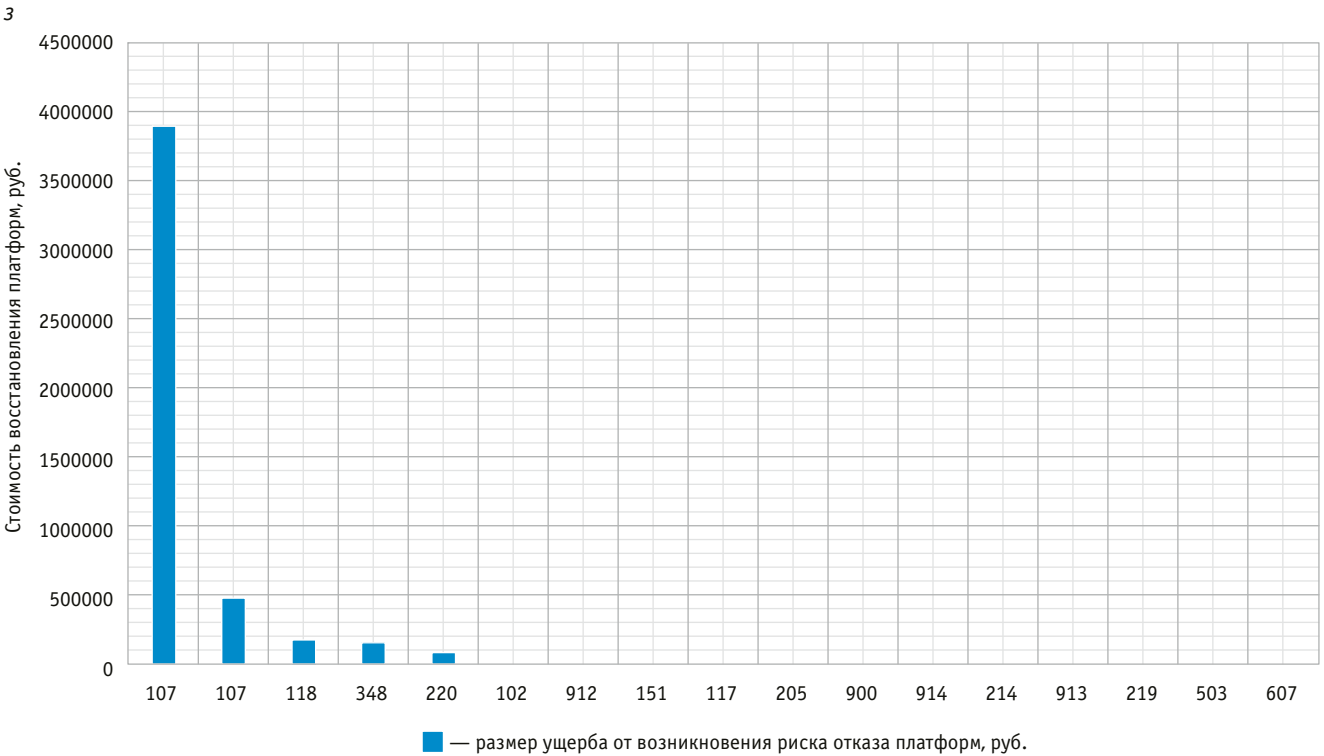
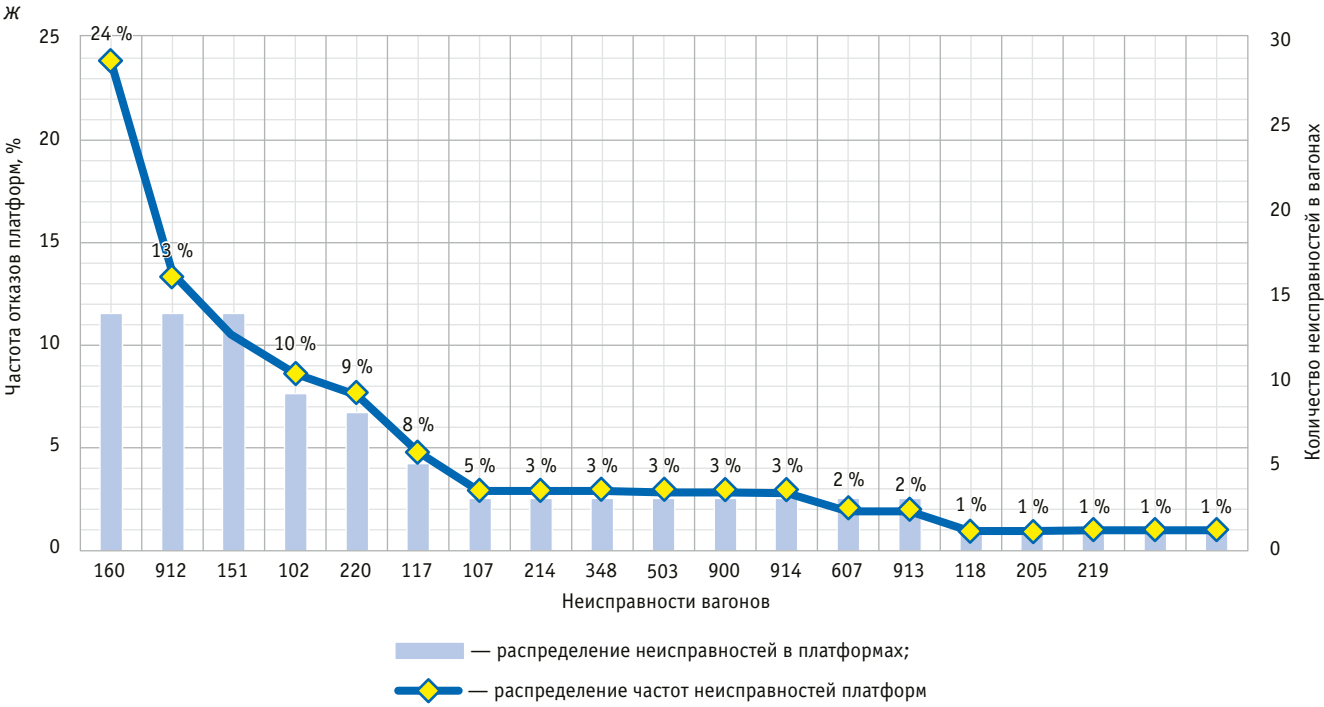


д



е





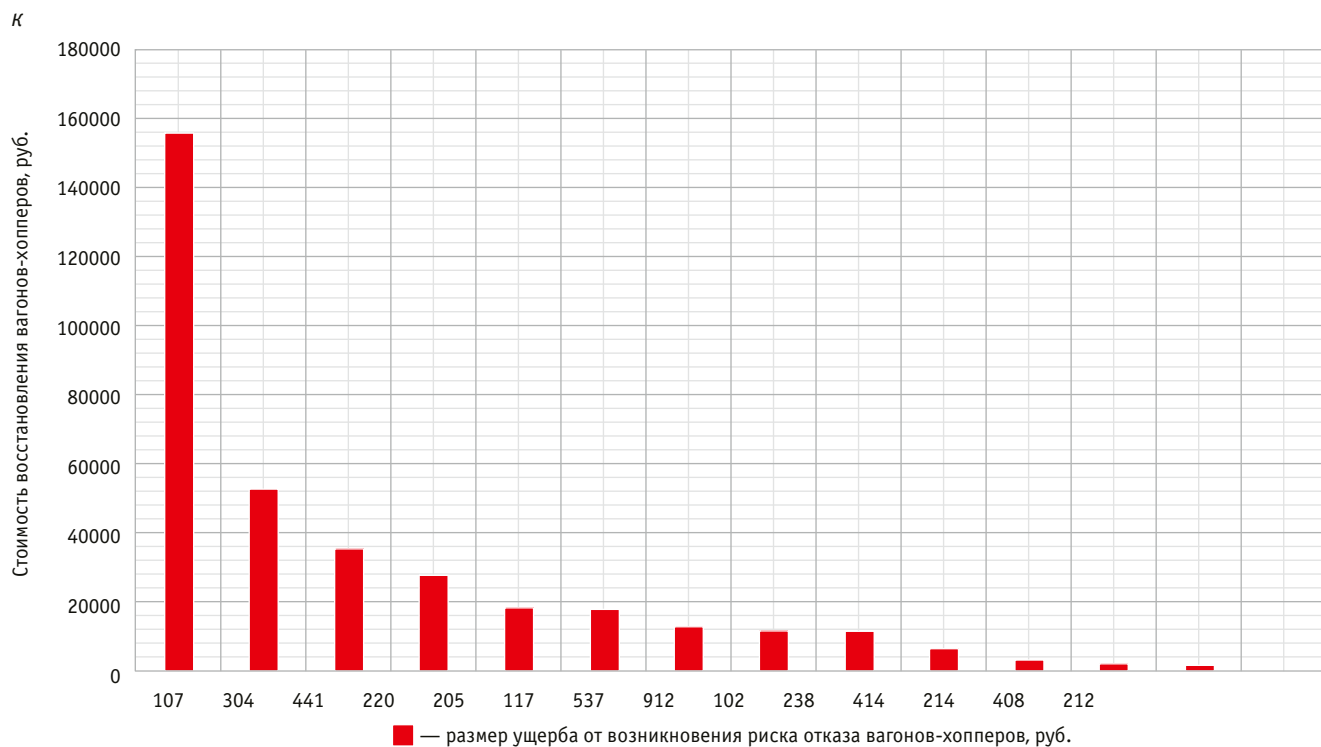
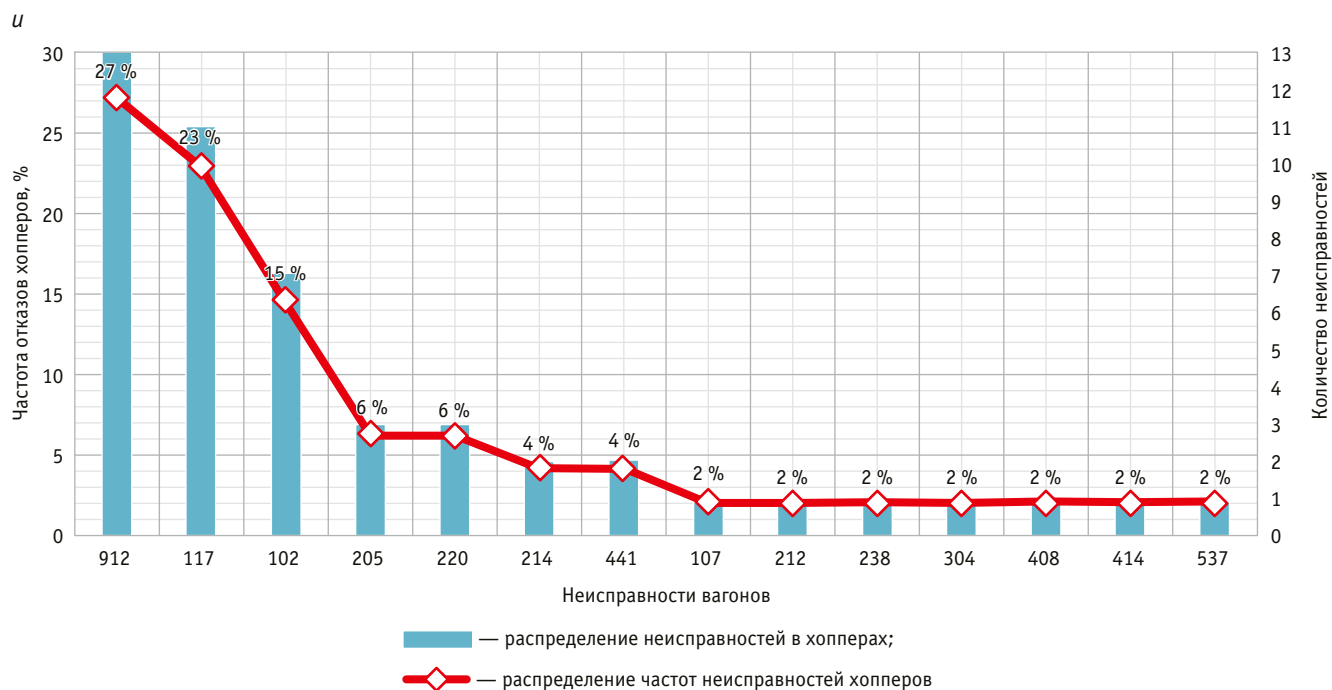


Рис. 5. Выявленные на ПТО в течение года количество неисправностей и риски на вагонах разных типов

Для оценки зависимости отказа грузового вагона в эксплуатации от конкретного вида неисправности группы узлов и деталей используется коэффициент детерминации, принимающий значения от 0 до 1. Чем ближе значение коэффи-

циента к 1, тем выше зависимость. Выполненная оценка позволила определить уравнения тенденций отказов и получить коэффициенты детерминации (табл. 1).

Таким образом, на основе распределения рисков отказов разных типов ва-

гонов можно не только определить зоны опасности их эксплуатации, но и организационно-технические мероприятия, направленные на повышение производительности ПТО и эффективности перевозочного процесса.

Таблица 1

Уравнения тенденций числа отказов различных типов грузовых вагонов по основным видам неисправностей

Тип вагона	Уравнение тенденции	Коэффициент детерминации
Полувагоны	$y = -0,0277x^3 + 1,5125x^2 - 23,396x + 127,83$	0,1485
Цистерны	$y = -0,1169x^3 + 4,1912x^2 - 44,937x + 166,42$	0,1964
Крытые вагоны	$y = -0,0462x^3 + 2,1362x^2 - 28,989x + 138,87$	0,1659
Платформы	$y = -0,1169x^3 + 4,1912x^2 - 44,937x + 166,42$	0,1964
Хопперы	$y = -0,4257x^3 + 10,495x^2 - 79,684x + 210,8$	0,2765
Прочие вагоны	$y = -0,1169x^3 + 4,1912x^2 - 44,937x + 166,42$	0,1964

Сведения об авторах:

Александр Геннадьевич Галкин,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение транспорта», ректор Уральского
государственного университета путей сообщения

Нина Фридриховна Сирина,
доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны»,
проректор по учебной работе и связям с производством
Уральского государственного университета путей сообщения

Гузаль Арсеновна Бубнова,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны», начальник
отдела производственного обучения и связи с производством
Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Alexander G. Galkin,
DSc in Engineering,
Professor of Transport Power Supply Department,
Rector of Ural State University of Railway Transport

Nina F. Sirina,
DSc in Engineering, Professor of Railway Cars Department,
Vice-rector for academic affairs and production relations,
Ural State University of Railway Transport

Guzal A. Bubnova,
PhD in Engineering, Associate Professor of Railway Cars Department,
Head of Department for industrial training and production relation,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Bubnova G. Predictive model of the organization of car maintenance and repair wagons using the smoothing algorithm the extrapolation method // *Transport: Logistics, Construction, Maintenance, Management* : proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, March 17–30, 2022. SciTePress Digital Library (Science and Technology Publications, Lda), 2023. Pp. 324–330.
2. Сирина Н. Ф., Камаретдинова Г. А. Применение системы сбалансированных показателей в организационно-техническом процессе обслуживания грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте // *Вестник СГУПС*. 2021. № 2 (57). С. 5–14. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_5.
3. Сирина Н. Ф., Камаретдинова Г. А. Вероятностная модель технического обслуживания грузовых вагонов на межгосударственном стыковом пункте в условиях риска отказа // *Вестник РГУПС*. 2019. № 4 (76). С. 64–72. ISSN 0201-727X.
4. Анализ отцепок грузовых вагонов на сети железных дорог по итогам работы вагонного хозяйства за 6 месяцев 2021

References

1. Bubnova G. Predictive model of the organization of car maintenance and repair wagons using the smoothing algorithm the extrapolation method. *Transport: Logistics, Construction, Maintenance, Management* : proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, Ekaterinburg, March 17–30, 2022. SciTePress Digital Library (Science and Technology Publications, Lda), 2023. Pp. 324–330.
2. Sirina N. F., Kamaretdinova G. A. Application of the balanced scorecard in the organizational and technical process of servicing freight cars at an interstate junction point. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021. No. 2 (57). Pp. 5–14. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_5. (In Russian).
3. Sirina N. F., Kamaretdinova G. A. Probable model of the freight wagons maintenance at the interstate deviation point under conditions of failure risk. *Vestnik RGUPS*. 2019. No. 4 (76). Pp. 64–72. ISSN 0201-727X. (In Russian).
4. Analysis of freight car uncouplings on the railway network based on the results of the wagon fleet operation for 6 months of 2021.

- года. URL: https://galactica34.com/f/analiz_otcepok_zh_6_mes_2020g.pdf (дата обращения: 29.10.2024).
5. Классификатор «Основные неисправности грузовых вагонов (К ЖА 2005 04)». URL: <http://forpostperm.ru/assets/files/dokumenty/normativnye-dokumenty/orv/klassifikator-osnovnyh-neispravnostej-gruzovyh-vagonov.pdf> (дата обращения: 01.11.2024).
 6. Галкин А. Г., Зубков В. В., Сирина Н. Ф. Модель комплексной транспортной услуги как перспектива развития грузовых перевозок // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 7–11. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-7-11.
 7. Определение возможности увеличения межремонтных нормативов вагонов-хопперов (цементовозов) / С. В. Петров, Г. В. Райков, А. В. Васильев [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2017. Т. 76. № 3. С. 165–173. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-3-165-173.
 8. Сирина Н. Ф., Колодин А. Е., Гончарь П. С. Математическая модель организации обслуживания и ремонта грузовых вагонов // Вестник УрГУПС. 2024. № 2 (62). С. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14.
 9. Сирина Н. Ф., Колодин А. Е. Функциональная архитектура цифровой модели технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 14–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19.
 10. Черепов О. В., Лапшин В. Ф., Звягина М. А. Анализ отцепок вагонов для перевозки минеральных удобрений с осевой нагрузкой 25 тс в текущий ремонт // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 18–23. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23.
- URL: https://galactica34.com/f/analiz_otcepok_zh_6_mes_2020g.pdf (access date: 29.10.2024). (In Russian).
5. Classifier «Main malfunctions of freight cars (KJ 2005 04)». URL: <http://forpostperm.ru/assets/files/dokumenty/normativnye-dokumenty/orv/klassifikator-osnovnyh-neispravnostej-gruzovyh-vagonov.pdf> (access date: 01.11.2024). (In Russian).
 6. Galkin A. G., Zubkov V. V., Sirina N. F. Model of complex transport service as a prospect of freight transportation development. *Transport of the Urals*. 2018. No. 1 (56). Pp. 7–11. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-7-11. (In Russian).
 7. Petrov S. V., Raykov G. V., Vasil'ev A. V. [et al.]. Determination of the possibility of increasing the between-repair standards of hopper cars (cement carriers). *Russian Railway Science Journal*. 2017. Vol 76. No. 3. Pp. 165–173. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-3-165-173. (In Russian).
 8. Sirina N. F., Kolodin A. E., Gonchar P. S. Mathematical model of maintenance and repair processes for freight cars. *Herald of the USURT*. 2024. No. 2 (62). Pp. 4–14. DOI: 10.20291/2079-0392-2024-2-4-14. (In Russian).
 9. Sirina N. F., Kolodin A. E. Functional architecture of digital model of maintenance and repair of freight cars. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 14–19. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-14-19. (In Russian).
 10. Cherepov O. V., Lapshin V. F., Zvyagina M. A. Analysis of uncoupling cars for the transportation of mineral fertilizers with an axle load of 25 ton-force for current repairs. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 18–23. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-18-23. (In Russian).

Объем статьи 1,2 авторских листа

Научная статья
УДК 656.222.6

Оптимизационная модель текущего планирования работы с кольцевыми маршрутами на станции выгрузки

Александр Эрнстович Александров¹, Вадим Юрьевич Пермикин¹, Изабелла Владимировна Пытель¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Optimization model for the current planning of work with ring routes at the unloading station

Alexander E. Alexandrov¹, Vadim Yu. Permikin¹, Isabella V. Pytel¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В районах, для которых характерны устойчивые транспортно-экономические связи между отправителями и получателями массовых грузов, накоплен большой опыт по организации перевозок кольцевыми маршрутами. Проблеме оптимизации планирования обращения составов кольцевых маршрутов на основе методов линейного программирования и эвристических алгоритмов посвящено немало научных работ. Значимые успехи достигнуты при использовании математического аппарата динамической транспортной задачи с задержками. Вместе с тем стоит отметить, что этот подход не позволяет учитывать сложные процессы деления составов на группы в конечных пунктах оборота и поддержание постоянного набора групп вагонов в конкретном составе. В статье предлагается выделить проблему оптимального текущего планирования работы с составами кольцевых маршрутов в пункте выгрузки в отдельную задачу. Конкретным объектом такого планирования может быть припортовая станция, обслуживающая угольный терминал морского порта. В качестве решения рекомендуется использование булевых логических переменных и сведение математической постановки к частично-целочисленной задаче линейного программирования.

Ключевые слова: кольцевой маршрут, оборот маршрута, массовые грузы, припортовая станция, угольный терминал, оптимизация планирования, текущее планирование, метод оптимизации, булевые логические переменные, частично-целочисленное линейное программирование (MILP)

Abstract

In areas characterized by stable transport and economic ties between senders and recipients of bulk cargoes, extensive experience has been accumulated in organizing transportation by ring routes. Many scientific papers have been devoted to the problem of optimizing the planning of the circulation of ring route trains based on linear programming methods and heuristic algorithms. Significant progress has been achieved using the mathematical apparatus of a dynamic transport problem with delays. At the same time, it is worth noting that this approach does not allow taking into account the complex processes of dividing trains into groups at the end points of turnover and maintaining a constant set of groups of cars in a specific composition. The article proposes to highlight the problem of optimal current planning of work with ring route trains at the unloading point in a separate task. A specific object of such planning may be a port station serving the coal terminal of the seaport. As a solution, it is recommended to use Boolean logical variables and reduce the mathematical formulation to a mixed-integer linear program.

Keywords: ring route, route turnover, bulk cargo, port station, coal terminal, planning optimization, current planning, optimization method, Boolean logical variables, mixed-integer linear program

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-34-37

Маршрутизация перевозок на железных дорогах позволяет улучшить использование перевозочных средств, повысить ритмичность отгрузки, ускорить оборот вагона в пунктах выгрузки угля, руды, минеральных удобрений и других массовых грузов. Большой опыт по организации перевозок кольцевыми маршрутами накоплен в районах, для которых характерны устойчивые транспортно-экономические связи между отправителями и получателями таких грузов. В эксплуатационной науке этой теме посвящены, например, работы В. П. Амелина [1], Н. Е. Борового, Ф. С. Гоманкова и А. М. Рудых [2], Ю. М. Волобуева и Н. Ф. Кабаева [3], В. Д. Лермана и Д. Ю. Левина [4], Г. И. Чернова [5].

Проблемой оптимизации планирования обращения составов кольцевых маршрутов в течение многих лет занимаются сотрудники таких научных организаций, как РУТ, ПГУПС, УрГУПС, ВНИИЖТ, на Дальневосточной, Октябрьской и Свердловской железных дорогах. Основой этих исследований служат методы линейного программирования и эвристические алгоритмы. В частности, ученые УрГУПС развивают подход, который строится на математическом аппарате — динамической транспортной задаче с задержками (ДТЗЗ) [6]. Разработаны различные математические постановки для задач оптимального планирования перевозок инертных строительных материалов внутридорожными кольцевыми маршрутами [7, 8], организации подвода судовых партий металла в порт, подвода массовых грузов к металлургическим комбинатам [9]. Однако укрупненный подход к отображению оборота кольцевых маршрутов, принятый в этих работах, не учитывает сложных процессов деления составов на группы в конечных пунктах оборота и необходимость поддерживать постоянный набор групп вагонов в конкретном составе. Учет таких особенностей технологического процесса требует применения в оптимизационной задаче булевых логических переменных и сводит математическую постановку к частично-целочисленной задаче линейного программирования (MILP).

Различные постановки частично-целочисленных задач линейного программирования для решения практических проблем при управлении транспортными потоками используются довольно часто [10–13], например, в [14, 15] рассматривается оптимизационная потоковая модель переработки вагонопотоков на сортировочной станции.

В представляемой статье предлагается выделить проблему оптимального текущего планирования работы с составами кольцевых маршрутов в пункте выгрузке в отдельную задачу. Конкретным объектом такого планирования может быть, например, припортовая станция, обслуживающая угольный терминал морского порта.

Пусть на станцию за период текущего планирования T , $t = 1 \dots T$, прибывает M маршрутов, $i = 1 \dots M$, в составе которых находятся группы вагонов, следующих на N грузовых фронтах, $j = 1 \dots N$. Число групп определяется не только индексом фронта, но и его вместимостью. Это означает, что в составе одного маршрута может быть несколько групп назначением на один фронт. Обозначим через q_{ijk}^+ k -ю группу в составе i -го маршрута назначением на j -й фронт, а через $Q_i^+(t)$ — прибытие маршрута на станцию в момент времени t :

$$Q_i^+(t) = \begin{cases} \sum_{j,k} q_{ijk}^+(t), & \text{если маршрут прибыл в момент } t \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

Отправление маршрута со станции зададим как $Q_i^-(t)$:

$$Q_i^-(t) = \begin{cases} \sum_{j,k} q_{ijk}^-(t), & \text{если маршрут отправлен в момент } t \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

Для описания технологического процесса работы с маршрутами, которые имеют постоянные составы, будем использовать следующие укрупненные элементы:

$Q_i^+(t)$ — прибытие i -го маршрута;

$U_{ijk}(t + \Omega_{ij})$ — работа с ijk -й группой от прибытия до подачи под выгрузку, где Ω_{ij} — длительность соответствующего набора операций;

$X_{ijk}^{de}(t)$ — возможный простой группы из-за занятости грузового фронта в течение одного такта времени;

$E_{ijk}(t + \Omega_j)$ — выгрузка ijk -й группы, где Ω_j — длительность выгрузки;

$R_{ijk}(t + \Omega_{ij})$ — уборка ijk -й группы с грузового фронта, где Ω_{ij} — длительность уборки;

$X_{ijk}^{ac}(t)$ — простой под накоплением для ijk -й группы в течение одного такта времени;

$G_{ijk}(t + \Omega_i)$ — работа с ijk -й группой от завершения накопления до готовности к отправлению, где Ω_i — длительность соответствующего набора операций;

$Q_i^-(t)$ — отправление i -го маршрута.

Поскольку после завершения накопления состав проходит подготовку к отправлению и отправляется в полном составе, то существует необходимость в использовании булевых переменных:

$b_i^{rd}(t)$ — маршрут проходит подготовку к отправлению,

$$b_i^{rd}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если маршрут проходит подготовку к отправлению;} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3)$$

$b_i^{sd}(t)$ — маршрут отправляется со станции в полном составе,

$$b_i^{sd}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если маршрут отправлен со станции} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

Для оптимизации плана работы с маршрутами необходимо определить единичные затраты на выполнение операций и на простои. Достаточно точно с экономическими затратами коррелируют затраты времени. Поэтому величины для следующих стоимостных коэффициентов можно определить пропорционально затратам времени. Перечислим эти коэффициенты:

c_{ijk}^u — стоимость работы с ijk -й группой от прибытия до подачи под выгрузку;

c_{ijk}^{de} — стоимость возможного простоя группы из-за занятости грузового фронта в течение одного такта времени;

c_{ijk}^e — стоимость выгрузки ijk -й группы;

c_{ijk}^r — стоимость уборки ijk -й группы с грузового фронта;

c_{ijk}^{ak} — стоимость простоя под накоплением для ijk -й группы в течение одного такта времени;

c_{ijk}^g — стоимость работы с ijk -й группой от завершения накопления до готовности к отправлению.

Задача оптимизации текущего планирования работы с кольцевыми маршрутами на станции решается путем минимизации целевой функции

$$\begin{aligned} \min \Rightarrow & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^u U_{ijk}(t) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^{de} X_{ijk}^{de}(t) + \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^e E_{ijk}(t) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^r R_{ijk}(t) + \\ & + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^{ak} X_{ijk}^{ak}(t) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^T c_{ijk}^g G_{ijk}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Решение ограничено набором условий, основными из которых являются балансовые ограничения.

Ограничение для каждой группы отдельного маршрута в момент прибытия t^{np} :

$$q_{ijk}^+(t_i^{np}) - U_{ijk}(t^{np} + \Omega_{ij}) - X_{ijk}^{de}(t^{np} + 1) = 0. \quad (6)$$

В следующие моменты времени:

$$U_{ijk}(t - 1 + \Omega_{ij}) - X_{ijk}^{de}(t) = 0. \quad (7)$$

Балансовые ограничения для пунктов выгрузки:

$$U_{ijk}(t) - E_{ijk}(t + \Omega_j) = 0; \quad (8)$$

$$E_{ijk}(t) - R_{ijk}(t + \Omega_{ij}) = 0; \quad (9)$$

$$\forall_j \mid \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^L \sum_{t=1}^{t+\Omega_i} E_{ijk}(t) \leq 1. \quad (10)$$

Ограничения (8) и (9) отвечают за начало выгрузки и уборку без задержек, ограничение (10) не разрешает производить одновременную выгрузку групп вагонов на одном фронте.

Балансовые ограничения на накопление маршрута и на начало подготовки к отправлению:

$$X_{ijk}^{ac}(t) + R_{ijk}(t) - G_{ijk}(t + \Omega_i) - X_{ijk}^{ac}(t + 1) = 0; \quad (11)$$

$$\forall_i \mid \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L G_{ijk}(t + \Omega_i) - Q_i^- b_i^{rd}(t) = 0, \quad (12)$$

где Q_i^- — величина состава i -го отправляемого маршрута.

Балансовые ограничения на отправление маршрута «по готовности» после подготовки к отправлению:

$$G_{ijk}(t + \Omega_i) - q_{ijk}^-(t + \Omega_i) = 0; \quad (13)$$

$$\forall_i \mid \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L q_{ijk}^-(t + \Omega_i) - Q_i^- b_i^{sd}(t + \Omega_i) = 0. \quad (14)$$

Кроме описанных выше, в качестве дополнительных ограничений могут быть учтены такие структурные и технологические особенности, как количество бригад, локомотивов, пропускные и перерабатывающие способности элементов станции и терминала. Также не является принципиальной проблемой переход к повагонному отображению при сохранении постоянства составов. Модель, представленную в статье, предполагается использовать в паре с укрупненной моделью полного оборота маршрутов. В практическом плане результаты исследования могут быть полезны при создании автоматизированной системы управления оборотом кольцевых маршрутов.

Сведения об авторах:

Александр Эрнстович Александров,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Управление эксплуатационной работой»
Уральского государственного университета путей сообщения

Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой»
Уральского государственного университета путей сообщения

Изабелла Владимировна Пытель,
аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой»
Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Alexander E. Alexandrov,
DSc in Engineering, Professor of Operations
Management Department,
Ural State University of Railway Transport

Vadim Yu. Permikin, PhD in Engineering,
Associate Professor of Operations Management Department,
Ural State University of Railway Transport

Isabella V. Pytel,
postgraduate student of Operations Management Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Амелин В. П. Эффективность перевозки угля кольцевыми маршрутами // Вестник ВНИИЖТ. 1981. № 4. С. 13–17. ISSN 2223-9731.
2. Боровой Н. Е., Гоманков Ф. С., Рудых А. М. Об обеспечении устойчивой погрузки и перевозки каменного угля железными дорогами // Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог. Москва, 1981. С. 3–11.
3. Волобуев Ю. М., Кабаев Н. Ф. Перевозки угля и руды в кольцевых маршрутах // Железнодорожный транспорт. 1980. № 11. С. 45–46. ISSN 0044-4448.
4. Совершенствование эксплуатационной работы железных дорог Сибири и Дальнего Востока / В. Д. Лерман, Д. Ю. Левин. Москва : Транспорт, 1982. 41 с.
5. Чернов Г. И. Условия повышения ритмичности работы дороги // Железнодорожный транспорт. 1972. № 12. С. 61–64. ISSN 0044-4448.
6. Козлов П. А., Миловидов С. П. Динамическая транспортная задача с задержками в сетевой постановке // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1982. № 1. С. 211–212. ISSN 0002-3388.
7. Александров А. Э., Ковалев И. А. Построение автоматизированного процесса управления обращением кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2007. № 1 (12). С. 41–47. ISSN 1815-9400.

References

1. Amelin V. P. Efficiency of coal transportation by ring routes. *Russian Railway Science Journal*. 1981. No. 4. Pp. 13–17. ISSN 2223-9731. (In Russian).
2. Borovoy N. E., Gomankov F. S., Rudykh A. M. On ensuring stable loading and transportation of coal by railways. *Optimization of the operational work of railways*. Moscow, 1981. Pp. 3–11. (In Russian).
3. Volobuev Yu. M., Kabaev N. F. Transportation of coal and ore in ring routes. *Railway Transport*. 1980. No. 11. Pp. 45–46. ISSN 0044-4448. (In Russian).
4. Lerman V. D., Levin D. Yu. Improving the operational work of the railways of Siberia and the Far East. Moscow : Transport, 1982. 41 p. (In Russian).
5. Chernov G. I. Conditions for increasing the rhythmicity of the railway. *Railway Transport*. 1972. No. 12. Pp. 61–64. ISSN 0044-4448. (In Russian).
6. Kozlov P. A., Milovidov S. P. The dynamic transportation problem with delays in the network statement. *Soviet Journal of Computer and Systems Sciences*. 1982. No. 1. Pp. 211–212. ISSN 0002-3388. (In Russian).
7. Aleksandrov A. E., Kovalev I. A. Creation of automated process for managing the circulation of ring routes. *Transport of the Urals*. 2007. No. 1 (12). Pp. 41–47. ISSN 1815-9400. (In Russian).

8. Александров А. Э., Тимухина Е. Н., Ковалев И. А. Оптимизационная модель перевозочного процесса с использованием кольцевых маршрутов // Транспорт Урала. 2017. № 4 (55). С. 36–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-36-39.
9. Попов А. Т., Суслова О. А., Воронкова Е. А. Оптимизация транспортного обслуживания агломерационного производства с учетом динамики потоков // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 99–104. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-99-104.
10. Infrastructure modeling and optimization to solve real-time railway traffic management problems / L. Lindenmaier, I. F. Lövétei, G. Lukács, S. Aradi // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2021. 49:3. Pp. 270–282. DOI: 10.3311/PPtr.18582.
11. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd [et al.] // Transportation Research. Part B: Methodological. 2014. 63. Pp. 15–37. DOI: 10.1016/j.trb.2014.01.009.
12. Khoshniyat F., Törnquist Krasemann J. Analysis of Strengths and Weaknesses of a MILP Model for Revising Railway Traffic Timetables // Proceedings of the 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017). 2017. 10. 17 p. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2017.10
13. Behiri W., Ozturk O., Belmokhtar-Berraf S. Urban Freight by Rail: A MILP Modeling for Optimizing the Transport of Goods // Proceedings of the 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Bordeaux, France, June 1–4, 2016. hal-01740892.
14. Модель основной технологической линии сортировочной станции / А. Э. Александров, А. Г. Галкин, В. Ю. Пермикин, Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. 2018. № 4 (59). С. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12.
15. Модель оптимального поездообразования на сортировочной станции с учетом обеспечения локомотивными бригадами / В. Ю. Пермикин, А. Э. Александров, И. А. Ковалев [и др.] // Транспорт Урала. 2023. № 4 (79). С. 27–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-27-33.
8. Alexandrov A. E., Timukhina E. N., Kovalev I. A. Optimization model of the transportation process with the use of unit trains. *Transport of the Urals*. 2017. No. 4 (55). Pp. 36–39. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-4-36-39. (In Russian).
9. Popov A. T., Suslova O. A., Voronkova E. A. Optimization of transport service of sinter production with the consideration for traffic dynamics. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 99–104. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-99-104. (In Russian).
10. Lindenmaier L., Lövétei I. F., Lukács G., Aradi S. Infrastructure modeling and optimization to solve real-time railway traffic management problems. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2021. 49:3. Pp. 270–282. DOI: 10.3311/PPtr.18582.
11. Cacchiani V., Huisman D., Kidd M. [et al.]. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research. Part B: Methodological*. 2014. 63. Pp. 15–37. DOI: 10.1016/j.trb.2014.01.009.
12. Khoshniyat F., Törnquist Krasemann J. Analysis of Strengths and Weaknesses of a MILP Model for Revising Railway Traffic Timetables. *Proceedings of the 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017)*. 2017. 10. 17 p. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2017.10
13. Behiri W., Ozturk O., Belmokhtar-Berraf S. Urban Freight by Rail: A MILP Modeling for Optimizing the Transport of Goods. *Proceedings of the 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Bordeaux, France, June 1–4, 2016. hal-01740892.
14. Alexandrov A. E., Galkin A. G., Permikin V. Yu., Timukhina E. N. Model of marshalling station main processing line. *Transport of the Urals*. 2018. No. 4 (59). Pp. 7–12. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-4-7-12. (In Russian).
15. Permikin V. Yu., Alexandrov A. E., Kovalev I. A. [et al.]. Optimal train formation model at a marshalling station taking into account the provision of locomotive crews. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 27–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-27-33. (In Russian).

Объем статьи 0,42 авторских листа



Научная статья

УДК 656.078

Модель городского кольцевого железнодорожного маршрута с учетом пространственной неоднородности пассажиропотоков

Александр Валериевич Мартыненко^{1, 2}, Елена Геннадьевна Филиппова¹¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия²Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Model of an urban ring railway route taking into account the spatial heterogeneity of passenger flows

Alexander V. Martynenko^{1, 2}, Elena G. Filippova¹¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia²Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Эффективное функционирование транспортной системы — одно из ключевых условий обеспечения устойчивого социально-экономического роста современного мегаполиса. Основная функция городского общественного транспорта (ГОТ) заключается в бесперебойной, комфортабельной и безопасной перевозке пассажиров, которая напрямую влияет на качество жизни населения. Для повышения эффективности работы ГОТ во многих мегаполисах используется железнодорожный транспорт, который помимо перечисленных свойств обладает также высокой скоростью и значительной пропускной способностью.

В статье исследуется модель упрощенной городской системы наземного общественного транспорта для прямоугольной улично-дорожной сети (УДС) с кольцевым железнодорожным маршрутом. При условии, что пространственное распределение пассажиропотоков подчиняется гравитационной модели, получены распределения количества пассажиров по длине поездки и зависимость сокращения средней продолжительности поездки по сети от соотношений размера УДС и радиуса кольцевого железнодорожного маршрута.

Ключевые слова: матрица корреспонденций, гравитационная модель, транспортный район, улично-дорожная сеть, моделирование, транспортная сеть, наземное железнодорожное кольцо, средняя продолжительность поездки

Abstract

The effective functioning of the transport system is one of the key conditions for ensuring sustainable socio-economic growth in a modern metropolis. The main function of urban public transport is the uninterrupted, comfortable and safe transportation of passengers, which directly affects the quality of life of the population. To improve the efficiency of urban public transport in many megacities, rail transport is used, which, in addition to the listed properties, also has high speed and significant capacity.

The article examines a model of a simplified urban surface public transport system for a rectangular street and road network with a ring railway route. Provided that the spatial distribution of passenger flows obeys the gravitational model, the distributions of the number of passengers along the length of the trip and the dependence of the reduction in the average duration of the trip on the network on the ratio of the size of the road network and the radius of the ring railway route are obtained.

Keywords: correspondence matrix, gravity model, transport area, street and road network, modeling, transport network, surface railway ring, average trip duration

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-38-43

ВВЕДЕНИЕ

Общественный транспорт играет ключевую роль в жизни современных мегаполисов и агломераций, обеспечивая мобильность населения, способствуя снижению загруженности дорог, улучшая экологию и помогая экономить ресурсы. Однако рост численности и плотности населения, приводящий к увеличению пассажиропотоков, требует постоянного развития и совершенствования системы городского общественного транспорта. Во многих мегаполисах мира, например в Берлине, Париже, Токио, для этих целей используется городской железнодорожный транспорт, основными преимуществами которого являются мобильность, комфортабельность, экологичность и безопасность. В России наиболее успешным примером использования городского железнодорожного транспорта является Москва, где в 2016 г. была запущена кольцевая железнодорожная линия протяженностью 54 км, ежедневный объем пассажироперевозок которой в настоящий момент составляет около 600 тыс. чел. [1]. Эффективность использования городского наземного железнодорожного кольца стимулирует планы по внедрению и развитию этого вида транспорта и в других агломерациях России.

Например, в Санкт-Петербурге ведется работа по согласованию проекта, подобного Московскому Центральному кольцу [2]. Кроме того, в активной стадии находятся исследования по планированию строительства железнодорожного кольца для городских электричек в Тюмени [3] и Казани [4]. В Екатеринбурге проектная группа в составе мэрии, правительства Свердловской области и РЖД также ведет интенсивную работу по планированию строительства Екатеринбургского центрального пассажирского кольца, который будет включать два основных маршрута — Новокольцовский и Юго-Западный. Концепция это-

го проекта заключается не только в транспортной интеграции отдельных районов города (аэропорт Кольцово, микрорайоны Солнечный, Академический, Широкая Речка, ВИЗ), но и в соединении Екатеринбурга с муниципальными образованиями его агломерации, такими как Березовский, Верхняя Пышма, Первоуральск, Среднеуральск, Сысерть, Ревда и Арамилы [5].

Основная цель работы, представленной в настоящей статье, заключается в исследовании базовых эффектов, возникающих в городской системе общественного транспорта после появления кольцевого железнодорожного маршрута. Для этого используется модель простейшей прямоугольной улично-дорожной сети (УДС) с кольцевой линией, в которой пространственная неоднородность пассажиропотоков моделируется при помощи гравитационной модели с показательной функцией тяготения [6, 7].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Рассмотрим модель системы городского наземного транспорта общего пользования в виде прямоугольной сетки $n \times n$, каждый из n^2 квадратов которой является транспортным районом города, а линии сетки представляют собой совокупность дорог, предназначенных для движения транспортных средств. Примем, что пассажиры перемещаются между центрами транспортных районов (центроидами), а маршруты следования городского транспорта общего пользования (например, автобуса) проходят по взаимно перпендикулярным линиям прямоугольной сетки и допускают пересадку в любой точке их пересечения. Для оптимизации движения транспорта добавим кольцевой наземный железнодорожный маршрут, по которому будет курсировать городская электричка. Визуальное представление модели с необходимыми описательными характеристиками представлено на рис. 1.

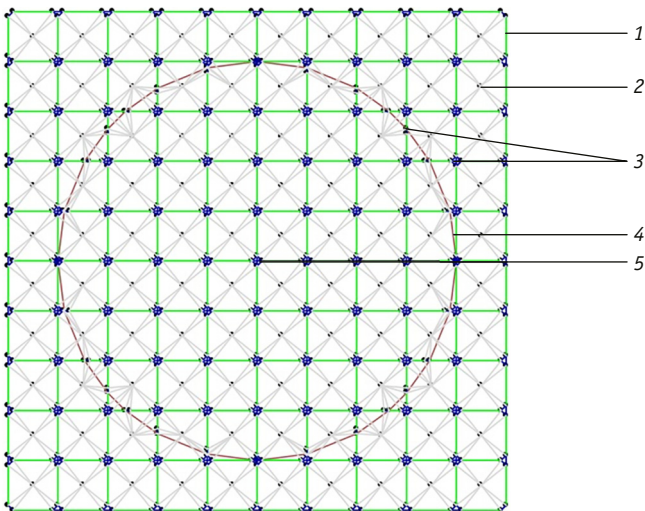


Рис. 1. Модель системы наземного городского транспорта:
1 — расстояние между узловыми точками d , км;
2 — вершина центроида; 3 — узловые точки;
4 — железнодорожное кольцо;
5 — центр железнодорожного кольца $\left(\frac{d \cdot 10}{2}; \frac{d \cdot 10}{2}\right)$

Модель, рассчитывая продолжительность поездки пассажира, учитывает: время, затраченное на путь пешком от дома до остановки, τ_p ; скорость автобуса V_A ; время пересадки между автобусами τ_A ; время пересадки между автобусом и городской электричкой τ_T ; скорость городской электрички по кольцевой магистрали V_T . С детальным описанием моделей УДС с кольцом и без кольца можно ознакомиться в материалах [1]. В данной работе представленную модель будем рассматривать при конкретных значениях перечисленных параметров (табл. 1).

Таблица 1

Числовые значения параметров моделирования

Параметр	n	d , км	τ_A , ч	τ_p , ч	V_A , км/ч	τ_T , ч	V_T , км/ч
Значение параметра	10	2	10	10	14	10	40

В предыдущих исследованиях авторов уже анализировались свойства этой модели. Например, в работе [8] был изучен вопрос эффективности добавления городского железнодорожного кольца в УДС города. А в исследовании [9] рассматривались изменения характеристик улучшения транспортной системы города в зависимости от его размеров. Было показано, что наиболее значимый эффект при пересадке с городского транспорта общего пользования на кольцевую железнодорожную линию будет ощутим в крупных городах, а в городах меньшего размера введение городского железнодорожного кольцевого маршрута улучшит транспортную связь между удаленными районами только при организации высокой скорости движения. Результаты моделирования, выполненного в публикации [10], показывают, какими должны быть характеристики вводимой в УДС кольцевой железнодорожной линии, чтобы достичь наилучшего транспортного эффекта.

В работах [8–10] исследовалась транспортная система в предположении равномерности распределения корреспонденций между транспортными районами. Однако в действительности такое предположение никогда не выполняется, а пассажиропотоки являются пространственно неоднородными и зависят от расстояния и размеров транспортных районов. Поэтому в данной работе при расчете характеристик эффективности транспортной сети применяется матрица корреспонденций между транспортными районами, смоделированная на основе гравитационной модели.

Для использования гравитационной модели необходимо знать объемы отправок и прибытий пассажиров для каждого транспортного района. Эти объемы также будут смоделированы. При этом будем исходить из того, что в типичном российском крупном мегаполисе на периферии находятся спальные районы, выступающие точками зарождения пассажиропотока, а основные точки его притяжения расположены в центре города. Соответственно будем предполагать, что объемы отправок и прибытий обратно пропорциональны степени удаленности района от центра города. Пусть параметр α характеризует неравномерность расселения жителей города, параметр β —

неравномерность точек притяжения поездов, параметр S — множество значений объемов отправок из транспортных районов, параметр D — множество значений объемов прибытия. Вычислив расстояние r_i от каждого из 100 центроидов до центра города, рассчитаем векторы объемов отправок s и d следующим образом:

$$s = \{s_1, s_2, \dots, s_n\},$$

где $s_i = \frac{\mu \cdot a_i}{|a|}$, $a_i = (r_i)^\alpha$, $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$;

$$d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\},$$

где $d_j = \frac{\mu \cdot b_j}{|b|}$, $b_j = (0,001 + r_j)^{-\beta}$, $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$.

Примем, что $\mu = 10^6$, $\alpha = 0,1$, $\beta = 1,3$. Отметим, что определение векторов s и d гарантирует выполнение условия замкнутости

$$\sum_{i \in S} s_i = \sum_{j \in D} d_j.$$

Объем корреспонденций между двумя транспортными районами, согласно гравитационной модели, имеет вид

$$\begin{cases} p_{ij} = \alpha_i \cdot \beta_j \cdot s_i \cdot d_j \cdot e^{-\gamma \cdot t_{ij}}, & i \in S, j \in D, \\ \alpha_i = \left(\sum_{j \in D} \beta_j \cdot d_j \cdot e^{-\gamma \cdot t_{ij}} \right)^{-1}, \\ \beta_j = \left(\sum_{i \in S} \alpha_i \cdot s_i \cdot e^{-\gamma \cdot t_{ij}} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (1)$$

При этом калибровочные коэффициенты α_i и β_j вычисляются при заданном значении параметра γ методом Фрэтара — итерационным методом решения системы уравнений [11]

$$\begin{cases} \alpha_i = \left(\sum_{j \in D} \beta_j \cdot d_j \cdot e^{-\gamma \cdot t_{ij}} \right)^{-1}, \\ \beta_j = \left(\sum_{i \in S} \alpha_i \cdot s_i \cdot e^{-\gamma \cdot t_{ij}} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Параметру γ придадим значение $\gamma = 1,4$. Величина t_{ij} — это продолжительность поездки между транспортными районами i и j . Данная величина вычислена для модели городского движения без учета железнодорожного кольца и с его наличием. Таким образом, получены две матрицы транспортных корреспонденций размером 100×100 , элементы которых представлены количеством пассажиров между транспортными районами.

Для исследования того, как изменяется скорость передвижения пассажиров по городу с добавлением к общественному транспорту городской электрички, рассмотрим две величины:

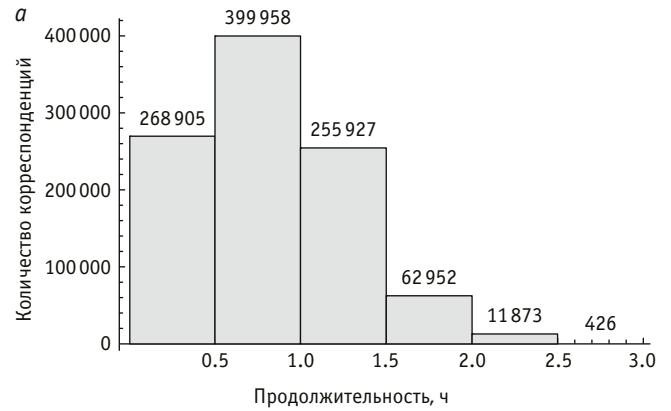


Рис. 2. Распределение пассажирских корреспонденций по продолжительности поездки для сети без кольца (а) и с кольцом (б)

время, затраченное пассажиром на поездку из транспортного района i в транспортный район j только с использованием автобуса,

$$T_{old}(d, n, \tau_A, \tau_f, V_A, i, j); \quad (3)$$

продолжительность поездки из транспортного района i в транспортный район j с использованием автобуса и железнодорожной кольцевой линии:

$$T_{new}(d, n, k, \tau_A, \tau_f, V_A, \tau_T, V_T, i, j). \quad (4)$$

Полученные в результате моделирования оптимальные временные затраты, ч, на перемещение между каждой парой транспортных районов и количество пассажирских корреспонденций для каждой пары транспортных районов сети позволяют наглядно изобразить распределение корреспонденций по интервалам продолжительности поездки (рис. 2).

Согласно рис. 2, введение железнодорожного кольца в транспортную систему города позволит пассажирам быстрее добраться до удаленных районов города. Например, без пересадки на городскую электричку 33 % пассажиропотока ежедневно затрачивают на путь более 1 ч, а при наличии в сети города кольцевой линии количество таких пассажиров может сокра-

тяться до 9 %. Кроме того, в 1,5 раза увеличится число пассажиров, чья поездка по продолжительности не превышает 30 мин, а самая длительная по времени поездка сократится с 3 до 2 ч, что весьма актуально для современных мегаполисов. Вместе с тем увеличивается мобильность пассажиров за счет сокращения средней продолжительности поездки с 48 до 35 мин.

В сглаженном виде обе гистограммы представлены на рис. 3.

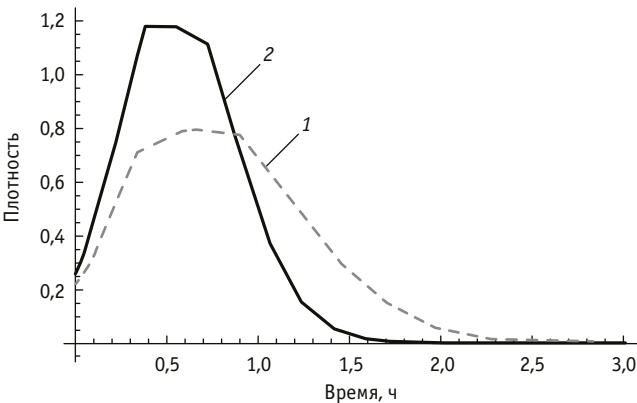


Рис. 3. Плотность распределения продолжительности поездок:
1 — для сети без кольца; 2 — для сети с кольцом

Из рис. 3 можно сделать вывод, что с внедрением в транспортную систему кольцевого маршрута значительно увеличится доля корреспонденций с продолжительностью поездки от 20 мин до 1 ч. Также стоит отметить следующее: вероятность того, что временные затраты на поездку составят менее 35 мин (средняя продолжительность поездки по сети с кольцом) выше для тех пассажиров, которые предпочтут совершить пересадку на городскую электричку. Согласно расчетам, соответственные вероятности составят 0,51 и 0,37.

Сравнительный анализ моделей транспортной сети размера 10×10 с городским железнодорожным кольцом и без

него при указанных числовых значениях параметров, входящих в модель, позволяет сделать вывод о сокращении средней продолжительности поездки за счет пересадки пассажиров на городскую электричку. Такой результат требует ответа на следующий вопрос: при каком размере железнодорожного кольца средняя продолжительность поездки будет минимальной? Для этого рассмотрим две функции, первая из которых вычисляет среднюю продолжительность поездки между парой транспортных районов для сети без кольца, а вторая — для сети с кольцевой линией:

$$Z_{old}(d, n, \tau_A, \tau_f, V_A) = \frac{\sum_{i,j} P_{ij} \cdot T_{old}(d, n, \tau_A, \tau_f, V_A)}{\sum_{i,j} P_{ij}}; \quad (5)$$

$$Z_{new}(d, n, r, \tau_A, \tau_f, V_A, \tau_T, V_T) = \frac{\sum_{i,j} P_{ij} \cdot T_{new}(d, n, r, \tau_A, \tau_f, V_A, \tau_T, V_T)}{\sum_{i,j} P_{ij}}. \quad (6)$$

В функции (6) параметры, отвечающие за размер транспортной сети и радиус кольца, будем варьировать, а расстоянию между узловыми точками, времени пересадки, скорости автобуса и городской электрички придадим значения, близкие к реальным для среднего мегаполиса. Таким образом, на следующем этапе моделирования анализируются две функции $Z_{old}(2, n, 10, 10, 14)$ и $Z_{new}(2, n, r, 10, 10, 14, 10, 40)$ с вариацией параметра n от 6 до 20 с шагом 2, радиус кольца при этом изменяется от 1 до $\frac{n}{2}$ с шагом 1.

Результаты вычисления средней продолжительности поездки при различных размерах транспортной сети и радиуса кольцевой железнодорожной линии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные о средней продолжительности поездки пассажиров в транспортной сети
без кольца и с кольцевой железнодорожной линией, мин

Размер сети	Сеть без кольца	Транспортная сеть с железнодорожной кольцевой линией радиуса r									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6×6	40	32	25	24							
8×8	41	40	34	29	28						
10×10	48	46	42	37	35	39					
12×12	53	52	48	44	42	44	39				
14×14	58	57	54	50	48	50	45	45			
16×16	61	61	59	56	53	54	50	50	50		
18×18	64	64	63	61	59	60	56	55	55	55	
20×20	67	108	100	92	82	84	73	70	59	69	74

Как видно из табл. 2, добавление железнодорожного кольца небольшого размера в относительно некрпную транспортную сеть позволит снизить среднюю продолжительность поездки на 12–20 %. Для крупного мегаполиса такой транспортный эффект составит 14 %.

Понятно, что отмеченное уменьшение среднего значения сопровождается изменением распределения продолжительности поездки для кольца любого радиуса. Пример такого изменения в транспортной сети 10×10 представлен на рис. 4.

Согласно результатам, представленным в табл. 2, для улучшения мобильности пассажиров при перемещении по транспортной сети мегаполиса диаметр железнодорожного кольца должен составлять 80–100 % от размеров городской УДС.

Из рассмотренной общей модели следует, что вне зависимости от каких-то специфических особенностей конкретного мегаполиса добавление наземной железнодорожной кольцевой линии в его транспортную систему позволяет пассажирам существенно снизить затраты времени на поездки. При этом наибольший положительный эффект достигается в случае, когда кольцевой железнодорожный маршрут проходит по периферии города.

Сведения об авторах:

Александр Валериевич Мартыненко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения, старший научный сотрудник Центра развития и размещения производительных сил Института экономики Уральского отделения Российской академии наук

Елена Геннадьевна Филиппова, старший преподаватель кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения

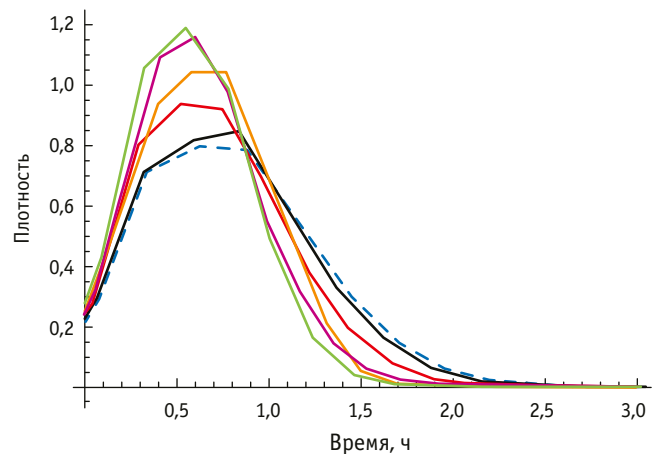


Рис. 4. Плотности распределения продолжительности поездок при добавлении железнодорожного кольца в зависимости от его радиуса (для сети 10×10):

— для сети без кольца; — для сети с кольцом $r = 1$;
— для сети с кольцом $r = 2$; — для сети с кольцом $r = 3$;
— для сети с кольцом $r = 4$; — для сети с кольцом $r = 5$

Authors information:

Alexander V. Martynenko, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport, Senior Researcher, Productive Forces Development and Placement Centre, Institute of Economics, the Ural branch of Russian Academy of Sciences

Elena G. Filippova, Senior Lecturer, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

- Власов Д. Н., Бахирев И. А. Московское центральное кольцо как катализатор изменения мобильности жителей // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 1. С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-1-53-58>.
- Об изменениях, которые вносятся в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.06.2014 г. № 1032-р. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/3895> (дата обращения: 12.09.2024).
- О внесении изменений в распоряжение Главного управления строительства Тюменской области от 25.08.2022 г. № 94-р : распоряжение Главного управления строительства Тюменской области от 06.09.2023 г. № 110-р. URL: https://admtymen.ru/ogv_ru/finance/town_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle (дата обращения: 12.09.2024).
- Генеральный план городского округа Казань. Положение о территориальном планировании. URL: <https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy-komitet/upravlenie-arkhitektury-i-gradostroitelstva-ispolnitelnogo-komiteta-g-kazani/gradostroitelstvo/?lang=ru> (дата обращения: 21.10.2024).

References

- Vlasov D. N., Bakhirev I. A. The Moscow Central Circle as a Catalyst for Change of Residential Mobility. *Academia. Architecture and Construction*. 2018. No. 1. Pp. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2018-1-53-58>. (In Russian).
- About the changes that are being made to the Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 : the Order of the Government of the Russian Federation dated 11.06.2014 No. 1032-r. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/3895> (access date: 12.09.2024). (In Russian).
- About the changes in the Decree of the Directorate of Building of Tyumen region from 25.08.2022. No. 94-r : the Decree of the Directorate of Building of Tyumen region dated 06.09.2023 No. 110-r. URL: https://admtymen.ru/ogv_ru/finance/town_planning/more.htm?id=12035508@cmsArticle (access date: 12.09.2024). (In Russian).
- General plan of Kazan urban district. Regulations of the territorial planning. URL: <https://kzn.ru/meriya/ispolnitelnyy-komitet/upravlenie-arkhitektury-i-gradostroitelstva-ispolnitelnogo-komiteta-g-kazani/gradostroitelstvo/?lang=ru> (access date: 21.10.2024). (In Russian).

5. Ямщикова В. Губернатор рассказал, как наземное метро свяжет Екатеринбург с соседними городами. URL: <https://66.ru/news/society/248597/> (дата обращения: 13.09.2024).
6. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
7. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А. В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский [и др.] ; под ред. А. В. Гасникова. Москва : МФТИ, 2010. 360 с.
8. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Моделирование городской улично-дорожной сети с кольцевой железнодорожной линией // *Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 18 мая 2023 г. Вып. 7 (255)*. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2023. С. 227–230.
9. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Моделирование влияния городского кольцевого железнодорожного маршрута на транспортную доступность в зависимости от характеристик улично-дорожной сети // *Транспорт Урала*. 2023. № 4 (79). С. 41–46. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-41-46.
10. Мартыненко А. В., Филиппова Е. Г. Влияние кольцевого железнодорожного городского транспорта на интегральные показатели доступности // *Железнодорожный транспорт и технологии : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 29–30 ноября 2023 г.* Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2024. С. 354–357.
11. Furness K. P. Time function iteration // *Traffic Engineering and Control*. 1965. 7. Pp. 458–460.
5. Yamshchikova V. The governor told how the ground metro of Ekaterinburg will connect Ekaterinburg with other towns. URL: <https://66.ru/news/society/248597/> (access date: 13.09.2024). (In Russian).
6. Ortuzar J. D., Willumsen L. G. *Modelling Transport*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. 606 p.
7. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminskiy E. A. [et al.]. *Introduction to modeling of traffic flows on the basis of equilibrium theory* ; ed. by A. V. Gasnikov. Moscow : Moscow Institute of Physics and Technology, 2010. 360 p. (In Russian).
8. Martynenko A. V., Filippova E. G. Modelling of street and road network with circle railway line. *Transport: logistics, construction, operation, management* : proceedings of International scientific and practical conference, Ekaterinburg, May 18, 2023. Issue 7 (255). Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2023. Pp. 227–230. (In Russian).
9. Martynenko A. V., Filippova E. G. Modelling of the influence of the urban circle railway rout on the transport accessibility depending on the characteristics of the street and road network. *Transport of the Urals*. 2023. No. 4 (79). Pp. 41–46. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-4-41-46. (In Russian).
10. Martynenko A. V., Filippova E. G. Impact of urban ring rail transport on integral accessibility indicators. *Railway transport and technologies* : proceedings of International scientific and practical conference, Ekaterinburg, November 29–30, 2023. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2024. Pp. 354–357. (In Russian).
11. Furness K. P. Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*. 1965. 7. Pp. 458–460.

Объем статьи 0,62 авторских листа

Научная статья
УДК 658.014

Методы планирования грузовых перевозок в условиях интеграции железнодорожных инфраструктур

Олег Николаевич Ларин¹, Амарсанаа Оюунгарав¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Methods of freight transportation planning in the context of rail infrastructure integration

Oleg N. Larin¹, Amarsanaa Oyuungarav¹

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

В статье проанализированы особенности планирования железнодорожных грузовых перевозок в межсетевом сообщении по сквозным маршрутам. Этот вид сообщений предусматривает работу перевозчиков на инфраструктурах разных владельцев под их управлением движением поездов. Рассмотрены три способа выполнения перевозок по сквозным межсетевым маршрутам: перевозка в прямом межсетевом сообщении; перевозка в непрямом межсетевом сообщении; перевозка в частично прямом межсетевом сообщении. Сочетание этих способов позволяет наиболее полно использовать ограниченные сетевые ресурсы, что обеспечивает увеличение объемов перевозок, а следовательно, рост доходов перевозчиков и владельцев инфраструктуры. Предложены оригинальные методы оптимального распределения плановых объемов перевозок по различным способам реализации сквозных маршрутов, а также изменения сроков отправки нераспределенных объемов для получения наибольшего экономического эффекта с учетом ограниченных сетевых ресурсов в отдельные периоды планового периода.

Ключевые слова: планирование перевозок, интеграция железнодорожных инфраструктур, межсетевое сообщение, сквозные маршруты, сетевые ресурсы

Abstract

The article discusses the features of planning rail freight transportation in inter-network communication along through routes. This type of communication provides the ability of the carrier to work on the infrastructures of two or more owners under their control of train traffic. The article considers three methods of performing transportation along through inter-network routes — transportation in direct inter-network communication; transportation in indirect inter-network communication; transportation in partially direct inter-network communication. The combination of these methods allows for the most complete use of limited network resources, which will ensure an increase in transportation volumes and an increase in the income of carriers and infrastructure owners. Original methods are proposed for the optimal distribution of planned transportation volumes by various methods of implementing through routes, as well as changing the timing of sending undistributed volumes to obtain the greatest economic effect, taking into account the limited network resources in certain periods of the planning period.

Keywords: rail transportation planning, multi-owner infrastructure, interconnection, through routes, network resources

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-44-50

ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсивного развития внешнеторговых связей между странами Евразийского континента возрастает роль железных дорог для перевозки экспортных, импортных и транзитных грузов. Для освоения дополнительных объемов и развития новых направлений перевозок во многих государствах реализуются масштабные проекты по модернизации существующей и строительству новой железнодорожной инфраструктуры. При этом новые объекты создаются не только государственными железнодорожными компаниями, но и частными, в том числе на условиях государственно-частного партнерства. Поэтому в настоящее время ведется поиск новых способов организации эффективного взаимодействия нескольких железнодорожных перевозчиков и владельцев инфраструктур, в том числе координации процессов планирования перевозок, чтобы обеспечить максимальное выполнение заявок клиентов за счет наиболее полного использования ресурсов единой сети. Это требует разработки новых методов планирования перевозок для условий интеграции железнодорожных инфраструктур. Данная задача рассмотрена на примере железнодорожной системы Монголии, для которой актуальна проблема организации и планирования перевозок по нескольким инфраструктурам с участием разных перевозчиков [1–3].

В последние годы в Монголии реализуются крупные проекты по строительству новых железнодорожных магистралей, в результате увеличивается протяженность национальной железнодорожной сети дорог общего и необщего пользования. В стране действуют государственные и частные железнодорожные перевозчики, которые владеют линейной и терминальной инфраструктурой, локомотивами и подвижным составом. В том числе две компании с государственным участием — совместное Монголо-Российское акционерное общество «Улан-Баторская железная дорога» (УБЖД) и государственная акционерная компания «Монгольская железная дорога» (МЖД), а также три частных компании: ОАК «ТТЗ» (ТТЗ), ОАК «МТЛож» (МТЛож) и ОАК «МТЛайн» (МТЛайн). Технические характеристики железнодорожных инфраструктур этих компаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики железнодорожных инфраструктур Монголии

Компания / железнодорожный участок	Длина путей, км	Допустимая нагрузка на ось, т	Пропускная способность, пар поездов	Средний вес поездов, т
УБЖД / Сухэ-Батор — Замын-Ууд	1108,7	23,5	18	3200
МТЗ / Цогтцэций — Зуунбаян	416,1	25	8	5680
ТТЗ / Тавантолгой — Гашуунсухайт	233,6	25	14	10000
МТЛайн / Номгон — Ханги	226,3	25	8	4500
МТЛож / Цагаанхаалга — Хандгайт	83,7	23,5	8	6732

Прежде монгольские железнодорожные компании осуществляли перевозки только в границах собственной сети, а при переходе подвижного состава на инфраструктуру смежных владельцев происходила смена перевозчика. В настоящее время перевозчикам предоставлена возможность пользоваться инфраструктурой всех владельцев на договорных условиях при сохранении централизации управления движением подвижного состава в масштабах всей страны. При этом перевозчики и владельцы смежных инфраструктур должны согласовывать объемы грузообмена между инфраструктурами, так как последние имеют ограничения по пропускным и перерабатывающим способностям.

Для дальнейшего увеличения объемов грузовых перевозок по железным дорогам страны с использованием ресурсов нескольких компаний руководство профильного ведомства проводит политику интеграции железнодорожных инфраструктур. Согласно [4], современные способы планирования производственной деятельности перевозчиков и владельцев инфраструктуры должны быть ориентированы на комплексную интегрированную технологию на основе экстерриториального подхода, чтобы сбалансировать ресурсное обеспечение плановых объемов перевозок. Ожидается, что интеграция железнодорожных инфраструктур создаст условия для роста объемов перевозок в межсетевом сообщении, для повышения качества услуг и доходов перевозчиков и владельцев инфраструктуры.

ХАРАКТЕРИСТИКА МЕЖСЕТЕВЫХ СООБЩЕНИЙ

Под межсетевым сообщением (МСС) понимается перевозка грузов между пунктами отправления и назначения, которые находятся в границах разных инфраструктур. При этом инфраструктуры пунктов отправления и назначения необязательно должны быть смежными, т.е. иметь общую границу: для МСС может использоваться транзитная инфраструктура. При переходе поездов между смежными инфраструктурами осуществляется передача управления движением поездов от прежнего к последующему владельцу инфраструктуры. Передача поездов и вагонов (в том числе контейнеров) при их переходе с одной инфраструктуры на смежную производится на межсетевом стыковом пункте (МСП), в качестве которого выступает станция или разъезд, являющиеся ближайшими к точке пересечения двух инфраструктур.

Для реализации межсетевых грузовых сообщений организуются сквозные межсетевые маршруты (СММ), проходящие от станции отправления до станции назначения по инфраструктурам двух и более владельцев. В контексте данного исследования начальные и конечные пункты СММ задаются клиентом. Выделим три базовых способа организации перевозок по СММ:

1) перевозка в прямом межсетевом сообщении (ППС), при которой груз перевозится от станции отправления до станции назначения одним перевозчиком по всем участкам собственной и (или) смежных и транзитных инфраструктур с использованием собственных и арендованных локомотивов на согласованных с их владельцами условиях и с оплатой использованных ресурсов по установленному тарифу;

2) перевозка в непрямом межсетевом сообщении (ПНС), при которой груз перевозится по всему СММ несколькими перевозчиками в границах собственных инфраструктур с передачей поездов, вагонов и контейнеров последующим перевозчикам на МСП;

3) перевозка в частично прямом межсетевом сообщении (ПЧС) является комбинацией двух предыдущих способов, в которой задействовано несколько перевозчиков, осуществляющих доставку как по собственным, так и по отдельным смежным и транзитным участкам. При этом допускается использовать различные комбинации перераспределения транспортной работы между перевозчиками по участкам СММ, т.е. в рамках одного маршрута может быть образовано несколько вариаций ПЧС.

Для перевозки грузов по СММ используется маршрутная технология. Отправительские маршруты (ОМ) формируются в составе поездов установленного веса или длины [5]. Плановый объем перевозок Q_{kt} по каждому k -му ($k = 1, 2, \dots, K$) сквозному маршруту в соответствующий t -й ($t = 1, 2, \dots, T$) месяц предстоящего года может быть реализован различными z -ми ($z = 1, N$) вариантами, которые характеризуются набором способов g ($g = 1, 2, \dots, G$) выполнения перевозок и звеньев p_w ($w = 1, N$) единой сети, по которым проходят k -е маршруты. Понятие «способ выполнения перевозки» шире понятия «способ организации перевозки» по СММ, так как допускает использование фактическим перевозчиком на каждом звене p_w сети как собственных, так привлеченных от владельцев инфраструктуры или третьих лиц сетевых ресурсов v_w (линейная и узловая инфраструктура, вагоны, локомотивы, контейнеры, терминальные устройства и т.д.).

Распределение плановых объемов перевозок Q_{kt} по z -м вариантам проводится с учетом ограниченности ресурсов на входящих в данные варианты звеньях p_w сети. Для получения достоверной и оперативной информации о наличных ресурсах в каждом звене используются сведения из информационных систем участников перевозочного процесса [6]. Методические особенности оценки ресурсов инфраструктуры железных дорог при планировании объемов перевозок грузов на предстоящие периоды рассмотрены в работах [7, 8].

Один ОМ в плановый период t перевозит груз по k -му маршруту g -м способом в объеме $q_{kt}(g)$. Фактически запланированные к перевозке объемы Q_{kzt} по маршруту определяются как произведение $q_{kt}(g)$ на количество $N_{kt}(g)$ назначенных ОМ для каждого g -го способа выполнения:

$$Q_{kzt} = \sum_{g=1}^G \{N_{kt}(g) \cdot q_{kt}(g)\}. \quad (1)$$

Однако фактически запланированный объем Q_{kzt} в соответствии с z -м вариантом перевозки может быть меньше планового объема Q_{kt} из-за дефицита наличных ресурсов v_w на любом из звеньев p_w сети. В связи с этим актуальной является проблема разработки научно обоснованных положений, подходов и методов планирования перевозок в МСС, использование которых позволит рационально распределять имеющиеся ресурсы между различными маршрутами перевозок и способами их реализации.

МОДЕЛЬ СКВОЗНЫХ МЕЖСЕТЕВЫХ МАРШРУТОВ

Любой k -й сквозной маршрут есть совокупность начальных, конечных и промежуточных (транзитных) пунктов и участков, которые являются звеньями p_w единой железнодорожной сети: $M_k = \{p_{wk}\}$. Начальный S_i и конечный S_j пункты маршрута ($S_i, S_j \in S; i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$) соединяются участками r_{ij} напрямую или через транзитные пункты s , которые также являются начальными s_i и конечными s_j ($s_i, s_j \in S; i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$) пунктами для транзитных участков r_{ij} сквозного маршрута. Пункты и соединяющие их участки сети могут входить в состав разных маршрутов в качестве начального, конечного и промежуточного пунктов или участка соответственно: $M_k = \{S_{ik}, S_{jk}, S_{ik}, S_{jk}, r_{ijk}\}$. Любое звено сети p_w , которое в разные периоды t может использоваться для одного или нескольких k -х маршрутов, обладает некоторым количеством $V_{wt}(h)$ соответствующих h -х ($h = 1, 2, \dots, H$) видов ресурсов $v_w(h)$. Сетевые ресурсы для выполнения СММ выделяют их владельцы — собственники линейной и узловой инфраструктуры, терминалов, погрузочно-разгрузочных средств, локомотивов, подвижного состава и т.д. Владельцы самостоятельно решают вопрос о распределении имеющихся у них ресурсов по способам использования в соответствии с их технологическим назначением, нормативными требованиями и заключенными договорами (например, для собственных технологических нужд, для выполнения заявок своих клиентов, для СММ других перевозчиков и т.д.). На основании данных решений собственников определяются доступные виды и количество $V_{wt}(h)$ сетевых ресурсов для организации МСС.

При перевозке груза в объеме $q_{kt}(g)$ во временной интервал t каждым g -м способом на любом звене p_{wk} маршрута используется технологически обоснованное нормативное количество $f_{wkg}(h)$ необходимых h -х видов ресурсов. Общее количество ресурсов каждого вида $F_{wt}(h)$, закрепленных под назначенные к перевозке ОМ по всем маршрутам на соответствующих звеньях, составит

$$F_{wt}(h) = \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \{N_{kt}(g) \cdot f_{wkg}(h)\}. \quad (2)$$

Для выполнения всех запланированных перевозок наличное количество необходимых ресурсов $V_{wt}(h)$ должно превышать их потребное количество $F_{wt}(h)$. Об избытке ресурса свидетельствует положительное значение $\Delta V_{wt}(h)$ разницы наличных и потребных ресурсов:

$$\Delta V_{wt}(h) = V_{wt}(h) - \sum_{k=1}^K F_{wkt}(h) = V_{wt}(h) - F_{wt}(h). \quad (3)$$

Отрицательное значение $\Delta V_{wt}(h)$ означает дефицит h -го ресурса, что свидетельствует об отсутствии технической возможности на звене p_w сети, используемом k -ми маршрутами, для продвижения всех ОМ в период t . В рамках данного исследования не рассматриваются варианты, когда избыточные ресурсы могут передаваться между звеньями для покрытия дефицита.

Следовательно, возможность реализации плановых объемов перевозок по всем Q_{kt} маршрутам и каждому в отдельности Q_{kt} маршруту в период t определяется достаточностью необходимых ресурсов на соответствующих звеньях p_w :

$$\Delta V_{wt}(h) \geq 0. \quad (4)$$

Поэтому при распределении объемов перевозок Q_{kzt} по каждому периоду t должны соблюдаться ограничения по ресурсам на каждом звене p_w сети:

$$F_{wt}(h) \leq V_{wt}(h). \quad (5)$$

Условие (5) следует учитывать при формировании оптимального плана (варианта) Z_{kt} распределения плановых объемов перевозок Q_{kt} по различным способам выполнения СММ.

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНОВЫХ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОК

Годовые плановые объемы перевозок в МСС по интегрированной железнодорожной сети формируются на основе заявок клиентов и прогнозов перевозчиков. Каждый перевозчик планирует собственные объемы перевозок в МСС на предстоящий год Q как сумму объемов перевозок Q_{kt} на соответствующие t -е периоды по k -м маршрутам:

$$Q = \sum_{t=1}^T Q_t = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K Q_{kt}. \quad (6)$$

По каждому k -му маршруту формируется план перевозок Z_{kt} на t -й месяц как оптимальный вариант распределения соответствующих плановых объемов Q_{kt} по разным g -м способам реализации СММ с учетом ограничений по наличным ресурсам v_w на звеньях сети p_w . Критерием оптимальности является максимальный экономический эффект, который может быть получен перевозчиком. В качестве показателя такого эффекта выбрана величина валовой прибыли (бухгалтерский термин) как разница доходов от перевозки (на основе действующих тарифов) и расходов перевозчика, в том числе его платежей за пользование услугами других участников перевозочного процесса (услугами владельцев инфраструктуры, подвижного состава и т.д.). Подобный подход (сопоставление получаемых провозных плат и затрат) применяется при оценке экономической эффективности перевозок отправительскими маршрутами [9].

Оптимальный план перевозок Z_{kt} по k -му маршруту в период t содержит некоторое количество $N_{kt}(g)$ назначенных ОМ, которые будут выполняться одним или несколькими g -ми способами реализации МСС. Поэтому величина валовой прибыли L_{kt} от фактически запланированного объема перевозки Q_{kzt} по k -му маршруту g -ми способами во временной интервал t определяется как разность между доходами от перевозок $Y_{kt}(g)$ и операционными расходами $C_{kt}(g)$ перевозчика на выполненную работу, которые учитывают собственные прямые затраты перевозчика и его платежи сторонним организациям за их ресурсы:

$$L_{kt} = \sum_{g=1}^G \{Y_{kt}(g) - C_{kt}(g)\} = \sum_{g=1}^G \{N_{kt}(g) \cdot [y_k(g) - c_k(g)]\}, \quad (7)$$

где $Y_{kt}(g)$ — общий доход за перевозку в объеме $Q_{kzt}(g)$ по k -му маршруту g -м способом во временной интервал t отправительскими маршрутами в количестве $N_{kt}(g)$; $C_{kt}(g)$ — операционные расходы на перевозку объема $Q_{kzt}(g)$ по k -му маршруту g -м способом во временной интервал t отправительскими маршрутами в количестве $N_{kt}(g)$; $y_k(g)$ — установленная плата на перевозку объема $q_{kt}(g)$ одним ОМ по k -му маршруту g -м способом (размер платежа определяется на основе действующих тарифов); $c_k(g)$ — операционные расходы на перевозку одного ОМ по k -му маршруту g -м способом.

Экономические показатели $y_k(g)$ и $c_k(g)$ не имеют индекса t , так как в рамках данного исследования при планировании перевозок на предстоящий календарный год тарифы и прочие ставки по месяцам не дифференцируются. Запишем выражение для расчета валовой прибыли L_t по всем маршрутам каждого месяца:

$$L_t = \sum_{k=1}^K L_{kt}. \quad (8)$$

Так как перевозки планируются по месяцам предстоящего года, а сетевые ресурсы могут использоваться для выполнения любых маршрутов в течение месяца, то следует найти оптимальный вариант распределения плановых объемов Q_{kt} по возможным способам их реализации на маршрутах в виде ОМ

с количеством $N_{kt}(g)$, при которых будет обеспечиваться максимальная валовая прибыль L_t для соответствующего месяца:

$$L_t \longrightarrow \max_{N_{kt}(g)}. \quad (9)$$

Максимальное значение L_t говорит о том, что перевозчики распределили заявленные объемы перевозок Q_{kt} на каждом маршруте такими способами, при которых обеспечивается наиболее полное использование имеющихся сетевых ресурсов с минимальными операционными затратами и соблюдением следующих ограничений:

1) количество ОМ по маршрутам $N_{kt}(g)$ должно принимать положительное целое значение:

$$N_{kt}(g) \geq 0, N_{kt}(g) \in N; \quad (10)$$

2) фактически распределенные объемы перевозок Q_{kzt} по каждому маршруту не должны превышать плановые объемы на соответствующих маршрутах Q_{kt} :

$$Q_{kzt} \leq Q_{kt}; \quad (11)$$

3) количество использованных ресурсов всех видов $F_{wt}(h)$ на каждом звене p_w для выполнения перевозок по любым маршрутам не должно превышать наличное количество ресурсов $V_{wt}(h)$ такого вида на соответствующих звеньях по условию (5).

В такой постановке задача поиска оптимального варианта распределения плановых объемов перевозок по возможным способам их осуществления относится к классу задач линейного программирования и может быть решена известными методами, например симплекс-методом.

Полученное решение позволяет сформировать базовый план перевозок $Z(t)$ на каждый месяц предстоящего года в виде списка маршрутов M_{kt} и назначенных по ним ОМ в количестве $N_{kt}(g)$:

$$Z(t) = \{M_{kt}; N_{kt}(g)\}. \quad (12)$$

Запишем выражение для расчета совокупной валовой прибыли по всем маршрутам для годового периода планирования в целом $L(t)$, которая будет получена при базовом плане $Z(t)$:

$$L(t) = \sum_{t=1}^T L_t. \quad (13)$$

Сформированный план $Z(t)$ рассматривается в качестве базового, так как при дефиците ресурсов $V_{wt}(h)$ он не обеспечит полное распределение заявленных объемов Q_{kt} . Полнота распределения плановых объемов по каждому маршруту в соответствующие месяцы оценивается величиной остатков ΔQ_{kt} :

$$\Delta Q_{kt} = Q_{kt} - Q_{kzt}. \quad (14)$$

При наличии нераспределенных (не включенных в базовый план) объемов величина ΔQ_{kt} будет выше нуля:

$$\Delta Q_{kt} > 0. \quad (15)$$

Общая величина нераспределенных объемов по каждому маршруту ΔQ_k за весь плановый период составит

$$\Delta Q_k = \sum_{t=1}^T \Delta Q_{kt}. \quad (16)$$

Нераспределенные объемы ΔQ_k могут быть вывезены в какие-либо другие (альтернативные) периоды t , если на звеньях сети в соответствующие периоды есть свободные ресурсы $\Delta V_{wt}(h)$. При этом важным условием перераспределения остатков ΔQ_{kt} является согласие грузоотправителей на изменение их заявок. Для стимулирования клиентов к такому перераспределению остатков может быть произведена экономически обоснованная корректировка (уменьшение) платежей $y_{kt}(g)$ * для альтернативных месяцев t . В корректировке будут заинтересованы все участники перевозочного процесса, в том числе владельцы сетевых ресурсов, если дополнительные объемы перевозок обеспечат им валовую прибыль от оказанных услуг.

МЕТОДИКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАВШИХСЯ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОК

Для перераспределения остатков по каждому маршруту ΔQ_k на альтернативные месяцы на звеньях сети должны быть избыточные ресурсы $\Delta V_{wt}(h)$ в достаточном количестве для продвижения дополнительных ОВ в количестве $NZ_{kt}(g)$ по соответствующим маршрутам. Общее число запланированных ОМ в количестве $N_{kzt}(g)$ по каждому маршруту g -м способом в периоды t определяется как сумма назначенных $N_{kt}(g)$ и дополнительных $NZ_{kt}(g)$ маршрутов:

$$N_{kzt}(g) = N_{kt}(g) + NZ_{kt}(g). \quad (17)$$

Запишем выражения для поиска оптимального варианта перераспределения остатков объемов ΔQ_k на альтернативные периоды, в которые имеются избыточные ресурсы на сети. Критерием оптимальности является валовая прибыль $L(z)$ за весь период планирования от дополнительных ОМ:

$$L(z) \longrightarrow \max_{NZ_{kt}(g)}. \quad (18)$$

Она образуется по всем периодам и маршрутам на сети всех инфраструктур для выбранных способов перевозок нераспределенных остатков

$$L(z) = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \{NZ_{kt}(g) \cdot [y_{kt}(g) \cdot c_{kt}(g)]\} \quad (19)$$

при следующих ограничениях:

1) количество ОМ по маршрутам $NZ_{kt}(g)$ должно принимать положительное целое значение:

$$NZ_{kt}(g) \geq 0, NZ_{kt}(g) \in N; \quad (20)$$

2) перераспределенные объемы $Q_k(z)$ по каждому маршруту не должны превышать остатки на соответствующих маршрутах ΔQ_k :

$$Q_k(z) \leq \Delta Q_k; \quad (21)$$

$$Q_k(z) = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^G \{NZ_{kt}(g) \cdot q_{kt}(g)\}; \quad (22)$$

3) количество дополнительно использованных ресурсов всех видов $FZ_{wt}(h)$ на каждом звене p_w для выполнения перевозок по всем маршрутам в альтернативные периоды t не должно превышать наличное количество избыточных ресурсов $\Delta V_{wt}(h)$ данного вида на соответствующих звеньях в эти же периоды:

$$FZ_{wt}(h) \leq \Delta V_{wt}(h); \quad (23)$$

$$FZ_{wt}(h) = \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G [NZ_{kt}(g) \cdot f_{wkg}(h)]. \quad (24)$$

В такой постановке задача поиска оптимального варианта перераспределения остатков по возможным способам их осуществления относится к классу задач динамического программирования и может быть также решена известными методами, например методом обобщенного понижающего градиента [10].

Полученное решение позволяет за счет перераспределения оставшихся объемов перевозок ΔQ_k на альтернативные месяцы сформировать дополнительный план перевозок $\Delta Z(t)$ в виде списка маршрутов $M_{kt}(z)$ и назначенных по ним ОМ в количестве $NZ_{kt}(g)$

$$\Delta Z(t) = \{M_{kt}(z); NZ_{kt}(g)\}. \quad (25)$$

Дополнительные объемы вывоза грузов $Q_{kt}(z)$ по маршрутам в периоды t для плана $\Delta Z(t)$ составят

$$Q_{kt}(z) = \sum_{g=1}^G \{NZ_{kt}(g) \cdot q_{kt}(g)\}. \quad (26)$$

С учетом (17) запишем итоговые планы перевозок Z_t по каждому периоду t на предстоящий год в виде списка маршрутов M_{kzt} и назначенных по ним ОМ в количестве $N_{kzt}(g)$:

$$\begin{aligned} Z_t &= \{M_{kzt}; N_{kzt}(g)\} = \{Z(t); \Delta Z(t)\} = \\ &= \{M_{kt}; M_{kt}(z); N_{kt}(g); NZ_{kt}(g)\}. \end{aligned} \quad (27)$$

Итоговое решение Z_t показывает, какими способами будут реализованы запланированные объемы перевозок Q_{Skt} в каждый месяц:

$$Q_{Skt} = \sum_{g=1}^G \{N_{kzt}(g) \cdot q_k(g)\}. \quad (28)$$

Вместе с тем оптимальное решение Z_t также может не обеспечить выполнение всех заявок клиентов в объемах Q_{kt}

из-за ограниченности ресурсов $V_{wr}(h)$ в соответствующие периоды на отдельных звеньях сети, если

$$Q_{kt}(z) < \Delta Q_{kt} \quad (29)$$

В этом случае оставшиеся «невывозными» объемы по отдельным маршрутам $\Delta Q_{kt}(z)$ в периоды t в количестве

$$\Delta Q_{kt}(z) = \Delta Q_{kt} - Q_{kt}(z) \quad (30)$$

следует исключить из плана перевозок, так как они при существующем развитии инфраструктуры и провозных способностях перевозчиков не могут быть реализованы.

На примере трех железнодорожных инфраструктур Монголии (МЖД, ТТЗ и МТЛайн) с использованием предложенных методов были разработаны оптимальные планы перевозок в МСС. В процессе поиска оптимального решения допускалось выполнение СММ всеми способами — ППС, ПНС и ПЧС. Полученные варианты выполнения заявленных объемов перевозок сравнивались с исходным вариантом, при котором СММ выполнялись только в ПНС. Результаты анализа показывают, что за счет рационального использования сетевых ресурсов перевозчики могут нарастить объемы перевозок и увеличить размер валовой прибыли по каждому маршруту.

Сведения об авторах:

Олег Николаевич Ларин,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
«Цифровые технологии управления транспортными процессами»
Российского университета транспорта (МИИТ)

Амарсанаа Оюунгарав,
аспирант кафедры «Цифровые технологии управления транспортными процессами» Российского университета транспорта (МИИТ)

ВЫВОДЫ

Предложенный методический подход к планированию МСС создает основу для сбалансированного развития сетевых ресурсов разных владельцев в условиях их интеграции, так как позволяет учитывать взаимосвязанность и взаимозависимость пропускных и провозных возможностей при выполнении перевозок по сквозным маршрутам. Полученные при помощи предложенных методов оптимального планирования решения обеспечивают высокие экономические результаты деятельности всех участников перевозочного процесса, а также наиболее полную реализацию запросов клиентов в условиях ограниченных ресурсов на сети. Важным условием эффективного применения разработанных методик является наличие достоверных сведений о доступных ресурсах во всех звеньях сети, а также прозрачность процедур их использования для перевозки заявленных объемов, чтобы балансировать интересы всех участников рынка — клиентов, перевозчиков, владельцев инфраструктуры, подвижного состава, локомотивной тяги, терминалов и т.д. Поэтому для внедрения разработанных решений требуется интеграция ведомственных процедур планирования и организация информационного обмена между перевозчиками и владельцами инфраструктур, что является актуальной задачей для дальнейшего развития монгольских железных дорог.

Authors information:

Oleg N. Larin,
DSc in Engineering, Professor, Professor of Digital Technologies
for Managing Transport Processes Department,
Russian University of Transport (MIIT)

Amarsanaa Oyuungarav,
postgraduate student of Digital Technologies for Managing Transport
Processes Department, Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Ларин О. Н., Оюунгарав А. Перспективы цифровизации транспортного сектора Монголии // Транспорт: наука, техника, управление. 2023. № 1. С. 19–22. DOI: 10.36535/0236-1914-2023-01-4.
2. Ларин О. Н., Оюунгарав А. Приоритетные задачи развития трансграничной транспортно-логистической инфраструктуры Монголии // Инновационный транспорт. 2020. № 4 (38). С. 3–7. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-3-7.
3. Оюунгарав А., Ларин О. Н. Перспективы применения цифровых платформ в работе монгольских железных дорог // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : Материалы международной научно-практической конференции, Москва, 28 сентября 2022 г. Москва : Российский университет транспорта, 2022. С. 125–129.
4. Методические подходы к организации перевозочного процесса на основе технико-технологических параметров / А. Ф. Бородин, В. В. Панин, Е. С. Максимова, Е. А. Лаханкин // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 33–36. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36.

References

1. Larin O. N., Oyungarav A. Prospects for digitalization of the transport sector of Mongolia. *Transport: Science, equipment, management*. 2023. No. 1. Pp. 19–22. DOI: 10.36535/0236-1914-2023-01-4. (In Russian).
2. Larin O. N., Oyungarav Amarsanaa. Priorities for developing Mongolia's cross-border transport and logistics infrastructure. *Innotrans*. 2020. No. 4 (38). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-3-7. (In Russian).
3. Oyungarav A., Larin O. N. Prospects for the use of digital platforms in the work of Mongolian railways. *Digital transformation of transport: problems and prospects* : proceedings of International scientific and practical conference, Moscow, September 28, 2022. Moscow : Russian University of Transport, 2022. Pp. 125–129. (In Russian).
4. Borodin A. F., Panin V. V., Maximova E. S., Lakhankin E. A. Methodological approaches to organization of transportation process on the basis of technical and technological parameters. *Transport of the Urals*. 2023. No. 1 (76). Pp. 33–36. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-1-33-36. (In Russian).

5. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации : Федеральный закон от 10.01.2003 г. № 18-ФЗ (ред. от 19.10.2023 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.04.2024 г.).
6. Бородин А. Ф., Панин В. В. Автоматизированная система прогноза ресурсов сети // Железнодорожный транспорт. 2017. № 4. С. 18–27. ISSN 0044-4448.
7. Предиктивное моделирование железнодорожных перевозок на среднесрочный период с прогнозированием производственных и экономических показателей / В. В. Панин, П. О. Новиков, А. А. Подорин [и др.] // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021) : труды 14-й международной конференции, Москва, 27–29 сентября 2021 г. / Под общей редакцией С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. Москва : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. С. 1028–1036. DOI: 10.25728/9803.2021.57.89.001.
8. Панин В. В. Возможности «Имитационной модели использования инфраструктуры ОАО «РЖД» (АС ПРОГРЕСС) для рационального использования пропускных способностей» // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2017. № 2. С. 71–75. ISSN 2500-3283.
9. Методика оценки и критериев экономической эффективности отправительских маршрутов : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.05.2017 г. № 1026р.
10. Яковлев В. Б. Линейное и нелинейное оценивание параметров регрессии в Microsoft Excel // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2019. № 2 (48). С. 58–71. DOI: 10.25688/2072-9014.2019.48.2.07.
5. The Code of railway transport of the Russian Federation : Federal Law dated 10.01.2003 No. 18-FZ (in edition from 19.10.2023). (In Russian).
6. Borodin A. F., Panin V. V. Automated network resource forecasting system. *Railway Transport*. 2017. No. 4. Pp. 18–27. ISSN 0044-4448. (In Russian).
7. Panin V. V., Novikov P. O., Podorin A. A. [et al.]. Predictive modeling of rail transport in the medium term with forecasting of production and economic indicators. *Managing the development of large-scale systems (MLSD'2021)* : proceedings of the 14th International conference, Moscow, September 27–29, 2021. Moscow : V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2021. Pp. 1028–1036. DOI: 10.25728/9803.2021.57.89.001. (In Russian).
8. Panin V. V. Possibilities of «Simulation model of the use of the infrastructure of JSC «Russian Railways» (AS PROGRESS)» for the rational use of bandwidth. *Bulletin of the Academic Board of IEDT JSC*. 2017. No. 2. Pp. 71–75. ISSN 2500-3283. (In Russian).
9. Methodology of assessment and criteria of economic efficiency of shipping routes : approved by the Order of JSC «RZD» dated 30.05.2017 No. 1026r. (In Russian).
10. Yakovlev V. B. Linear and Nonlinear Estimation of Regression Parameters in Microsoft Excel. *The Academic Journal of Moscow City University. Series: Informatics and Informatization of Education*. 2019. No. 2 (48). Pp. 58–71. DOI: 10.25688/2072-9014.2019.48.2.07. (In Russian).

Объем статьи 0,75 авторских листа

Научная статья

УДК 656.073

Моделирование монгольских железных дорог: задачи и результаты

Виталий Сергеевич Колокольников¹, Олег Викторович Осокин², Александр Валерьевич Шипулин¹¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия²Научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия

Modeling of Mongolian railways: tasks and results

Vitaliy S. Kolokolnikov¹, Oleg V. Osokin², Alexander V. Shipulin¹¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia²Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia

Аннотация

В статье рассматриваются структура, интенсивность движения и причины задержек поездов на железных дорогах России и Монголии. Приведены результаты экспериментов по поиску оптимальной конфигурации инфраструктуры при освоении прогнозируемого поездопотока, выполненные с использованием имитационной системы ИМЕТРА.

Ключевые слова: железные дороги, имитационное моделирование, задержки поездов, рациональный вариант развития, интенсивность движения, сравнительный анализ, развитие транспортной инфраструктуры

Abstract

The article examines the structure, traffic intensity and causes of train delays on the railways of Russia and Mongolia. The results of experiments on search for optimal configuration of infrastructure in development of projected train traffic, performed using the IMETER simulation system, are presented.

Keywords: railways, simulation modeling, train delays, rational development option, traffic intensity, comparative analysis, development of transport infrastructure

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-51-55

Монгольские железные дороги представляют собой одну длинную магистраль, которая является частью международного транспортного коридора Запад — Восток. Сегодня из-за своего недостаточного структурного развития эта магистраль не готова к пропуску больших потоков поездов.

На данном этапе поставлена задача обеспечить увеличение пропускной способности полигона железнодорожного транспорта. Отметим, что развитие транспортной инфраструктуры — дорогостоящее мероприятие, а в состав рассматриваемого полигона в качестве структурных единиц сегодня входят 80 железнодорожных станций разного типа.

Очевидно, что решить поставленную задачу без применения имитационного моделирования невозможно. В России примерами решения таких задач являются моделирование полигона с помощью имитационной системы ИМЕТРА [1], исследование на макромодели полигона при организации тяжеловесного движения [2] и структурно-функциональная оптимизация полигонов [3].

Основную часть железнодорожного полигона составляют однопутные участки. В рассматриваемом решении для освоения заданного поездопотока предполагалось заменить все однопутные участки на двухпутные. Однако это решение оказалось капиталоемким, и разработчики поставили задачу освоить заданный поток при меньших затратах. Именно этому были посвящены имитационные исследования.

Сравнительный анализ работы российских дорог и монгольских полигонов показал следующее:

1. Графики движения российских и монгольских полигонов имеют слишком разную интенсивность движения (рис. 1 и 2).

2. На полигоне в России, кроме задержек поездов, связанных с занятостью структурных элементов участка, процессу продвижения поездопотока препятствуют задержки, возникающие по причине ожидания бригад и локомотивов. На промежуточных станциях поезда простаивают по неприя-
му технических станций из-за нехватки путей приема (рис. 3). На полигоне в Монголии основные задержки возникают из-за структурных элементов участков, так как участки однопутные (рис. 4).

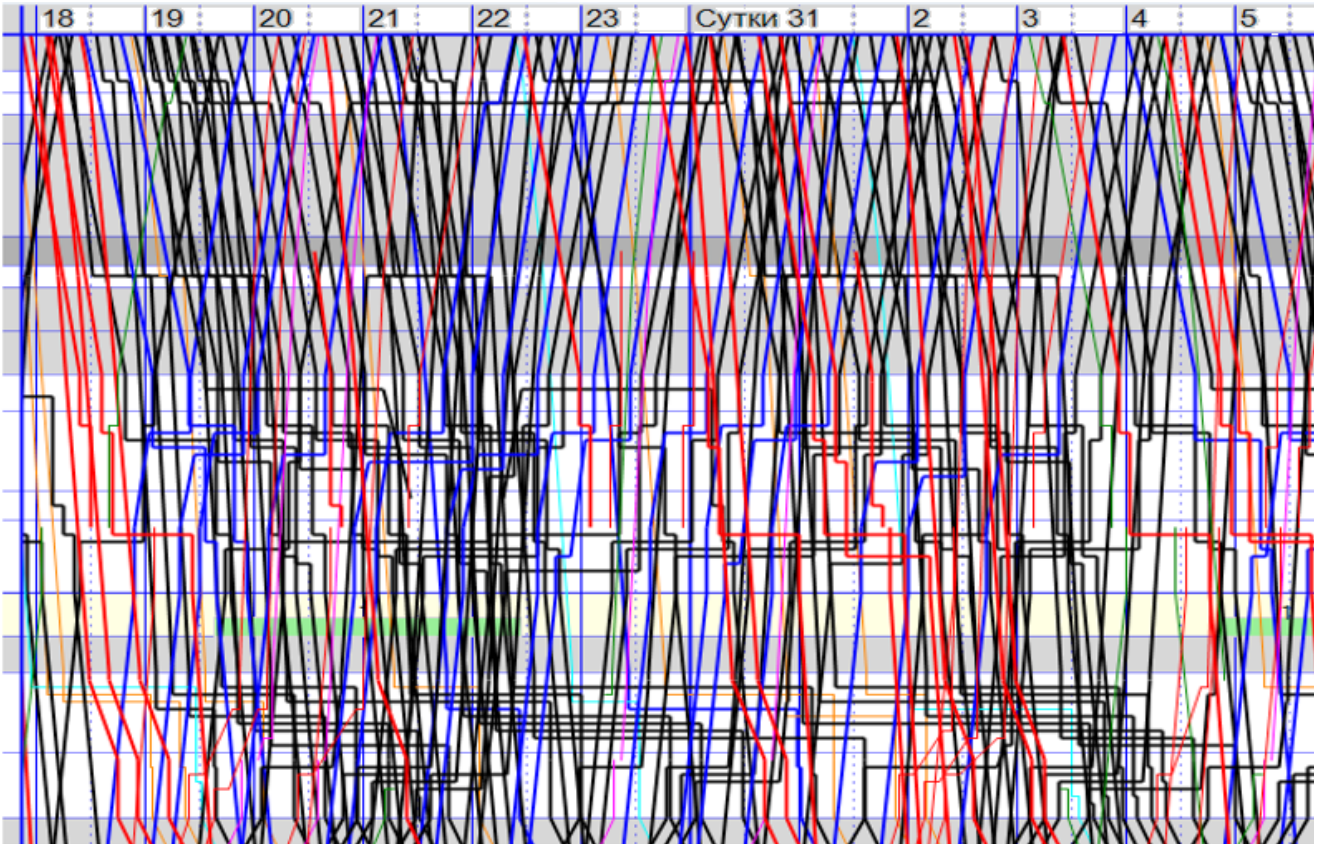


Рис. 1. График движения на одном из российских полигонов (фрагмент из программы ИМЕТРА)

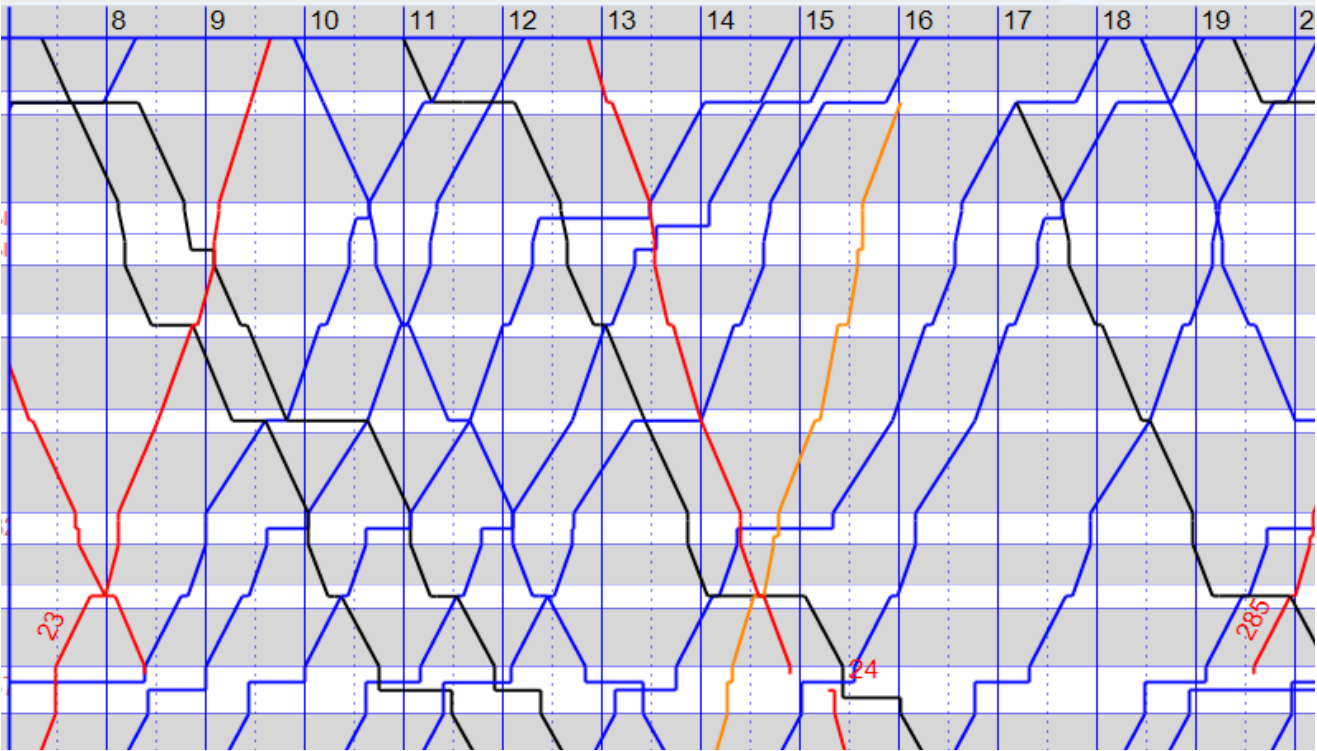


Рис. 2. График движения на монгольском полигоне (фрагмент из системы ИМЕТРА)

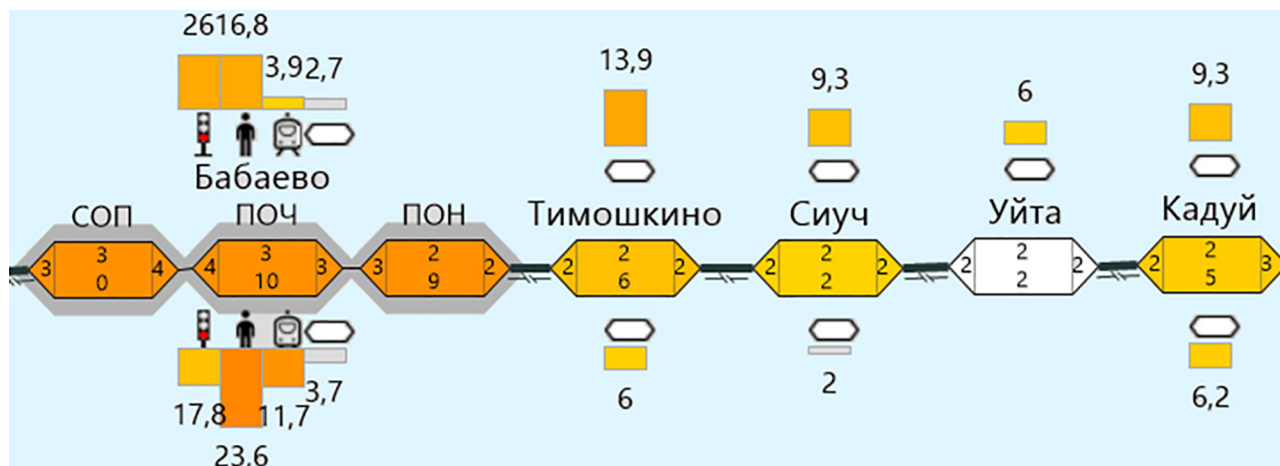


Рис. 3. Причины задержек поездов на российском полигоне (фрагмент из системы ИМЕТРА):

— задержки из-за участка; — задержки из-за бригады ПТО; — задержки из-за локомотива; — задержки из-за путей на станции

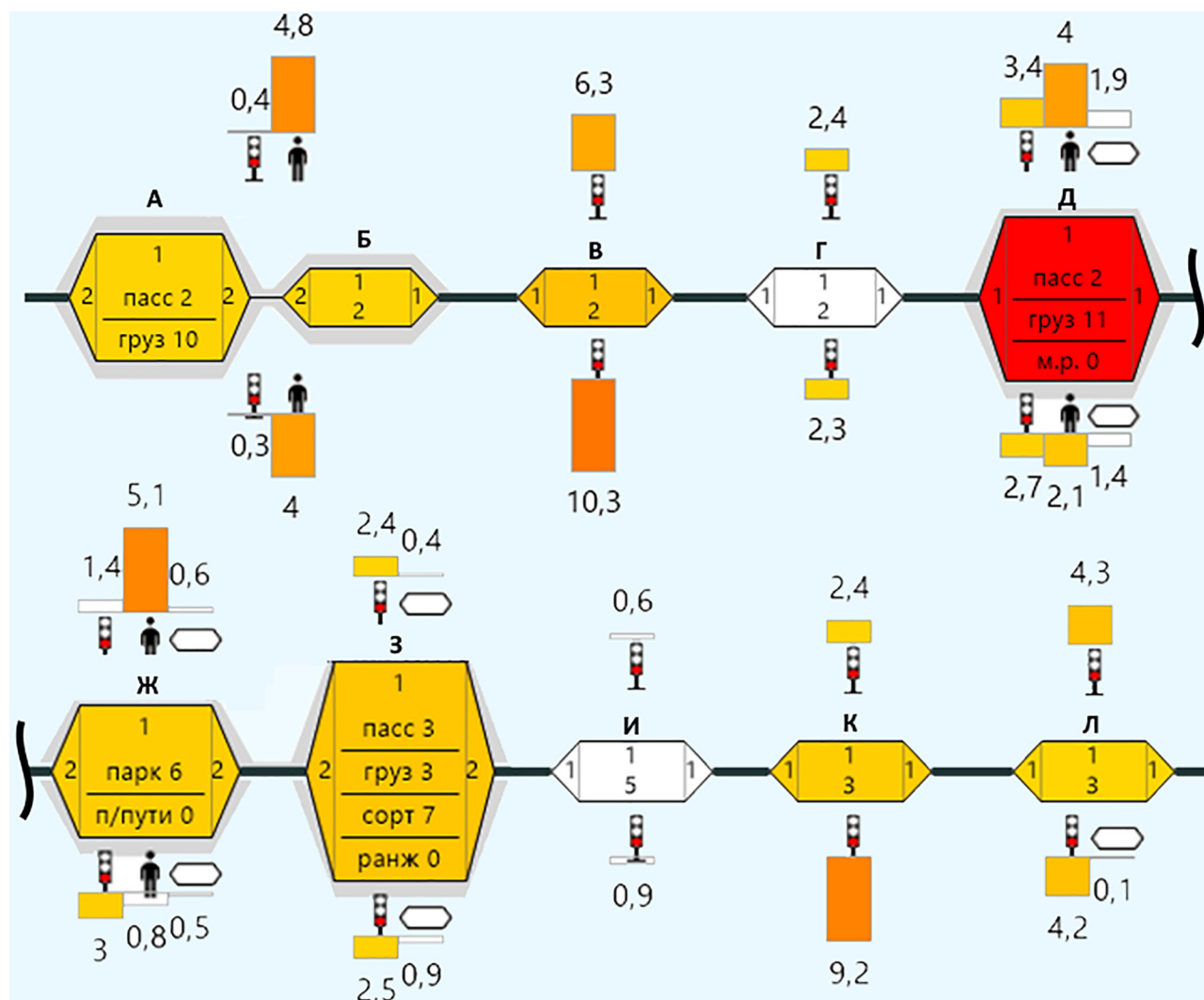


Рис. 4. Структура задержек поездов на полигоне Монголии (фрагмент из системы ИМЕТРА):

— задержки из-за участка; — задержки из-за бригады ПТО; — задержки из-за локомотива; — задержки из-за путей на станции

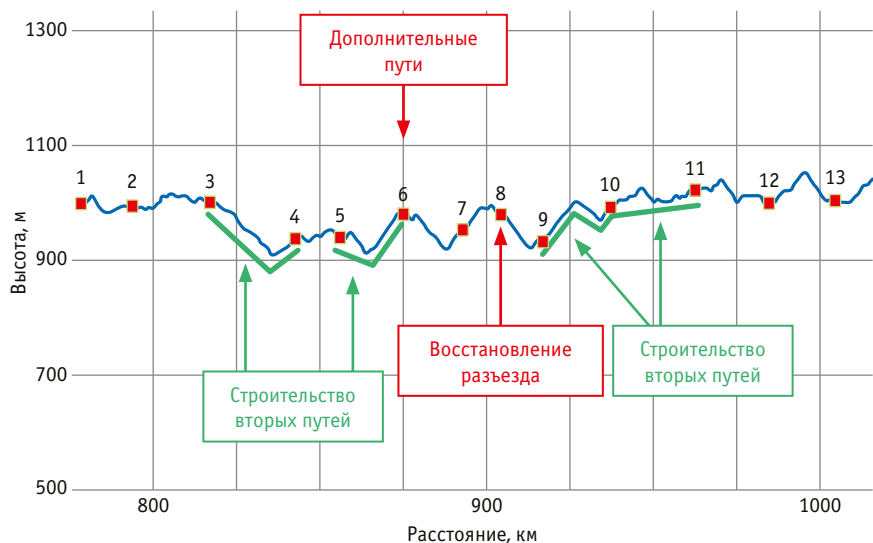


Рис. 5. Развитие транспортной инфраструктуры на одном из участков

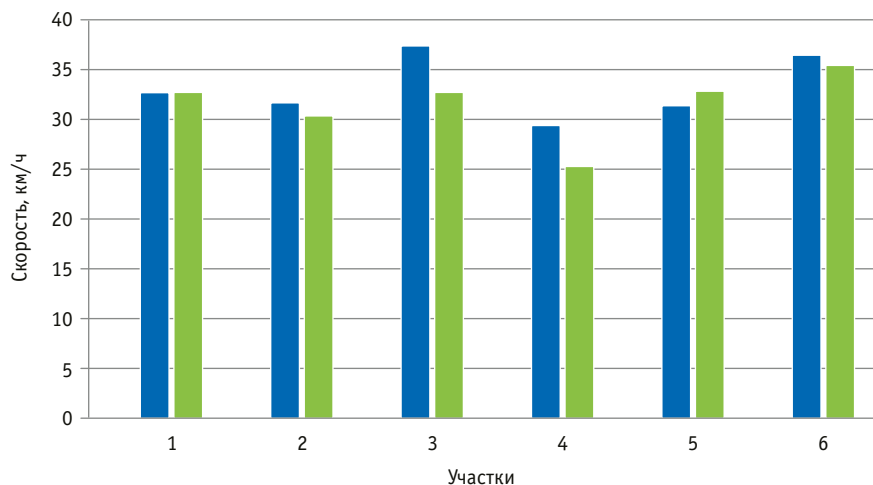


Рис. 6. Сравнение участковой скорости двух экспериментов:

■ — эксперимент № 1; ■ — эксперимент № 6

название	график	в сутки (ч:м)	кол-во	с задержкой	на операцию (ч:м)
грузовые		269:41	381,8	352,2	0:42
90-115 у.в.		226:38	173,2	245,2	1:18
контейнерные		54:43	103,6	87,6	0:31
локомотивы резервом		44:24	93,6	64,4	0:28
пассажирские		8:13	78	24,8	0:06

Рис. 7. Параметры пропуска поездов (фрагмент из системы ИМЕТРА)

В настоящее время размеры движения поездов в Монголии значительно ниже ожидаемых.

На имитационной модели был выполнен целый ряд экспериментов, направленных на поиск рациональной инфраструктуры для обеспечения перевозки требуемого поездопотока за счет увеличения числа локомотивов, строительства вторых путей на различных перегонах, добавления путей на некоторых станциях.

По итогам экспериментов предложен рациональный вариант развития транспортной инфраструктуры. Основным его результатом стало отсутствие необходимости реконструировать все однопутные участки в двухпутные при освоении перспективного поездопотока. Предложено преобразовать только отдельные участки железной дороги, добавить пути обгона на некоторых промежуточных станциях, увеличить вместимость и удлинить пути на части технических станций для возможности пропуска поездов длиной 71 вагон. В документации к решению обосновано развитие отдельных участков. Ввиду конфиденциальности информации сведения о них в статье не приводятся. Разработанный вариант развития транспортной инфраструктуры представлен на рис. 5.

Для освоения заданного поездопотока в решении не предлагается сплошная замена однопутных участков, вместо этого аргументированно выбраны те участки, на которых это необходимо сделать, что позволит существенно сократить капитальные вложения. В документации к решению приведены результаты по всем экспериментам.

При поиске лучшего варианта дополнительно была поставлена задача не допустить снижения участковой скорости. Поэтому все рассмотренные варианты решения (эксперименты) оценивались по скорости движения. На рис. 6 проиллюстрировано сравнение участковой скорости на участках из разных экспериментов.

Оценка успешного продвижения поездопотока осуществлялась не только в количественном измерении, но и с учетом наличия задержек. По каждому эксперименту в модели формировался отчет о параметрах продвижения поездов различного типа (рис. 7).

Аргументированная оценка экспериментов была подтверждена с учетом анализа количества локомотивов, их загрузки и причин задержек поездопотока из-за локомотивов. Фрагмент экспериментальных данных о работе локомотивов на железнодорожном полигоне представлен на рис. 8.

Таким образом, метод имитационного моделирования снова доказал свою эффективность при анализе структуры железной дороги. По результатам выполненных исследований и экспериментов была определена рационально необходимая конфигурация инфраструктуры, которая гарантирует освоение прогнозных объемов перевозок, что, в свою очередь, позволяет оценить стоимость капитальных затрат на развитие инфраструктуры железной дороги.

элемент	графически	задержка из-за (ч:м)	загрузка (%)
Лок. 1		0:46	45,7 %
Лок. 2		5:51	89,5 %
Лок. 3		1:05	36,7 %
Лок. поездной		0:54	89,5 %
Лок. поездной		11:13	89,5 %
Лок. поездной		154:55	89,5 %
Лок. РФ-МНР(78:58	51,6 %
Лок. поездной		20:25	89,5 %
Лок. поездной		10:51	89,5 %

Рис. 8. Использование поездных локомотивов (фрагмент из системы ИМЕТРА)

Сведения об авторах:

Виталий Сергеевич Колокольников, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

Олег Викторович Осокин, доктор технических наук, вице-президент Научно-производственного холдинга «СТРАТЕГ»

Александр Валерьевич Шипулин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Vitaliy S. Kolokolnikov, DSc in Engineering, Professor of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

Oleg V. Osokin, DSc in Engineering, Vice-President of Research & Production Holding STRATEG

Alexander V. Shipulin, PhD in Engineering, Associate Professor of Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Козлов П. А., Осокин О. В., Колокольников В. С. Исследование проектов развития железнодорожных станций и полигонов с помощью имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2018. № 6. С. 12–16. ISSN 0044-4448.
2. Козлов П. А., Набойченко И. О. Исследование на макромоделе полигона при организации тяжеловесного движения // Наука и техника транспорта. 2016. № 1. С. 104–108. ISSN 2074-9325.
3. Козлов П. А., Колокольников В. С. Структурно-функциональная оптимизация полигонов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7.

Объем статьи 0,35 авторских листа

References

1. Kozlov P. A., Osokin O. V., Kolokolnikov V. S. Investigation of railway stations and polygons development projects using simulation modelling. *Railway Transport*. 2018. No. 6. Pp. 12–16. ISSN 0044-4448. (In Russian).
2. Kozlov P. A., Naboychenko I. O. Research on the macromodel of the polygon in the organization of heavy traffic. *Science and technology in transport*. 2016. No. 1. Pp. 104–108. ISSN 2074-9325. (In Russian).
3. Kozlov P. A., Kolokolnikov V. S. Structural functional optimization of large railway testing grounds. *Transport of the Urals*. 2018. No. 3 (58). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-3-3-7. (In Russian).

Научная статья

УДК 656.07

Модель функции стимулирования при управлении техническим обслуживанием и ремонтом автомобилей

Евгений Сергеевич Козин¹

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Model of incentive function in management of vehicle maintenance and repair

Evgeniy S. Kozin¹

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

Аннотация

В статье представлена математическая модель стимулирования персонала при выполнении работ по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей на предприятиях автомобильного транспорта. Стимулирование является одной из функций управления, поэтому в основе модели лежит математический аппарат теории управления организационными системами. Предприятие рассматривается как система с двумя акторами: агентом — исполнителем работ и центром — руководством предприятия. Представлена целевая функция исполнителя, которая состоит из разности между стимулированием и затратами на выполнение работ, а также целевая функция центра — разность между доходом и затратами на стимулирование. Управление исполнителями осуществляется за счет изменения системы стимулирования, которая оказывает влияние на приоритет выполняемых агентом действий. Установлено, что управляющие воздействия оказывают влияние на эффективность работы системы.

Ключевые слова: теория управления организационными системами, предприятия автомобильного транспорта, управление, автомобили, моделирование, техническое обслуживание и ремонт

Abstract

The article presents a mathematical model of personnel incentives for performing maintenance and repair work on vehicles at automobile transport enterprises. Incentives are one of the management functions, and therefore the model is based on the mathematical apparatus of the theory of organizational systems management. The enterprise is considered as a system with two actors: an agent — the performer of the work, and the center — the management of the enterprise. The target function of the performer is presented, which consists of the difference between incentives and the costs of performing the work, as well as the target function of the center — the difference between income and incentive costs. Performers are managed by changing the incentive system, which affects the priority of the actions performed by the agent. It is established that control actions affect the efficiency of the system.

Keywords: theory of management of organizational systems, enterprises of automobile transport, management, automobiles, modeling, maintenance and repair

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-56-60

Предприятия автомобильного транспорта (ПАТ) представляют собой сложные организационные системы [1, 2], одна из задач которых заключается в поддержании заданного уровня надежности подвижного состава [3], что реализуется через управление технической эксплуатацией автомобилей. Согласно теории, управление организационными системами выполняет четыре функции: это планирование, организация, стимулирование и контроль [4]. Комплексный подход к решению задач управления позволяет адаптировать механизмы управления предприятием к изменению факторов внешней среды, что обеспечивает повышение эффективности его коммерческой деятельности.

Задачами управления и организации производства, в том числе на предприятиях автомобильного транспорта, занимались такие исследователи, как А. А. Первозванский, В. Н. Бурков, Е. С. Кузнецов, Б. С. Клейнер, В. М. Власов, Н. С. Захаров, Х. М. Тахтамышев и другие ученые. Тем не менее следует отметить, что в исследованиях, посвященных управлению технической эксплуатацией автомобилей, не были выявлены закономерности, связанные с адаптацией структуры управления технической эксплуатацией на предприятии к изменению влияющих на систему внешних факторов.

Одним из управляемых факторов системы технической эксплуатации является стимулирование. Под стимулированием понимается побуждение к совершенствованию определенных действий [5]. Задачу стимулирования относят к задачам мотивационного управления [6], при этом обычно рассматривается задача материального стимулирования, поскольку формализация моделей морального стимулирования еще не получила значительного развития [7].

В модели стимулирования участвуют две стороны — агент и центр [8]. Под агентом можно понимать исполнителя, т.е. производственное звено, являющееся штатным сотрудником предприятия и оснащенное необходимым оборудованием и инструментом [9], а под центром — менеджмент ПАТ [10]. Агент осуществляет выбор действия $y \in A = R_+^1$ из множества допустимых действий A в рамках своей должностной инструкции и не противоречащих ей сообщений максимальной эффективности. Эти действия являются набором альтер-

натив, из которых агент делает свой выбор. При выполнении действий агент несет некоторые затраты $c(y)$. Центр выбирает такое управление $\sigma(\cdot) \in M$, при котором каждому действию агента ставится в соответствие неотрицательное вознаграждение $\sigma: A \rightarrow R_+^1$. То есть начальник определяет зависимость вознаграждения агента от действий последнего, что называется функцией стимулирования.

Существует много подходов к оценке эффективности предприятий автомобильного транспорта [11]. Целевой функцией центра будет разность между функцией дохода $H(y)$ предприятия от производственной деятельности, осуществляемой агентом, и затратами на стимулирование $\sigma(y)$ подчиненного:

$$\Phi(\sigma(\cdot), y) = H(y) - \sigma(y). \quad (1)$$

Целевой функцией агента будет разность между получаемым стимулированием и затратами:

$$f(\sigma(\cdot), y) = \sigma(y) - c(y). \quad (2)$$

Можно предположить, что агент станет выбирать те действия, которые при заданной системе стимулирования принесут ему максимальное вознаграждение при наименьших затратах на их реализацию, т.е.

$$P(\sigma(\cdot)) = \underset{y \geq 0}{\text{Arg max}} [\sigma(y) - c(y)]. \quad (3)$$

Стратегия центра будет заключаться в минимизации затрат на стимулирование агента и в максимизации собственной прибыли:

$$\min_{y \in P(\sigma(\cdot))} \Phi(\sigma(\cdot), y) \rightarrow \max_{\sigma(\cdot)} \quad (4)$$

Тогда центр может варьировать систему стимулирования, побуждая тем самым агента выбирать те или иные действия [12]. Таким образом, задача стимулирования заключается в поиске оптимальной системы стимулирования, т.е. такой системы, которая бы имела максимальную эффективность:

$$K(\sigma) = \max_{y \in P(\sigma)} \Phi(y). \quad (5)$$

Теория управления организационными системами определяет принцип компенсации затрат, который говорит о том, что стимулирование в точности должно равняться затратам агента, т.е.

$$\sigma(y) = c(y). \quad (6)$$

Этот принцип можно визуализировать графиком, представленным на рис. 1.

Область предпочтительных для агента решений лежит выше графика его функции полезности, поскольку вознаграждение должно быть не ниже затрат агента. При этом с точки зрения центра допустимыми являются комбинации действий и воз-

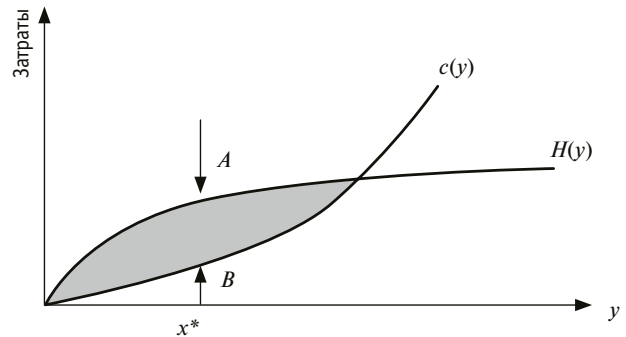


Рис. 1. Область компромисса в задаче стимулирования [5]

награждений, лежащих ниже функции дохода центра. В связи с этим оптимальное действие лежит на нижней границе области компромисса между центром и агентом.

Как правило, на предприятиях автомобильного транспорта используется пропорциональная система стимулирования, которую также называют системой L -типа. В этой системе вознаграждение агента прямо пропорционально его действию с некоторым коэффициентом пропорциональности $\lambda > 0$ (ставка оплаты):

$$\sigma_L(y) = \lambda y. \quad (7)$$

Для ПАТ функцию затрат агента можно представить в следующем виде:

$$c(y) = \sum_{i=1}^I c_i t_i n_i, \quad (8)$$

где $c(y)$ — суммарные затраты агента на реализацию действия y , у.е.; c — стоимость одного часа работы агента, у.е.; t — продолжительность выполнения действия (работ по ТО и Р), ч; n — количество действий, ед.; i — тип действия $i \in I$ (тип работ по ТО и Р).

Предположим, что все работы по ТО и Р автомобилей на предприятии можно разделить на три типа: работы низкой, средней и высокой сложности, т.е. $i = \{1, 2, 3\}$. Тогда для каждого типа работ будет существовать матрица Y , характеризующаяся стоимостью, трудоемкостью и количеством работ каждого типа:

$$Y = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Предположим, что стоимость c и трудоемкость t для каждого типа работ отличаются на некоторую произвольную скалярную величину, тогда матрицу Y для условий рассматриваемого примера можно записать следующим образом:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,5c & c & 2c \\ t & 2t & 3t \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для единицы времени ($t = 1$) производственное звено сможет выполнить 1 работу n первого типа со стоимостью $0,5c$; $0,5n$ работ второго типа со стоимостью c и $0,3$ работы третьего типа со стоимостью $2c$:

$$Y = \begin{bmatrix} 0,5c & c & 2c \\ n & 0,5n & 0,3n \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Несложно определить, что предпочтение агента будет отдано выполнению работ третьего типа, поскольку он получает самую высокую компенсацию затрат, равную $0,6cnt$, в то время как для работ первого и второго типа он будет получать компенсацию $0,5cnt$. Напомним, что $c = \lambda y$.

В таком случае управление для центра будет заключаться в изменении предпочтений агента за счет изменения значения надбавки λ . Например, чтобы сместить приоритет в сторону работ первого типа, нужно сделать $\lambda_1 = 1,0$, т.е. $Y_{11} = 1c$, тогда $\lambda_3 = 1,5$, т.е. $Y_{13} = 1,5c$.

Возможны два варианта реализации стратегии управления — перераспределение λ между типами работ при сохранении суммарного значения надбавки и индивидуальная корректировка надбавки для конкретного типа работ. Очевидно, что первый вариант более предпочтителен для центра, поскольку предполагает фиксированные затраты на систему стимулирования. Рассмотрим этот вариант.

На рис. 2 представлена функция затрат агента от λ для двух рассмотренных вариантов — до и после реализации управляющих воздействий центра.

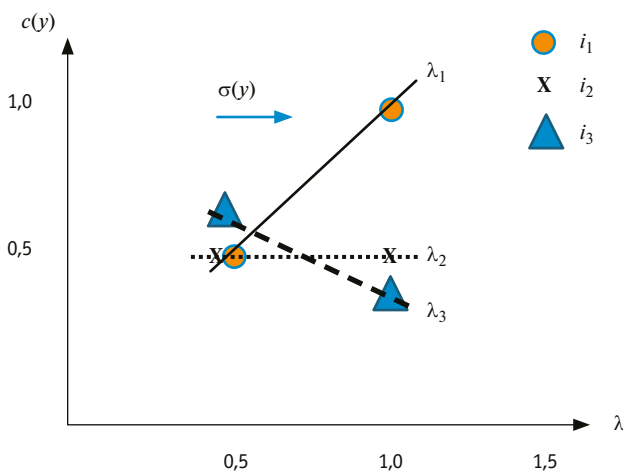


Рис. 2. Управление системой стимулирования для изменения предпочтений агента по приоритету выполнения работ

Согласно рис. 2, центр, управляя системой стимулирования, меняет предпочтения агента в сторону выполнения работ первого и второго типа. Например, это возможно при скоплении в системе большого количества работ этих типов.

Рассмотренный выше пример не предполагает наличия ограничений или дополнительных условий. Однако на практике система должна обработать несколько заявок за опре-

деленный период времени. В противном случае заявки могут уйти из системы (клиент покинет зону ожидания) или быть переориентированы на будущий период (клиент будет пере-записан на другое время). Все это влияет на лояльность клиента предприятию. То есть на систему накладываются ограничения по T и по n :

$$T \leq \text{const}; n \rightarrow \max. \quad (12)$$

При этом предприятие не заинтересовано в потере клиентов и желает обеспечить максимальную загрузку, несмотря на возможные потери прибыли.

Предположим, что за время $10t$ предприятию нужно обслужить $n = \{5, 3, 2\}$ заявок, т.е. $n_\Sigma = 10$, и центр заинтересован в максимизации количества обслуженных заявок, т.е. $n \rightarrow \max$.

В таком случае без управления стимулированием исходя из начальных условий за $10t$ агент может выполнить $2n_3$ и $4n_1$ ($n = 6$) с общей компенсацией в $6c$.

При управлении со стороны центра с помощью изменения λ_1 и λ_3 соответственно на $1,0$ и $1,5$ за время $10t$ агент может выполнить $5n_1$, $1n_3$ и $1n_2$ ($n = 7$) с общей компенсацией в $7,5c$.

То есть управление помогло увеличить абсолютную пропускную способность системы, а также увеличить сумму компенсации затрат агента на $1,5c$ по сравнению с начальным вариантом, что выгодно как центру, так и агенту.

Однако неограниченное перераспределение надбавки λ с одних работ на другие влечет за собой снижение приоритета одних работ и риск их систематического невыполнения агентом, поскольку их выполнение становится ему невыгодно. В подобных условиях требуется ввести ограничение роста λ . Таким ограничением является целевая функция центра $\Phi(y)$, рассмотренная выше. С учетом принципа компенсации затрат ее можно представить в следующем виде:

$$\Phi(y) = H(y) - c(y). \quad (13)$$

Если представить, что доход центра является произведением коммерческой стоимости услуги s на эту услугу y , т.е. $H(y) = sy$, и принять, что $c(y) = \lambda y$, то целевую функцию центра можно записать как

$$\Phi(y) = sy - \lambda y = y(s - \lambda). \quad (14)$$

Тогда при росте λ величина прибыли центра от коммерческой реализации услуги будет уменьшаться, что невыгодно центру. В таком случае ограничением модели (ограничением роста λ для услуги i -го типа) будет следующее условие:

$$\lambda < s. \quad (15)$$

Тогда для каждого входящего количества заявок n_Σ и соотношения типов этих заявок i можно определить такую систему стимулирования $\sigma(y)$, при которой целевая функция центра $\Phi(y)$ будет выпуклой и сможет принимать оптимальное значение (рис. 3).

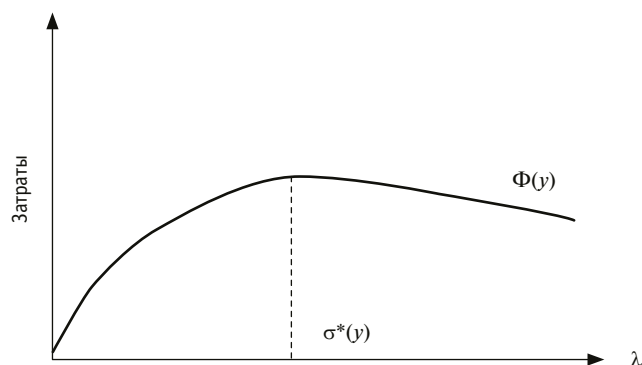


Рис. 3. Характер изменения целевой функции центра при разных параметрах модели стимулирования

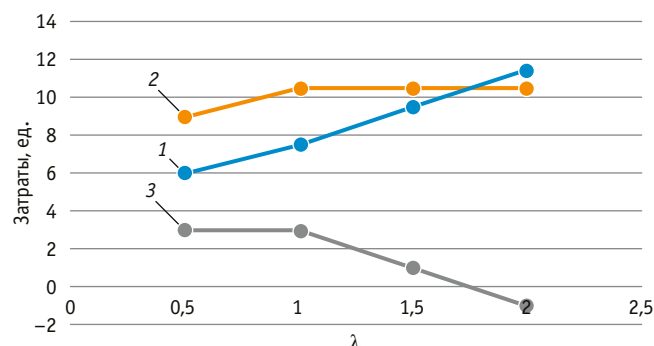


Рис. 4. Изменение затрат агента и центра при разных параметрах модели стимулирования:
1 — $c(y)$; 2 — $H(y)$; 3 — $\Phi(y)$

Таблица 1

Пример изменения целевой функции центра при разных значениях λ

Шаг	λ_1	n	$c(y)$	$H(y)$	$\Phi(y)$
1	0,5	6	6	9	3
2	1	7	7,5	10,5	3
3	1,5	7	9,5	10,5	1
4	2	7	11,5	10,5	-1

Продemonстрируем это на рассматриваемом примере, продолжив изменять λ_1 и λ_3 еще на две итерации: 1,5 и 1,0; 2,0 и 0,5 соответственно. Введем фиксированную функцию дохода центра s , равную $1,5n$. Тогда при перераспределении λ компенсация затрат агента будет расти, при этом количество выполненных заявок и доходы центра не увеличатся (табл. 1).

Центру будет выгодно только стратегия на шаге 1 и 2, связанная с увеличением пропускной способности системы. Тог-

да оптимальным управлением можно считать шаг номер два. Дальнейшие шаги ведут к уменьшению значений целевой функции центра. График изменения функции затрат агента и целевой функции центра для условий примера представлен на рис. 4.

Таким образом, доказано, что управление стимулированием позволяет повысить эффективность работы системы. Управление для системы L -типа реализуется путем выбора оптимальной функции стимулирования агента $\sigma(y)$ за счет изменения коэффициента пропорциональности λ компенсации затрат. Управление позволяет увеличить пропускную способность системы путем изменения приоритета действий агента.

Рассмотренная модель может быть применима для предприятий автомобильного транспорта, выполняющих работы разного типа и характеризующихся различными параметрами. Использование представленной модели в комплексе с моделями других функций управления предприятием как организационной системой позволит сформировать научно-методические основы для повышения эффективности технической эксплуатации автомобильного транспорта.

Сведения об авторе:

Евгений Сергеевич Козин,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Сервис автомобилей и технологических машин» Тюменского промышленного университета

Author's information:

Evgeniy S. Kozin,
PhD in Engineering, Associate Professor of Car Service and Technological Machines Department, Tyumen Industrial University

Литература

- Maes G., Van Hootegem G. A systems model of organizational change // *Journal of Organizational Change Management*. 2019. Vol. 32. No. 7. Pp. 725–738.
- Chih-Hui Lai, Sapphire Huili Lin. Systems theory // *The International Encyclopedia of Organizational Communication*. John Wiley & Sons, Inc., 2017. Pp. 1–18. DOI: 10.1002/9781118955567.wbieoc203.
- Захаров Н. С., Теньковская С. А., Александров А. Э. Повышение надежности функционирования транспортно-технологических систем путем ограничения срока службы автомобилей // *Транспорт Урала*. 2023. № 2 (77). С. 54–59. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-54-59.

References

- Maes G., Van Hootegem G. A systems model of organizational change. *Journal of Organizational Change Management*. 2019. Vol. 32. No. 7. Pp. 725–738.
- Chih-Hui Lai, Sapphire Huili Lin. Systems theory. *The International Encyclopedia of Organizational Communication*. John Wiley & Sons, Inc., 2017. Pp. 1–18. DOI: 10.1002/9781118955567.wbieoc203.
- Zakharov N. S., Ten'kovskaya S. A., Alexandrov A. E. Improving the operation reliability of transport and technological systems by limiting vehicle service lifetime. *Transport of the Urals*. 2023. No. 2 (77). Pp. 54–59. DOI: 10.20291/1815-9400-2023-2-54-59. (In Russian).

4. Гумеров М. Теория систем и кибернетика как основы науки об организационном управлении // Риск: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2015. № 1. С. 297–301. ISSN 1560-8816.
5. Математические модели организаций / А. А. Воронин, М. В. Губко, С. П. Мишин, Д. А. Новиков. Москва : ЛЕНАНД, 2019. 360 с.
6. Бурков В. Н., Коргин Н. А., Новиков Д. А. Введение в теорию управления организационными системами. Москва : ЛИБРОКОМ, 2017. 264 с.
7. Русяева Е. Ю., Салтыков С. А. Концептуальные основы теории активных систем, их развитие в теории управления организационными системами: тенденции и перспективы // Проблемы управления. 2017. № 4. С. 74–83. ISSN 1819-3161.
8. Алексеева М. Б., Богачев В. Ф. Организационные аспекты управления социально-экономическими системами: теория и практика // Проблемы теории и практики управления. 2020. № 5. С. 6–14. ISSN 0234-4505.
9. Анфилов В. С. Системный анализ в управлении. Москва : Финансы и статистика, 2009. 368 с.
10. Daryani S. M., Ali S., Asli-zadeh A. Organizational theory, systemic thinking and system management // International Journal of Organizational Leadership. 2012. Vol. 1. No. 2. Pp. 71–79.
11. Тимухина Е. Н., Тимухин К. М. Критерии эффективности при управлении транспортным предприятием // Транспорт Урала. 2024. № 1 (80). С. 83–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-83-89.
12. Schneider A., Wickert C., Marti E. Reducing complexity by creating complexity: A systems theory perspective on how organizations respond to their environments // Journal of Management Studies. 2017. Vol. 54. No. 2. Pp. 182–208.

4. Gumerov M. Theory of systems and cybernetics as a base of organizational management sciences. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2015. No. 1. Pp. 297–301. ISSN 1560-8816. (In Russian).
5. Voronin A. A., Gubko M. V., Mishin S. P., Novikov D. A. Mathematical models of organizations. Moscow : LENAND, 2019. 360 p. (In Russian).
6. Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. Introduction to the theory of management of organizational systems. Moscow : LIBROKOM, 2017. 264 p. (In Russian).
7. Rusaeva E. Yu., Saltykov S. A. Conceptual bases of theory of active systems, their development in control theory of organizational systems: tendencies and perspectives. *Control Sciences*. 2017. No. 4. Pp. 74–83. ISSN 1819-3161. (In Russian).
8. Alekseeva M. B., Bogachev V. F. Organizational aspects of social and economic system management: the theory and practice. *Problems of management theory and practice*. 2020. No. 5. Pp. 6–14. ISSN 0234-4505. (In Russian).
9. Anfilatov V. S. Systems analysis in management. Moscow : Finance and statistics, 2009. 368 p. (In Russian).
10. Daryani S. M., Ali S., Asli-zadeh A. Organizational theory, systemic thinking and system management. *International Journal of Organizational Leadership*. 2012. Vol. 1. No. 2. Pp. 71–79.
11. Timukhina E. N., Timukhin K. M. Criteria of efficiency in the management of a transport enterprise. *Transport of the Urals*. 2024. No. 1 (80). Pp. 83–89. DOI: 10.20291/1815-9400-2024-1-83-89. (In Russian).
12. Schneider A., Wickert C., Marti E. Reducing complexity by creating complexity: A systems theory perspective on how organizations respond to their environments. *Journal of Management Studies*. 2017. Vol. 54. No. 2. Pp. 182–208.

Объем статьи 0,51 авторских листа

Научная статья

УДК 656.025.4

Особенности региональных интегрированных логистических систем (на примере АПК Белгородской области)

Александр Сергеевич Трошин¹, Иван Алексеевич Новиков¹, Норайр Оганесович Блудян², Владимир Юрьевич Линник³

¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

³Государственный университет управления, Москва, Россия

Features of regional integrated logistics systems (on the example of agro-industrial complex of Belgorod region)

Alexander S. Troshin¹, Ivan A. Novikov¹, Norayr O. Bludyan², Vladimir Yu. Linnik³

¹Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, (MADI), Moscow, Russia

³State University of Management, Moscow, Russia

Аннотация

В контексте изменений мировой экономической системы и усиления торговых связей внедрение интегрированных логистических систем становится особенно важным для укрепления конкурентоспособности региона. Эта задача наиболее актуальна для агропромышленного комплекса, что обусловлено спецификой его логистической системы. Авторы статьи рассматривают внедрение интегрированной логистической системы на примере АПК Белгородской области. Сегодня в регионе существуют проблемы, для решения которых необходим поиск новых путей, позволяющих обеспечить эффективное развитие этого сектора за счет использования интенсивных методов. В статье проанализированы основные положения по организации внедрения интегрированной логистической системы и обоснованы способы взаимодействия хозяйствующих субъектов в рамках цифровой платформы в экосистеме АПК на территориальном уровне.

Ключевые слова: интегрированная логистическая система, транспортно-логистическая система, агропромышленный комплекс, экосистема, цифровая платформа

Abstract

In the context of changes in the global economic system and strengthening trade relations, the introduction of integrated logistics systems is becoming especially important to strengthen the competitiveness of the region. This task is most relevant for the agro-industrial complex, due to the specifics of its logistics system. The authors of the article consider the implementation of an integrated logistics system using the example of the agro-industrial complex of the Belgorod region. Today, there are problems in the region, which require the search for new ways to ensure the effective development of this sector through the use of intensive methods. The article analyzes the main provisions on the organization of the implementation of an integrated logistics system and substantiates the ways of interaction of business entities within the framework of a digital platform in the agro-industrial complex ecosystem at the territorial level.

Keywords: integrated logistics system, transport and logistics system, agro-industrial complex, ecosystem, digital platform

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-61-68

В современных условиях трансформации мирового хозяйства и интенсификации торговли вопросы внедрения интегрированных логистических систем с точки зрения укрепления конкурентных преимуществ региона становятся особенно актуальными. Для агропромышленного комплекса (АПК) такая востребованность обусловлена спецификой логистической системы этой отрасли хозяйства.

Можно констатировать наличие элементов так называемого сквозного управления в рамках апробации логистического подхода применительно к агропромышленному комплексу, что проявляется в перманентном характере профильного менеджмента [1]. При этом необходимо учитывать, что системообразующими элементами АПК являются материальные потоки, поскольку связи между его предприятиями устанавливаются через товарный обмен.

Агропромышленный комплекс можно условно представить как трехсферную модель (рис. 1), включающую: 1) отрасли, специализирующиеся на выпуске средств производства для сельского хозяйства; 2) само сельское хозяйство; 3) отрасли, связанные с переработкой сельскохозяйственной продукции [2]. По мнению Р. Т. Тимаковой [3], следует выделять и четвертую сферу, поскольку «предприятия трех сфер находятся в логистическом взаимодействии с отраслями производственно-технологической, социальной, сервисной, научно-исследовательской, образовательной, информационной, транспортной, распределительной, складской и другой инфраструктуры, которые необходимы для создания и нормального эффективного функционирования АПК». Это утверждение верно с точки зрения логики, и подобная интерпретация объективна, так как агропромышленный комплекс — открытая система, взаимодействующая с внешней средой, т.е. по своей сути четвертая сфера будет представлять собой макроокружение.

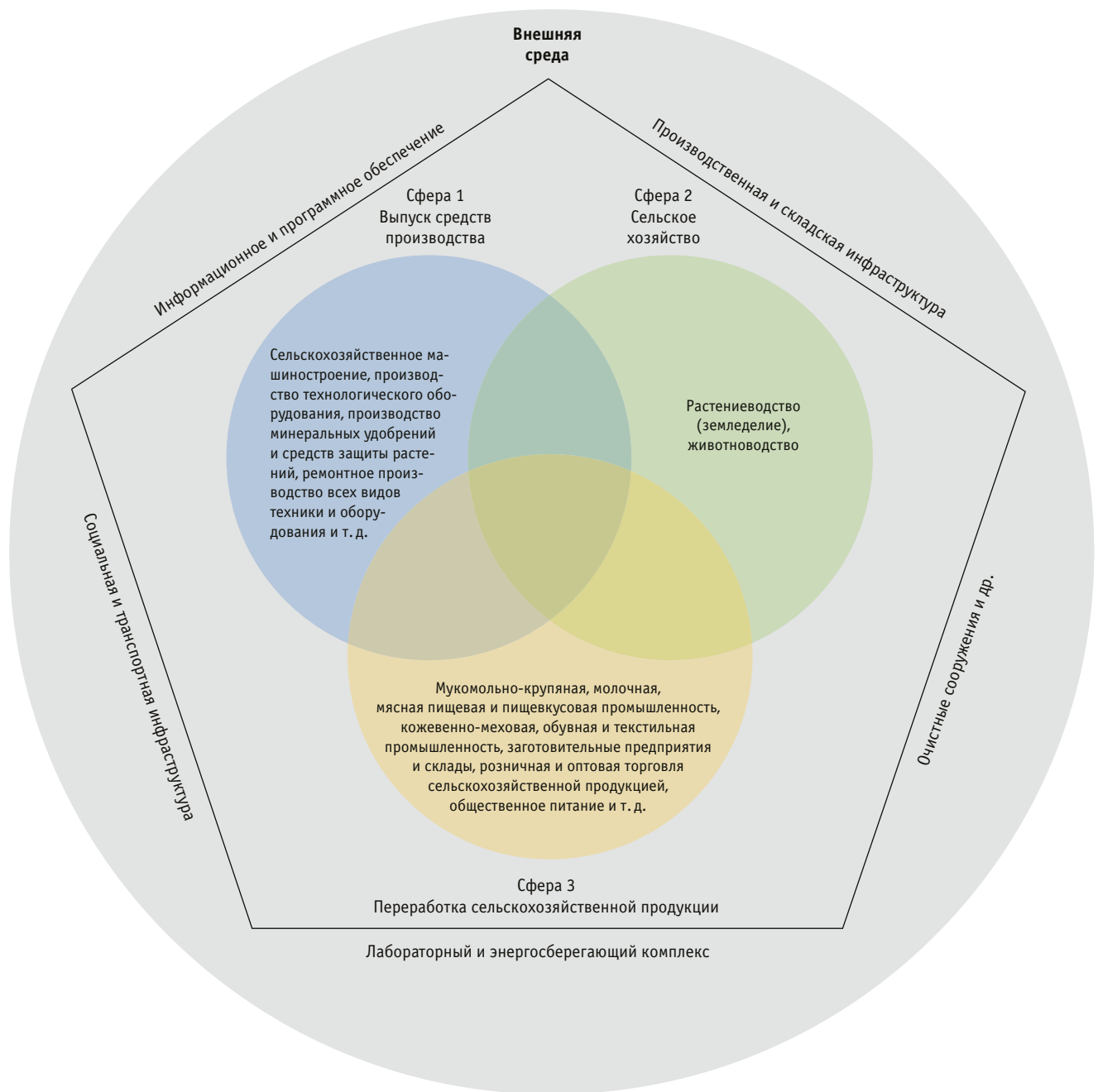


Рис. 1. Модель агропромышленного комплекса (составлена авторами)

Взаимодействие между сферами агропромышленного комплекса в первую очередь осуществляется посредством материальных потоков, которые совместно с потоками финансовых ресурсов и информации образуют систему логистики АПК. В настоящее время несопряженность экономических целей и разрозненность интересов участников цепочки приводят к ряду проблем в каждой из сфер: падению деловой активности, сокращению спроса, сужению сырьевой базы и ограниченности использования производственных мощностей. Решить эти проблемы можно при помощи подхода, который основан

на внедрении рассматриваемой нами интегрированной логистической системы и апробирование которого на практике позволяет инициировать процессы комплексной оптимизации поставок и хранения товаров.

В настоящее время Белгородская область относится к числу аграрно-индустриальных регионов, что обусловлено двумя наиболее крупными на ее территории отраслями, формирующими два базовых экономических сектора: горно-металлургический и агропромышленный. Превалирующие позиции агропромышленный комплекс получил за счет климатических усло-

вий и географического положения: 70 % территории региона покрывают черноземные почвы [4]. При этом в рамках существующих подходов, ориентированных на интенсивный способ освоения ресурсов, уже достигнуты пределы, что стало своего рода катализатором истощения доступного земельного фонда. В частности, в использовании находится около 99,6 % земель, что инициировало снижение объема инвестиционных потоков в отрасль в течение последних пяти лет [5].

Согласно данным Росстата, в 2022 г. по объему валового регионального продукта (ВРП) Белгородская область занимала четвертое место среди регионов Центрального федерального округа, уступая только Московской области, Москве (рис. 2а) и Воронежской области. Среди областей, входящих в состав Центрально-Черноземного экономического района, Белгородская область занимала второе место по объему ВРП после Воронежской области (рис. 2б). Анализируя валовой региональный продукт, отметим, что за 2022 г. в Белгородской области он составил 866,1, в Воронежской — 877,4, а в Курской — 437,8 млрд руб. [6].

Как видно из представленных на рис. 2 данных, ВРП Белгородской области имеет стабильный положительный темп роста, который в среднем за анализируемый период составил 101,2 %. Это достаточно хороший показатель, если учесть, что за последние пять лет средний темп роста ВРП по России равен 101,8 %. То есть статистическая информация подтверждает высокий рейтинг Белгородской области среди других регионов страны.

Обратимся к представленной на рис. 3 структуре ВРП Белгородской области. Из рис. 3 видно, что удельный вес таких отраслей, как сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство, составляет 15,7 %; добыча полезных ископаемых — 121,5 %; обрабатывающие производства — 16,9 %. Первые две отрасли характеризуют основные экономические секторы региона — горно-металлургический и агропромышленный. Высокий удельный вес обрабатывающих производств обусловлен специализацией области на продуктах сельского хозяйства или добыче полезных ископаемых, используемых этой отраслью промышленности в качестве сырья.

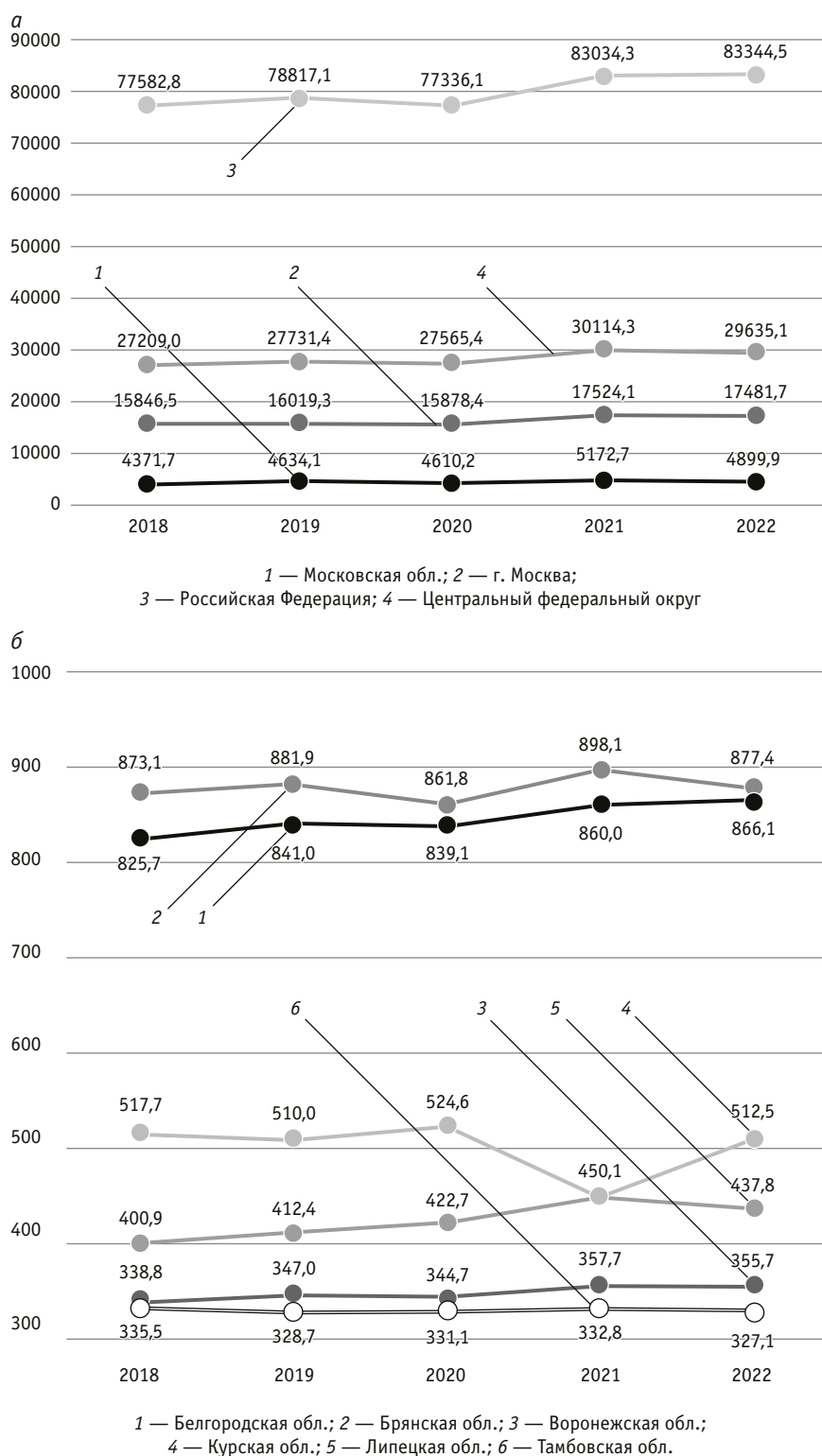


Рис. 2. Валовой региональный продукт, млрд руб. *

а — по России, Центральному федеральному округу, Московской области и Москве;
б — по Центрально-Черноземному экономическому району

* Составлено авторами по данным официальной статистики [6].

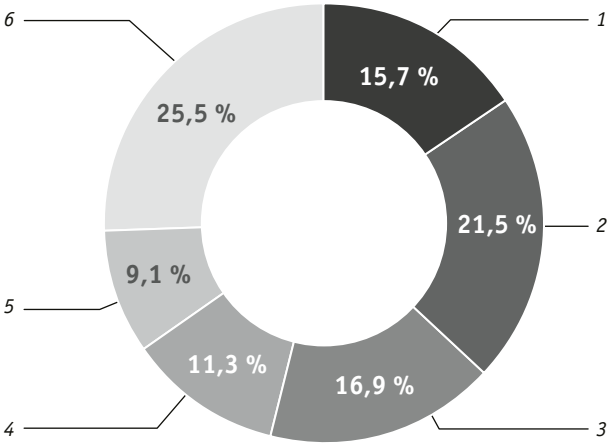


Рис. 3. Структура ВРП Белгородской области в 2022 г. *

1 — сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство; 2 — добыча полезных ископаемых; 3 — обрабатывающие производства; 4 — торговля оптовая и розничная, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов; 5 — деятельность по операциям с недвижимым имуществом; 6 — другое

*Составлено авторами по данным официальной статистики [6].

Общая земельная площадь Белгородской области составляет 2713,4 тыс. га, это одно из самых низких значений в Центральном-Черноземном экономическом районе, меньшую площадь (24047 тыс. га) имеет только Липецкая область [7]. Большую часть земель региона занимают сельскохозяйственные угодья: в 2022 г., согласно данным управления Росреестра по Белгородской области, на них приходилось 2133,3 тыс. га (табл. 1), при этом в 2019 г. площадь угодий сократилась на 0,6 тыс. га и в последующие периоды оставалась неизменной. Площади лесных и других земель с 2018 по 2022 г. значительных изменений не претерпели (см. табл. 1) [8], что подтверждает вывод о достижении пределов интенсивного освоения доступного земельного фонда в регионе.

Целесообразно рассмотреть инвестиции, направляемые на развитие АПК региона. Согласно данным Росстата [9], инвестиции в основной капитал по видам экономической деятельности, в частности в сельское, лесное хозяйство, охоту, рыболовство и рыбоводство, в Белгородской области в 2021 г. соста-

вили 15935,3 млн руб., а в 2020-м на 4544,6 млн руб. меньше. Общий объем инвестиций в основной капитал в 2021 г. составил 102348,5 млн руб., т.е. на АПК приходилось 15,6 % совокупных инвестиций. Также в соответствии с постановлением правительства Белгородской области № 439-пп в регионе реализуется государственная программа по развитию сельского хозяйства и рыбоводства [10]. Согласно сводному годовому докладу «О ходе реализации и оценке эффективности государственных программ Белгородской области по итогам 2022 года», «расходы Программы за счет всех источников финансирования составили 11244,2 млн руб., или 144,8 % от запланированного объема, из них за счет средств областного бюджета — 1399 млн руб. (96,7 %), федерального бюджета — 3752,3 млн руб. (99,2 %), иных источников — 6092,9 млн руб. (240,3 %)» [11]. Проведенный статистический анализ подтверждает необходимость поиска новых путей обеспечения эффективного развития АПК Белгородской области.

Стратегия социально-экономического развития Белгородской области на период до 2030 г. в своем дополненном варианте сохранила развитие агропромышленного комплекса региона как одну из основополагающих задач в контексте приоритета «Устойчивая технологически развитая экономика» [5]. По мнению авторов, реализация этой задачи возможна за счет внедрения в АПК интегрированной логистической системы, которая позволит перейти к новой инновационной модели функционирования, использующей методы, способные обеспечить интенсивный рост отрасли.

Внедрение интегрированной логистической системы в АПК региона представляет собой последовательный и поступательный процесс, направленный на трансформационное изменение характера и способов взаимодействия между субъектами отрасли, участвующими в формировании цепочки поставок, переход от традиционных вариантов к более сложным уровням логистики [12].

До недавнего времени самым современным и эффективным считался уровень 4PL транспортно-логистической услуги, но сегодня в условиях возрастающей цифровизации он уже отвечает не всем требованиям новой реальности. Ему на смену пришел следующий уровень — 5PL, который обеспечивает комплексный подход к решению транспортных задач с использованием глобальных сетей, может рассчитать оптималь-

Таблица 1

Земельная площадь Белгородской области (на начало года), тыс. га [8]

Площадь земель	Год				
	2018	2019	2020	2021	2022
Всего	2713,4	2713,4	2713,4	2713,4	2713,4
в том числе:					
сельскохозяйственные угодья	2134,3	2133,7	2133,7	2133,7	2133,3
лесные земли	241,9	241,9	241,9	241,9	242
поверхностные воды	47,6	47,6	47,6	47,6	47,6
другие земли	289,6	290,2	290,2	290,2	290,5

ные маршруты доставки и выстраивание полных цепочек поставок, основывается на применении IT-технологий и информационно-технологического пространства для оптимизации процессов. Для сравнения требований к составу транспортно-логистической услуги на уровнях 4PL и 5PL обратимся к ГОСТ Р 59951-2021 (табл. 2).

Как видно из табл. 2, для уровня 5PL характерно наличие таких отличительных элементов, как электронный документооборот, пользовательский доступ к информационным системам, виртуальные интернет-платформы [13]. То есть уровень 5PL — это виртуальный логистический оператор, который предлагает комплексные логистические решения, включая управление всеми аспектами цепочки поставок. По мнению авторов, логистические операторы, действующие на таком уровне, имеют приоритетное положение в рассматриваемой интегрированной логистической системе, что обусловлено возможностью создавать открытые бизнес-системы за счет IT-технологий, работающих в едином информационном пространстве. Организации же, в свою очередь, могут использовать технологические

ресурсы и возможности для решения конкретных логистических задач, значительно снижая свои издержки. Это обусловлено тем, что интеграционный процесс требует использования сложной, многоуровневой системы данных, т.е. реализуется процесс цифровой трансформации логистических систем.

Соответственно целесообразно определить направления интеграции. Наиболее оптимальным из них будет кластеризация, которая объединяет в себе вертикальную и горизонтальную интеграции, кроме того, кластеры имеют ряд отличительных особенностей от других существующих форм кооперации. Например, в работе [14] выделены такие отличия, как «специфические активы, тенденция к территориальной локализации, долгосрочность и высокая инерционность внутренних связей, наличие разноуровневой технологической системы взаимодействия».

Однако создание кластера на территории региона невозможно по причине принципиальных различий в концепции кластерного объединения и логистической интегрированной системы. Во-первых, деятельность в рамках кластера направлена

Таблица 2

Требования к составу транспортно-логистической услуги [13]

Вид услуг	Уровень транспортно-логистической услуги	
	4PL	5PL
Информационно-справочные услуги	+	+
Консультационные услуги при достижении договоренности о взаимодействии	+	+
Формирование логистической цепочки перевозки груза, включая расчет срока и стоимости его доставки	+	+
Оформление перевозочных документов и других документов, связанных с оказанием транспортно-логистической услуги	+	+
Упаковка и (или) маркировка груза	+	+
Подбор и (или) предоставление транспортных средств и при необходимости транспортного оборудования для перевозки груза	+	+
Предоставление подвижного состава	+	+
Погрузочно-разгрузочные операции	+	+
Хранение груза	+	+
Организация перевозки груза железнодорожным транспортом	+	+
Организация перевозки груза автомобильным, и (или) водным транспортом, и (или) авиатранспортом	+	+
Осуществление платежей и взаиморасчетов от имени грузовладельца с участниками оказания транспортно-логистической услуги	+	+
Транспортно-экспедиторские услуги	+	+
Взаимодействие со структурными подразделениями компании-грузовладельца в части выстраивания внутренней логистики перемещения груза	+	+
Управление запасами груза	+	+
Взаимодействие с грузовладельцами/клиентами от имени компании-грузовладельца	+	+
Электронный документооборот	–	+
Пользовательский доступ к информационным системам, связанным с хранением и транспортированием груза железнодорожным транспортом	–	+
Использование виртуальной интернет-платформы для взаимодействия с грузовладельцами/клиентами	–	+

на оптимизацию межотраслевых взаимодействий, что представляет собой чрезмерно широкое понятие, так как в рамках логистической интеграции основная задача — оптимизация потоковых процессов. Во-вторых, создание кластера на территории региона связано с рядом бюрократических проблем, осложняющих процесс интеграции. И в-третьих, главная и обязательная характеристика кластера — это инновационная активность его участников, которая в рамках интегрированной логистической системы необязательна.

Это становится одним из многих катализаторов создания и развития новых организационных форм, отвечающих требованиям цифровой трансформации логистических систем — Логистики 4.0, а также Индустрии 4.0 в целом. Среди таких форм, наиболее адаптивных к динамике современных субъектов хозяйствования, относятся цифровые экосистемы. Например, в работе [15] отмечено, что «в новой цифровой реальности возможным становится взаимодействие территориально разобщенных элементов и логистических процессов в едином сквозном информационном пространстве и глобальном времени». Функционирование организаций АПК в среде цифровой экосистемы позволит решить такую задачу, как непрерывное продвижение информации обо всех материальных потоках [16].

Для создания цифровой экосистемы, обеспечивающей процесс интеграции логистической системы в АПК Белгородской области, целесообразно использовать стратегию партнерства. Поскольку в рамках данной стратегии возможен обмен знаниями и опытом на безвозмездной основе, участники партнер-

ских отношений получают доступ к поставщикам и потребителям друг друга, кроме того, достигается более высокий уровень дифференциации рисков, что сокращает вероятность финансовых потерь.

Эффективное взаимодействие между участниками экосистемы можно обеспечить за счет создания цифровой платформы с учетом регламентов информационного обмена, унификации и стандартизации форматов (рис. 4). По мнению авторов работы [16], с чем можно согласиться, на практике цифровая платформа будет способствовать значительной рационализации и координации взаимодействия между хозяйствующими субъектами.

Взаимодействие субъектов АПК Белгородской области при помощи цифровой платформы позволит качественно изменить показатели ряда параметров, что, несомненно, окажет положительное влияние не только на развитие непосредственно сельского хозяйства региона, но и в целом на темпы экономического роста.

Результатом практических мероприятий при внедрении интегрированной логистической системы в АПК региона служит оптимизация материальных потоков за счет IT-решений и, как следствие, рост ее эффективности с экономической точки зрения.

Таким образом, нами сделан вывод о том, что агропромышленный комплекс Белгородской области испытывает ряд системных проблем, решить их позволит внедрение интегрированной логистической системы, которая носит комплексный

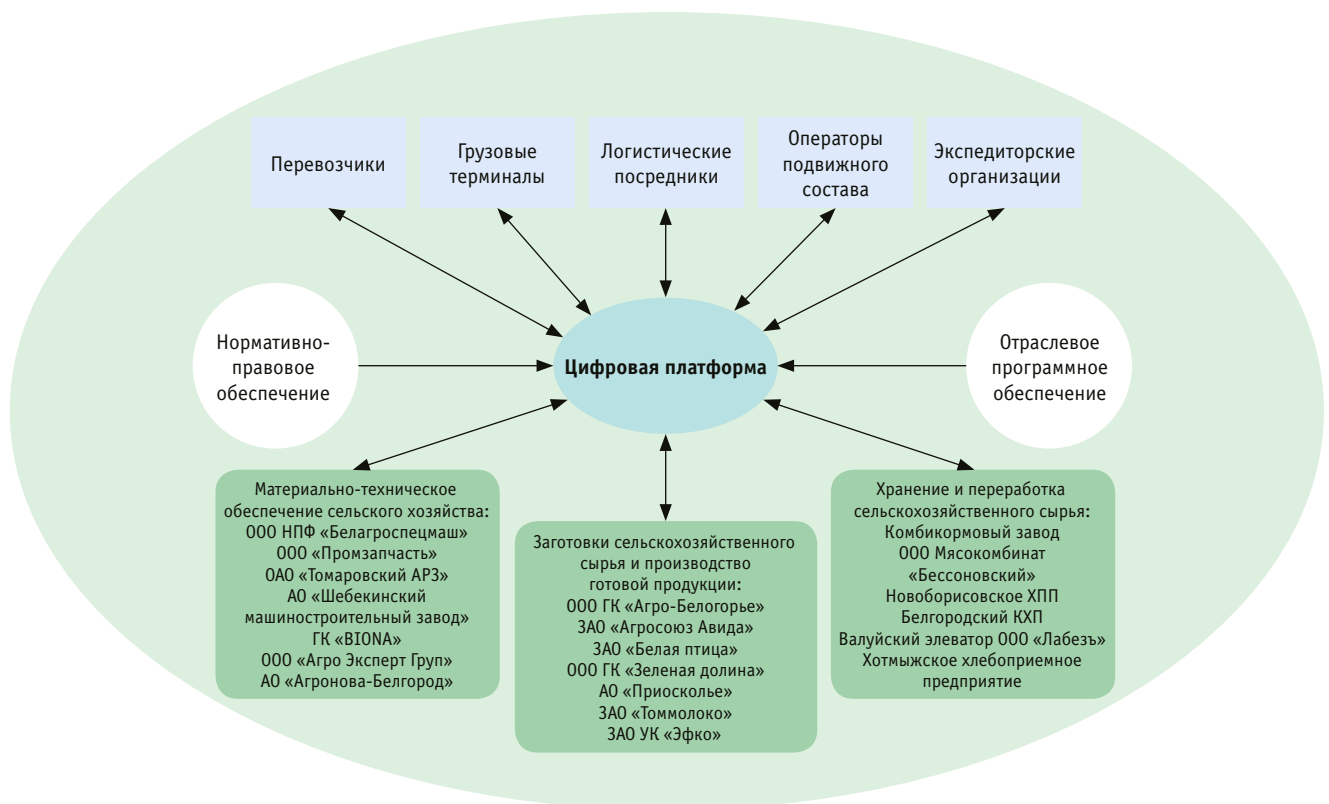


Рис. 4. Схема взаимодействия субъектов интегрированной логистической системы в экосистеме АПК Белгородской области

характер и предполагает рационализацию профильной инфраструктуры (в частности, складов, транспортных средств, систем коммуникаций и информационных технологий). Интегрированная логистическая система направлена на унификацию и согласованность всех логистических процессов, оптимизацию и комплексность управления логистическими операциями, снижение количества ошибок и повышение точности операций. Реализовать эти процессы позволит создание бизнес-экосистемы на территории региона, в рамках которой возможно активно применять информационные технологии и автоматизацию. Использование новых организационных форм отвечает требованиям Индустрии 4.0, позволяет обеспечивать высокую гибкость систем и более тесное взаимодействие меж-

ду различными участниками цепочки создания стоимости, что способствует развитию инноваций и конкурентоспособности.

Реализация предложенных мер не только даст возможность создать логистическую систему, функционирующую по интегративным принципам, и укрепить конкурентные преимущества Белгородской области среди ключевых сельскохозяйственных регионов страны, но и приблизит достижение приоритета устойчивой технологически развитой экономики в рамках всей страны.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Сведения об авторах:

Александр Сергеевич Трошин,

доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой мировой экономики и финансового менеджмента Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

Иван Алексеевич Новиков,

доктор технических наук, профессор, директор транспортно-технологического института Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова

Норайр Оганесович Блудян,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильные перевозки» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

Владимир Юрьевич Линник,

доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и управления в топливно-энергетическом комплексе Государственного университета управления

Authors information:

Alexander S. Troshin,

DSc in Economics, Associate Professor, Head of World Economy and Financial Management Department, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

Ivan A. Novikov,

DSc in Engineering, Professor, Head of Transport and Technological Institute, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov

Norayr O. Bludyan,

DSc in Engineering, Professor, Professor of Road Transportation Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Vladimir Yu. Linnik,

DSc in Economics, Associate Professor, Professor of Economics and Management in the Fuel and Energy Complex Department, State University of Management

Литература

1. Тод Н. А. Особенности управления потоками в логистике АПК // Научно-практические аспекты развития АПК : материалы национальной научной конференции, Красноярск, 12 ноября 2020 г. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2020. Ч. 2. С. 106–109.
2. Логистика / В. Ф. Стукач, В. С. Пецевич, О. В. Косенчук, Г. Г. Левкин. Омск : Изд-во ОмГАУ, 2004. 256 с.
3. Тимакова Р. Т. Концептуальный подход к интегрированной логистике в агропромышленном комплексе страны // Развитие экономических систем: теория, методология, практика. Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2022. С. 202–218.
4. Полный рейтинговый отчет по Белгородской области / АКРА. URL: <https://www.acra-ratings.ru/press-releases/3058/> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Белгородской области на период до 2030 года : постановление Правительства Белгородской области от 11.07.2023 г. № 371-пп. URL: <https://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW404&n=93557#DDXaNPUIJ7YXPPDLH> (дата обращения: 20.09.2024).

References

1. Tod N. A. Features of flow management in logistics of the agroindustrial complex. *Scientific and practical aspects of development of the agroindustrial complex*: proceedings of the national scientific conference, Krasnoyarsk, November 12, 2020. Krasnoyarsk : Krasnoyarsk State Agrarian University, 2020. Part 2. Pp. 106–109. (In Russian).
2. Stukach V. F., Petsevich V. S., Kosenchuk O. V., Levkin G. G. Logistics. Omsk : Publishing House of OmskGAU, 2004. 256 p. (In Russian).
3. Timakova, R. T. Conceptual approach to integrated logistics in the agro-industrial complex of the country. *Development of economic systems: theory, methodology, practice*. Penza : Penza State Agrarian University, 2022. Pp. 202–218. (In Russian).
4. Full rating report on Belgorod Region. URL: <https://www.acra-ratings.ru/press-releases/3058/> (access date: 20.09.2024). (In Russian).
5. On approval of the Strategy for the socio-economic development of Belgorod Region for the period up to 2030 : the Order of the Government of Belgorod Region dated 11.07.2023 No. 371-pp. URL: <https://www.consultant.ru/regbase/cgi/online.cgi?req=doc&base=RLAW404&n=93557#DDXaNPUIJ7YXPPDLH> (access date: 20.09.2024). (In Russian).

6. Национальные счета / Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (дата обращения: 22.09.2024).
7. Площадь территорий РФ / Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistic> (дата обращения: 22.09.2024).
8. Белгородская область в цифрах 2022. Краткий статистический сборник / Белгородстат. URL: https://31.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/0107_2022.pdf (дата обращения: 22.09.2024).
9. Сельское хозяйство / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Белгородской области. URL: <https://31.rosstat.gov.ru/agriculture> (дата обращения: 22.09.2024).
10. Об утверждении государственной программы Белгородской области «Развитие сельского хозяйства и рыбоводства в Белгородской области» (с изм. на 25.04.2022 г.) : постановление Правительства Белгородской области от 28.10.2013 г. № 439-пп URL: <https://docs.cntd.ru/document/406031007> (дата обращения: 22.09.2024).
11. Сводный годовой доклад «О ходе реализации и оценке эффективности государственных программ Белгородской области по итогам 2022 года». URL: <https://belregion.ru/documents/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4.pdf> (дата обращения: 22.09.2024).
12. Lukinykh V. F., Lukinykh Yu. V. The Integrated Logistic Systems in Agro-Industrial Complex of the Krasnoyarskiy Territory: Base and Prospects of Development // Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences. 2016. Vol. 9. No. 11. Pp. 2845–2852.
13. ГОСТ Р 59951-2021. Услуги на железнодорожном транспорте. Транспортно-логистические услуги в грузовых перевозках. Общие требования к качеству. Москва : Российский институт стандартизации, 2022. 16 с.
14. Трошин А. С., Липунов С. А., Долженко В. А. Влияние промышленных кластеров, как субъектов инновационной деятельности, на развитие социально-экономических показателей региона // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2024. № 1. С. 124–131. DOI: 10.56584/1560-8816-2024-1-124-131.
15. Войтешик А. А. Развитие цифровой экосистемы в логистике // Развитие логистики и управления цепями поставок : материалы III Международной научно-практической студенческой конференции (в рамках Международного молодежного форума «Креатив и инновации'2022»), Минск, 25 ноября 2022 г. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2023. С. 55–60.
16. Макарова Н. Н., Тимофеева Г. В., Суркова В. В. Концепты деятельности цифровых экосистем транспортно-логистического обслуживания предпринимательских структур АПК: территориальный аспект // Развитие территорий. 2022. № 3 (29). С. 8–13. DOI: 10.32324/2412-8945-2022-3-08-13.
6. National accounts. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (access date: 22.09.2024). (In Russian).
7. Area of the territories of the Russian Federation. URL: <https://rosstat.gov.ru/statistic> (access date: 22.09.2024). (In Russian).
8. Belgorod Region in Figures 2022. Brief statistical digest. URL: https://31.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/0107_2022.pdf (access date: 22.09.2024). (In Russian).
9. Agriculture. URL: <https://31.rosstat.gov.ru/agriculture> (access date: 22.09.2024). (In Russian).
10. On approval of the state program of the Belgorod Region «Development of agriculture and fish farming in the Belgorod Region»: the Order of the Government of the Belgorod Region dated 28.10.2013 No. 439-pp (with amendments from 25.04.2022). URL: <https://docs.cntd.ru/document/406031007> (access date: 22.09.2024). (In Russian).
11. Consolidated annual report «On the progress of implementation and assessment of the effectiveness of state programs of the Belgorod Region based on the results of 2022». URL: <https://belregion.ru/documents/%D0%A1%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4.pdf> (access date: 22.09.2024). (In Russian).
12. Lukinykh V. F., Lukinykh Yu. V. The Integrated Logistic Systems in Agro-Industrial Complex of the Krasnoyarskiy Territory: Base and Prospects of Development. *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2016. Vol. 9. No. 11. Pp. 2845–2852.
13. GOST R 59951-2021. Services in railway transport. Transport and logistics services in freight transportation. General quality requirements. Moscow : Russian Standardization Institute, 2022. 16 p. (In Russian).
14. Troshin A. S., Lipunov S. A., Dolzhenko V. A. The influence of industrial clusters, as subjects of innovation activity, on the development of socio-economic indicators of the region. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*. 2024. No. 1. Pp. 124–131. DOI: 10.56584/1560-8816-2024-1-124-131. (In Russian).
15. Voiteshik A. A. Development of a digital ecosystem in logistics. *Development of logistics and supply chain management* : proceedings of the 3rd International scientific and practical student conference (within the framework of the International Youth Forum «Creativity and Innovations'2022»). Minsk : Belarusian National Technical University, 2023. Pp. 55–60. (In Russian).
16. Makarova N. N., Timofeeva G. V., Surkova V. V. Concepts of the activities of digital ecosystems of transport and logistics services for entrepreneurial structures of the agro-industrial complex: territorial aspect. *Development of territories*. 2022. No. 3 (29). Pp. 8–13. DOI: 10.32324/2412-8945-2022-3-08-13. (In Russian).

Объем статьи 0,98 авторских листа

Научная статья
УДК 656.025.4

Определение места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах

София Дмитриевна Подолинная¹, Роман Григорьевич Король¹

¹Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

Determining of location for transport and logistics facility in special economic and geographical zones

Sofya D. Podolinnaya¹, Roman G. Korol¹

¹Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia

Аннотация

В статье проведен анализ научно-методических подходов к рациональному выбору места размещения транспортно-логистических объектов. Систематизированы факторы, влияющие на выбор места размещения транспортно-логистических объектов. Дополнительно описаны новые факторы: географико-экономический, технологический, грузодинамический, международный и стратегический, а также составлена схема взаимосвязи представленных факторов. В рамках исследования разработана методика выбора рационального места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах, основанная на расчете комплексного показателя. Результаты исследования позволяют оценить и выбрать рациональные варианты мест размещения создаваемых транспортно-логистических объектов, в том числе на приграничных территориях Дальнего Востока.

Ключевые слова: транспортно-логистический объект, внешнеторговые перевозки, факторный анализ, приграничный регион, трансграничный переход

Abstract

The article analyzes scientific and methodological approaches to the rational choice of the location of transport and logistics infrastructure facilities. The systematization of the factors influencing the choice of location of transport and logistics facilities has been carried out. The paper additionally describes new factors: geographic-economic, technological, cargo-dynamic, international and strategic, as well as a diagram of the interrelation of the presented factors. Within the framework of this study, a methodology has been developed for choosing a rational location for a transport and logistics facility in special economic and geographical zones, based on the calculation of a complex indicator. The results of the study allow us to evaluate and choose rational options for the placement of transport and logistics facilities being created, including in the border territories of the Far East.

Keywords: transport and logistics facility, foreign trade transportation, factor analysis, border region, cross-border crossing

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-69-75

ВВЕДЕНИЕ

В условиях постоянно меняющихся требований транспортно-логистического рынка и увеличения объемов грузоперевозок выбор рационального места размещения транспортно-логистических объектов становится ключевым фактором обеспечения конкурентоспособности и устойчивого развития транспортно-логистического комплекса страны [1]. Поскольку эта задача особенно актуальна для регионов Дальнего Востока, то по результатам Восточного экономического форума принято решение о создании производственного кластера для развития региональной логистики и выхода на рынки стран Азиатско-Тихоокеанского региона [2, 3].

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ

Научные исследования по выбору места размещения транспортно-логистических объектов используют разнообразные методы и подходы, основанные на различных наборах показателей. Каждый из этих методов учитывает ключевые факторы, такие как экономические, социально-демографические, инфраструктурные и экологические и др., определяемые авторами самостоятельно. В табл. 1 представлен анализ научных трудов, посвященных выбору места под строительство или размещение транспортно-логистических объектов.

Систематизация факторов визуализирована на рис. 1 в виде шкалы частоты их упоминания в научных трудах из табл. 1. Шкала позволяет оценить значимость факторов для проведения дальнейших научных исследований. Чем выше частота употребления определенного фактора в научных трудах, тем больше значимость этого фактора, влияющего на принятие решения по выбору места размещения транспортно-логистического объекта.

Результаты анализа показали, что наиболее часто используются следующие факторы.

1. Инфраструктурный, который отражает уровень развития транспортной инфраструктуры на потенциальной территории для строительства транспортно-логистического объекта. Этот фактор рассматривает наличие различных элементов железнодорожной, автодорожной, морской инфраструктуры, включая транспортные узлы, а также учитывает степень доступности и качество транспортного обслуживания, расстояние до рынков сбыта и поставщиков, размещение логистических центров и складов.

Таблица 1

Анализ научных трудов, посвященных определению места размещения транспортно-логистических объектов

Авторы	Название работы	Методика	Выявленные факторы
Псеровская Е. Д., Грефенштейн А. П.	Расположение городского распределительного центра: научно-методологический подход [4]	Методика последовательного сужения множества решений до решения, удовлетворяющего ряду ограничений	Инфраструктурный Географический Природно-климатический Нормативно-правовой
Копылова О. А., Рахмангулов А. Н.	Применение метода системной динамики для исследования факторов размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры [5]	Метод системной динамики	Инфраструктурный Социально-демографический Геополитический Географический
Видовский Л. А., Литовка Н. В.	Методология оптимального размещения объектов торговой сети [6]	Алгоритм муравьиной колонии	Инфраструктурный Географический Экономический
Бардаль А. Б., Сигитова М. А.	Методика определения расположения логистических центров (на примере Дальнего Востока России) [7]	Авторская методика адаптации отдельных методов	Инфраструктурный Географический Экономический
Кашбразиев Р. В., Шихалев А. М.	Модель многокритериальной оценки регионов по рациональному размещению логистических центров на территории РФ [8]	Многокритериальная задача принятия решений с позиции метода анализа иерархии Т. Саати	Инфраструктурный Социально-демографический Геополитический Географический Экономический
Вебер А.	Теория размещения промышленности [9]	Модель промышленного штандорта	Инфраструктурный Социально-демографический Географический
Апатцев В. И., Басыров И. М.	Оценка факторов, влияющих на выбор оптимального месторасположения объек- тов логистической инфраструктуры [10]	Комбинированный метод факторного анализа	Инфраструктурный Социально-демографический Природно-климатический
Изтелеуова М. С., Изтелеуова М. Б.	Метод совершенствования транспортно-логистической инфраструктуры как основы развития международного сотрудничества [11]	Математическая модель совокупного эффекта в регионе	Инфраструктурный Социально-демографический Геополитический Экономический Нормативно-правовой
Дамбаева Н. П.	Развитие экономического потенциала приграничного региона [12]	Пространственный подход	Социально-демографический Геополитический Природно-климатический Ресурсно-экологический
Левкин Г. Г., Мочалова С. В., Мухамадеева Р. М., Саттаров Р. С., Шамис В. А	Возможности создания транспортно-логистического кластера в Омской области [13]	Логистический анализ и синтез	Исторический Географический Инфраструктурный

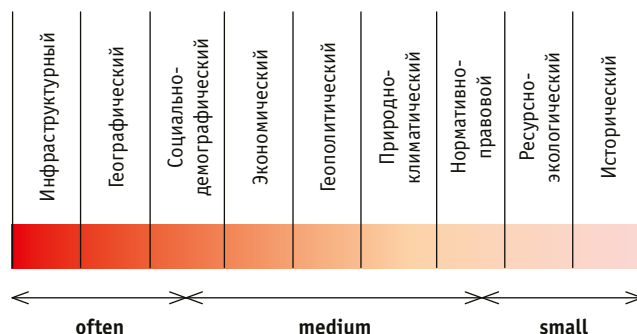


Рис. 1. Шкала частоты упоминания факторов в отечественных исследованиях

2. К географическому фактору относится географическое положение рассматриваемой местности, особенности рельефа, климата, наличие природных ресурсов и ограничений, связанных с экологическими нормами. Этот фактор также учитывает расположение рынков сбыта и поставщиков на полигоне обслуживания с учетом транспортной доступности.

3. Социально-демографический фактор на потенциальной территории для размещения транспортно-логистического объекта учитывает численность и плотность населения, возрастные группы, продолжительность жизни, уровень образования, занятость населения, уровень доходов и расходов населения, структуру потребления, миграционные процессы, а также культурные особенности региона, уровень социальной напря-

женности и преступности, транспортную доступность для населения, наличие социальной и жилищной инфраструктуры.

4. Экономический фактор представлен в виде уровня экономического развития региона и включает такие показатели, как ВВП, инфляция, прожиточный минимум, ставка рефинансирования, торговый баланс, инвестиционная привлекательность, уровень безработицы, финансовая устойчивость, объем производства и промышленный потенциал, а также интенсивность конкуренции и параметры рыночной среды.

5. Геополитический фактор направлен на оценку уровня международной безопасности и устойчивости внешней торговли, экономических возможностей региона с ориентацией на экспорт товаров, рассматривает вопросы государственного управления, законодательства, наличие военных конфликтов, коррупции, торговых соглашений. Этот фактор учитывает производственный потенциал региона, позволяющий спрогнозировать перспективные внешнеторговые объемы, в том числе конкурентоспособность продуктовой линейки, поставляемой за рубеж, и создание международных территорий опережающего развития (ТОР).

Ресурсно-экологический и природно-климатический факторы можно рассматривать как составную часть географического: показатели каждого из них зависят от географических особенностей региона. Ресурсно-экологический фактор предполагает оценку ресурсных возможностей региона в сельском хозяйстве, промышленности, торговле, учитывая демографию, имеющееся инфраструктурное развитие, научный, финансовый и трудовой потенциал, а также объемы биологических, минеральных и энергетических ресурсов. Эта группа факторов характеризует состояние окружающей среды и ее компонентов, включает такие показатели, как качество воздуха, воды, почвы, уровень шума, ультрафиолетового излучения, биоразнообразие, эффективность использования альтернативных источников энергии и топлива, количество аварийных ситуаций и др.

Нормативно-правовой фактор учитывает федеральные требования, региональные законодательные особенности, наличие территориальных ограничений на определенный вид деятельности и т.д. Исторический фактор в первую очередь направлен на комплексный анализ экономического, производственного и демографического развития региона, его территорий, формирование перспективного облика региона с учетом межрегионального и международного сотрудничества.

При принятии решения о размещении транспортно-логистического объекта на потенциальной территории особой экономико-географической зоны необходимо учитывать дополнительные факторы, которые влияют на эффективность международных перевозок и устойчивость транспортного сообщения, а также на функционирование создаваемого объекта [14].

В своей статье мы рассматриваем технологический, грузодинамический и международный факторы. Технологический фактор показывает степень гармонизации пропускной и перерабатывающей способностей региональной инфраструктуры, эффективность используемых технологий перевозки грузов и изменение процессов транспортировки грузопотоков при создании нового транспортно-логистического объекта [15]. Технологический фактор взаимосвязан с инфраструктурным

фактором, эффективность технологического взаимодействия видов транспорта обеспечивается за счет информационного, материального и инфраструктурного обеспечения. Несогласованность различных видов транспорта негативно отражается на функционировании транспортной системы, что влияет на экономический фактор. Показатели технологического фактора основаны на аналитике транспортно-логистических процессов, их временных параметрах и участвующих подсистемах. Этот фактор зависит от развития регионального транспортно-логистического комплекса.

Грузодинамический фактор отражает интенсивность движения транспортных средств на рассматриваемой территории и степень загруженности транспортной инфраструктуры. Он определяется как отношение объема грузопотока к протяженности транспортной инфраструктуры, что позволяет оценить резервы пропускной способности на определенных участках транспортной сети. К показателям грузодинамического фактора относятся структура и объемы перемещаемого грузопотока, направления движения грузов, количество и скорость движения используемых транспортных средств, а также прогнозируемые объемы перевозок.

Для определения месторасположения транспортно-логистических объектов в приграничном регионе необходимо учитывать международный фактор, который является одним из ключевых при проектировании нового международного транспортного коридора. Международный фактор позволяет оценить перспективные планы смежного государства в области внешней торговли с учетом развития промышленной инфраструктуры приграничных территорий, транспортных сетей и городских агломераций. Кроме того, он рассматривает показатели социально-экономического развития смежной страны (включая текущие и прогнозные объемы потребления сырья и выпуска готовой продукции), индекс промышленного производства, потребительских цен и деловой активности, а также наличие торговых соглашений и межгосударственных проектов [16].

В процессе исследования нами дополнительно включен стратегический фактор, который учитывает прогнозные сценарии и показатели развития рассматриваемого региона, в том числе согласно федеральным, региональным и отраслевым программам.

Все перечисленные факторы взаимосвязаны и при комплексном рассмотрении позволяют не только проанализировать текущее состояние, но и оценить перспективное развитие потенциальной территории для организации транспортно-логистического объекта (рис. 2).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Выбор рационального места размещения транспортно-логистического объекта осуществляется с помощью комплексного показателя, который учитывает состояние потенциальной территории по различным сферам развития на основе расчета соответствующих показателей деятельности. Определение комплексного показателя выполняется с использованием поправочных и весовых коэффициентов. Весовой коэффициент

показывает значимость переменных величин, оказывающих влияние на итоговые расчеты. Поправочный коэффициент применяется для корректировки значений в соответствии с правилами или стандартами, что позволяет получить более точные и достоверные результаты. В данной методике весовые коэффициенты для показателей и факторов определяются эвристическим методом, поправочные коэффициенты рассчитываются математическими способами. Комплексный показатель I вычисляется следующим образом:

$$I = \sum (I_i \cdot K_{pi}^{\Phi}) \cdot K_i^{\Phi}, \quad (1)$$

где I_i , K_{pi}^{Φ} и K_i^{Φ} — соответственно показатель, поправочный коэффициент и весовой коэффициент i -го фактора.

$$I_i = \sum \left(\frac{P_i}{P_0} \cdot K_i^{\Pi} \right), \quad (2)$$

где P_i — численное значение i -го показателя; P_0 — среднее значение показателя, рассчитываемое по формуле $P_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$; K_i^{Π} — весовой коэффициент i -го показателя.

$$K_{pi} = 1 \pm \Delta, \quad (3)$$

где Δ — отклонение фактического значения показателя от среднего.

Арифметический знак определяется исходя из следующих условий:

$$\begin{cases} \text{если } (P_i - P_0) - 1 > 0, \text{ то принимается знак «+»} \\ \text{если } (P_i - P_0) - 1 < 0, \text{ то принимается знак «-»} \end{cases}$$

Расчет весовых коэффициентов осуществляется при помощи метода попарного сравнения показателей и оценочной шкалы, сформированной на основе модели шкалирования Терстоуна [17, 18], которая применяется для измерения различных параметров. Этот метод требует значительных затрат

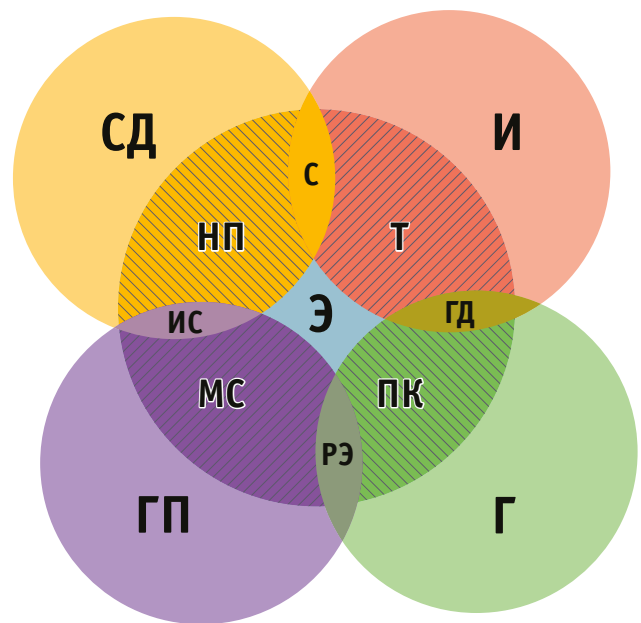


Рис. 2. Взаимозависимость факторов, влияющих на размещение транспортно-логистического объекта:

И — инфраструктурный; Г — географический; ГП — геополитический; СД — социально-демографический; Э — экономический; Т — технологический; ПК — природно-климатический; МС — международное сотрудничество; НП — нормативно-правовой; ГД — грузодинамический; РЭ — ресурсно-экологический; ИС — исторический; С — стратегический

времени и ресурсов на разработку шкал и проведение опроса, поэтому его использование целесообразно только в тех случаях, когда необходима высокая точность результатов. Парное сравнение показателей осуществляется посредством построения квадратной матрицы, приведенной в табл. 2. Построение матрицы осуществляется путем последовательного сравнения выбранных для исследования транспортно-логистических объектов по каждому показателю с присвоением оценки по шкале.

Таблица 2

Матрица оценки мест размещения транспортно-логистических объектов

Объект исследования	Факторы	Φ_1			Φ_2			Φ_n		
	Показатели	$P_1^{\Phi_1}$	$P_2^{\Phi_1}$	$P_n^{\Phi_1}$	$P_1^{\Phi_2}$	$P_2^{\Phi_2}$	$P_n^{\Phi_2}$	$P_1^{\Phi_n}$	$P_2^{\Phi_n}$	$P_n^{\Phi_n}$
O_1	$O_n P_1^{\Phi_n}$	$O_1 P_1^{\Phi_1}$	$O_1 P_2^{\Phi_1}$	$O_1 P_n^{\Phi_1}$	$O_1 P_1^{\Phi_2}$	$O_1 P_2^{\Phi_2}$	$O_1 P_n^{\Phi_2}$	$O_1 P_1^{\Phi_n}$	$O_1 P_2^{\Phi_n}$	$O_1 P_n^{\Phi_n}$
O_2		$O_2 P_1^{\Phi_1}$	$O_2 P_2^{\Phi_1}$	$O_2 P_n^{\Phi_1}$	$O_2 P_1^{\Phi_2}$	$O_2 P_2^{\Phi_2}$	$O_2 P_n^{\Phi_2}$	$O_2 P_1^{\Phi_n}$	$O_2 P_2^{\Phi_n}$	$O_2 P_n^{\Phi_n}$
O_3		$O_3 P_1^{\Phi_1}$	$O_3 P_2^{\Phi_1}$	$O_3 P_n^{\Phi_1}$	$O_3 P_1^{\Phi_2}$	$O_3 P_2^{\Phi_2}$	$O_3 P_n^{\Phi_2}$	$O_3 P_1^{\Phi_n}$	$O_3 P_2^{\Phi_n}$	$O_3 P_n^{\Phi_n}$
...	
O_n		$O_n P_1^{\Phi_1}$	$O_n P_2^{\Phi_1}$	$O_n P_n^{\Phi_1}$	$O_n P_1^{\Phi_2}$	$O_n P_2^{\Phi_2}$	$O_n P_n^{\Phi_2}$	$O_n P_1^{\Phi_n}$	$O_n P_2^{\Phi_n}$	$O_n P_n^{\Phi_n}$
P_0	$\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$	P_0^1	P_0^2	P_0^n	P_0^1	P_0^2	P_0^n	P_0^1	P_0^2	P_0^n

На основе сформированной матрицы производится расчет собственных векторов по каждому показателю. Собственный вектор характеризует свойства оператора без привязки к конкретной системе координат. Вычисление собственного вектора осуществляется по формуле

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n O_{ij} \Pi_j^{\Phi_n}}, \quad (4)$$

где O_n — рассматриваемые объекты исследования; $\Pi_i^{\Phi_n}$ — i -й показатель n -го фактора, по которому рассчитывается собственный вектор; n — количество рассматриваемых объектов.

После вычисления показателей собственных векторов необходимо определить суммарный вектор, который рассчитывается как сумма всех показателей собственных векторов:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (5)$$

Далее рассчитывается весовой коэффициент каждого показателя для определения степени его влияния на конечный результат исследования:

$$K_i^{\Pi_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda}, \quad (6)$$

где λ_i — собственный вектор i -го показателя; λ — суммарный вектор.

Весовой коэффициент показывает долю каждого коэффициента в общем прогнозе, поэтому должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^n K_i^{\Pi_i} = 1.$$

После вычисления собственных векторов и весовых коэффициентов необходимо определить индекс согласованности, который отражает согласованность производимых вычислений. Индекс согласованности рассчитывается путем сравнения матрицы значений, которая строится на основе данных табл. 2, и матрицы, построенной с использованием определенных ранее собственных векторов показателей.

Индекс согласованности рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (7)$$

где λ_{\max} — максимальное значение матрицы; n — количество рассматриваемых объектов.

Максимальное собственное значение матрицы определяется умножением матриц:

$$\lambda_{\max} = \begin{pmatrix} O_1 \Pi_1^{\Phi_1} & O_1 \Pi_2^{\Phi_2} & O_1 \Pi_n^{\Phi_n} \\ O_2 \Pi_1^{\Phi_1} & O_2 \Pi_2^{\Phi_2} & O_2 \Pi_n^{\Phi_n} \\ O_n \Pi_1^{\Phi_1} & O_n \Pi_2^{\Phi_2} & O_n \Pi_n^{\Phi_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1^{\Pi_1} \\ \lambda_2^{\Pi_2} \\ \lambda_n^{\Pi_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{1\max} \\ \lambda_{2\max} \\ \lambda_{n\max} \end{pmatrix}.$$

Итогом вычислений максимального собственного значения матрицы будет вектор-матрица, которую требуется перевести в численное значение для расчета индекса согласованности, поэтому необходимо определить среднее арифметическое максимальное значение:

$$\overline{\lambda_{\max}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{i\max}^{\Pi_i}}{K_i^{\Pi_i}}}{n}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{i\max}^{\Pi_i}}{K_i^{\Pi_i}}$ — сумма отношений максимального показателя вектора к весовому коэффициенту показателя; n — количество рассматриваемых объектов.

В соответствии со шкалой Марголина [19], согласованность мнений находится на высоком уровне, если $S < 0,3$; на среднем уровне, если $S \in [0,3; 0,7]$, тогда необходимо пересмотреть параметры оценки или способы оценивания; на низком уровне, если $S > 0,7$, при данном результате следует повторить процедуру оценки. В табл. 3 приведена оценка степени согласованности мнений в зависимости от диапазона сравнения допустимых отклонений.

Таблица 3

Диапазон допустимых отклонений
при оценке согласованности мнений

Диапазон сравнения	Степень согласованности
$0 \leq S < 0,1$	Очень высокая
$0,1 \leq S < 0,3$	Высокая
$0,3 \leq S < 0,5$	Умеренная
$0,5 \leq S < 0,7$	Слабая
$0,7 \leq S < 0,9$	Очень слабая
$0,9 \leq S \leq 1$	Отсутствует

Индекс согласованности отражает объективность экспертной оценки с последующим вычислением коэффициентов. При низкой степени согласованности необходимо проводить оценку повторно. Высокая степень согласованности подтверждает правильность расчета коэффициентов, и можно производить вычисления показателей каждого фактора и комплексного показателя, который является итоговым значением для принятия решения о выборе рационального места размещения транспортно-логистического объекта в особых экономико-географических зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание новых транспортно-логистических объектов на Дальнем Востоке является приоритетным направлением развития национальной транспортной отрасли и рынка логистических услуг [20]. В разработанной методике рассматривается определение рационального места размещения транспортно-логистического объекта при помощи комплексного показателя

с учетом поправочных и весовых коэффициентов, которые основаны на статистических данных по каждому фактору, описанному в статье. В расчетах рекомендуется использовать составные факторы, которые могут подразделяться на первый, второй и третий порядок, отражающие количество факторов, входящих в состав порядка. К факторам первого порядка относятся факторы, которые не зависят от других факторов, к таким можно отнести инфраструктурный фактор. К факторам второго и третьего порядка относятся факторы, на которые оказывают влияние другие факторы, при этом чем выше степень влияния других факторов на рассматриваемый фактор,

тем выше порядок этого фактора. Выявить взаимозависимость показателей и факторов друг с другом можно путем объединения показателей составного фактора с показателями более крупных факторов. Для выявления степени воздействия факторов и их взаимозависимости необходимо с помощью инструментов имитационного моделирования выполнить анализ показателей, характеризующих факторы. Программный продукт на основе методов машинного интеллекта позволит выполнить попарное сравнение факторов и показателей, в том числе исключив субъективность человеческого мнения при принятии решений.

Сведения об авторах:

София Дмитриевна Подолинная,
аспирант кафедры «Технология транспортных процессов и логистика»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения

Роман Григорьевич Король,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Технология транспортных процессов и логистика»
Дальневосточного государственного университета путей сообщения

Authors information:

Sofya D. Podolinnaya,
postgraduate student of Technology of Transport Processes
and Logistics Department, Far Eastern State Transport University

Roman G. Korol,
PhD in Engineering, Associate Professor,
Head of Technology of Transport Processes and Logistics Department,
Far Eastern State Transport University

Литература

1. Покровская О. Д. Развитие логистической транспортной системы России в условиях санкций // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 3. С. 58–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72.
2. Сможет ли ВЭФ открыть для нас окно возможностей в Китае? URL: <https://roscongress.org/materials/smozhet-li-vef-otkryt-dlya-nas-okno-vozmozhnostey-v-kitae/> (дата обращения: 15.02.2024).
3. О реакции китайской стороны на ВЭФ-2022. URL: <https://roscongress.org/materials/o-reaktsii-kitayskoy-storony-na-vef-2022/> (дата обращения: 15.02.2024).
4. Псеровская Е. Д., Грешенштейн А. П. Расположение городского распределительного центра: научно-методологический подход // Вестник РГУПС. 2021. № 3 (83). С. 131–140. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_131.
5. Копылова О. А., Рахмангулов А. Н. Применение метода системной динамики для исследования факторов размещения элементов транспортно-логистической инфраструктуры // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. Т. 2. № 1. С. 92–97. ISSN 2222-9396.
6. Видовский Л. А., Литовка Н. В. Методология оптимального размещения объектов торговой сети // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 154. С. 104–118. DOI: 10.21515/1990-4665-154-011.
7. Бардаль А. Б., Сигитова М. А. Методика определения расположения логистических центров (на примере Дальнего Востока России) // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2019. № 3 (54). С. 91–98. ISSN 1996-3440.
8. Кашбразиев Р. В., Шихалев А. М. Модель многокритериальной оценки регионов по рациональному размещению логистических центров на территории РФ // Актуальные проблемы экономики и права. 2011. № 2. С. 66–72. ISSN 2782-2923.

References

1. Pokrovskaya O. D. Development of Russia's logistics transport system under sanctions. *Bulletin of scientific research result*. 2023. No. 3. Pp. 58–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-58-72. (In Russian).
2. Will the WEF be able to open a window of opportunity for us in China? URL: <https://roscongress.org/materials/smozhet-li-vef-otkryt-dlya-nas-okno-vozmozhnostey-v-kitae/> (access date: 15.02.2024). (In Russian).
3. On the reaction of the Chinese side to the WEF-2022. URL: <https://roscongress.org/materials/o-reaktsii-kitayskoy-storony-na-vef-2022/> (access date: 15.02.2024). (In Russian).
4. Pserovskaya E. D., Greshensteyn A. P. Location of the city distribution center: scientific and methodological approach. *Vestnik RGUPS*. 2021. No. 3 (83). Pp. 131–140. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_131. (In Russian).
5. Kopylova O. A., Rakhmangulov A. N. Application of the method of system dynamics for the study of factors of placement of elements of transport and logistics infrastructure. *Modern problems of Russian transport complex*. 2012. Vol. 2. No. 1. Pp. 92–97. ISSN 2222-9396. (In Russian).
6. Vidovskiy L. A., Litovka N. V. Methodology of optimal placement of trade network objects. *Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2019. No. 154. Pp. 104–118. DOI: 10.21515/1990-4665-154-011. (In Russian).
7. Bardal A. B., Sigitova M. A. Methodology for determining the location of logistics centers (on the example of the Far East of Russia). *Bulletin of PNU*. 2019. No. 3 (54). Pp. 91–98. ISSN 1996-3440. (In Russian).
8. Kashbraziev R. V., Shikhalev A. M. The model of multi-criterion evaluation of regions for the rational location of logistics centers on the territory of the Russian Federation. *Russian Journal of Economics and Law*. 2011. No. 2. Pp. 66–72. ISSN 2782-2923. (In Russian).

9. Вебер А. Теория размещения промышленности. Ленинград ; Москва : Книга, 1926. 223 с.
10. Апатцев В. И., Басыров И. М. Оценка факторов, влияющих на выбор оптимального месторасположения объектов логистической инфраструктуры // Наука и техника транспорта. 2017. № 1. С. 33–37. ISSN 2074-9325.
11. Изтелеуова М. С., Изтелеуова М. Б. Метод совершенствования транспортно-логистической инфраструктуры как основы развития международного сотрудничества // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2022. № 3 (122). С. 144–153. DOI: 10.52167/1609-1817-2022-122-3-144-153.
12. Дамбаева Н. П. Развитие экономического потенциала приграничного региона : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Улан-Удэ, 2021. 24 с.
13. Возможности создания транспортно-логистического кластера в Омской области / Г. Г. Левкин, С. В. Мочалова, Р. М. Мухамедеева [и др.] // Логистические системы в глобальной экономике. 2021. № 11. С. 213–217.
14. Конфигурирование терминально-складской инфраструктуры транспортного узла на основе развития метода экономико-географического разграничения грузопотоков / О. Н. Числов, В. А. Богачев, В. В. Трапенов [и др.] // Известия ПГУПС. 2022. Т. 19. № 4. С. 800–811. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811.
15. Король Р. Г., Подолинная С. Д. Терминально-логистическое взаимодействие при проектировании трансграничной инфраструктуры // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-1 (84). С. 131–139. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-131-139.
16. Ступникова А. В., Заостровских Е. А. Регионы Дальнего Востока России, не имеющие выхода к морю: возможности и проблемы // Россия и Китай: вектор развития : материалы международной научно-практической конференции. Благовещенск, 2019. Т. 1. С. 21–24. DOI: 10.22250/RC.2019.1.8.
17. Сурков А. А. Применение метода попарных сравнений при объединении экономических прогнозов // Учет. Анализ. Аудит. 2019. Т. 6. № 3. С. 32–42. DOI: 10.26794/2408-9303-2019-6-3-32-42.
18. Терстоун Л. Психофизиологический анализ. Проблемы и методы психофизики. Москва : Изд-во МГУ, 1984. 296 с.
19. Булдакова Т. И., Миков Д. А. Обеспечение согласованности и адекватности оценки факторов риска информационной безопасности // Вопросы кибербезопасности. 2017. № 3 (21). С. 8–15. DOI: 10.21581/2311-3456-2017-3-8-15.
20. Пугачев И. Н., Король Р. Г., Нестерова Н. С. Развитие транспортно-логистического комплекса Дальневосточного региона России // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2022. № 4 (33). С. 25–34. ISSN 2415-8658.
9. Weber A. Theory of industrial placement. Leningrad ; Moscow : Book, 1926. 223 p. (In Russian).
10. Apattsev V. I., Basyrov I. M. Assessment of factors influencing the choice of the optimal location of logistics infrastructure facilities. *Science and technology of transport*. 2017. No. 1. Pp. 33–37. ISSN 2074-9325. (In Russian).
11. Izteleuova M. S., Izteleuova M. B. Method for improving transport and logistics infrastructure as a basis for the development of international cooperation. *Bulletin of the KazATC*. 2022. No. 3 (122). Pp. 144–153. DOI: 10.52167/1609-1817-2022-122-3-144-153. (In Russian).
12. Dambaeva N. P. Development of the economic potential of the border region : Synopsis of PhD in Economics Thesis. Ulan-Ude, 2021. 24 p. (In Russian).
13. Levkin G. G., Mochalova S. V., Mukhamadeeva R. M. [et al.]. Possibilities of creating a transportation and logistics cluster in Omsk region. *Logistics systems in the global economy*. 2021. No. 11. Pp. 213–217. (In Russian).
14. Chislov O. N., Bogachev V. A., Trapenov V. V. [et al.]. Configuring terminal-warehouse infrastructure of transport hub basing on the development of method of economic-geographical differentiation of cargo flows. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022. Vol. 19. No. 4. Pp. 800–811. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-800-811. (In Russian).
15. Korol R. G., Podolinnaya S. D. Terminal and logistics interaction in the design of cross-border infrastructure. *World of transport and technological machines*. 2024. No. 1-1 (84). Pp. 131–139. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-1-1(84)-131-139. (In Russian).
16. Stupnikova A. V., Zaostrovskikh E. A. Landlocked regions of the Russian Far East: opportunities and challenges. *Russia and China: a vector of development* : proceedings of International scientific and practical conference. 2019. Vol. 1. Pp. 21–24. DOI: 10.22250/RC.2019.1.8. (In Russian).
17. Surkov A. A. Application of the method of pairwise comparisons when combining economic forecasts. *Accounting. Analysis. Audit*. 2019. Vol. 6. No. 3. Pp. 32–42. DOI: 10.26794/2408-9303-2019-6-3-32-42. (In Russian).
18. Thurstone L. Psychophysiological analysis. Problems and methods of psychophysics. Moscow : Publishing House of MSU, 1984. 296 p. (In Russian).
19. Buldskova T. I., Mikov D. A. Ensuring the concordance and the adequacy of information security risk factors assessment. *Cybersecurity issues*. 2017. No. 3 (21). Pp. 8–15. DOI: 10.21581/2311-3456-2017-3-8-15. (In Russian).
20. Pugachev I. N., Korol R. G., Nesterova N. S. Development of transport and logistics complex of the Far Eastern regions of Russia. *Transport of the Asia-Pacific region*. 2022. No. 4 (33). Pp. 25–34. ISSN 2415-8658. (In Russian).

Объем статьи 0,77 авторских листа

Научная статья
УДК 625.1

Исследование вертикальной жесткости рельсовых креплений при переменных значениях жесткостей прокладок

Алексей Алексеевич Локтев¹, Вадим Вадимович Королев¹, Ирина Викторовна Шишкина¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Investigation of vertical stiffness rail fasteners with variable values of gasket stiffness

Alexey A. Loktev¹, Vadim V. Korolev¹, Irina V. Shishkina¹

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

Вертикальная жесткость креплений определяется множеством факторов, среди которых состояние и характеристики прокладок выступают одними из наиболее значимых. Несмотря на очевидную роль жесткости прокладок в обеспечении нужной вертикальной жесткости рельсовых креплений, на практике определить универсальные значения жесткости, оптимальные для всех условий эксплуатации, не представляется возможным. Это обусловлено значительным количеством переменных, влияющих на дееспособность рельсового пути, включая тип и состояние рельсового полотна, климатические условия, виды и интенсивность движения поездов.

Различия в жесткостях прокладок влияют на распределение нагрузок в рельсовом креплении. Прокладки с высокой жесткостью обеспечивают более равномерное распределение нагрузки между элементами крепления, снижая, таким образом, риск локальных перегрузок и деформаций. Использование прокладок с менее жесткими характеристиками может быть предпочтительным в условиях, требующих лучшей амортизации и гашения вибраций, проходящих через рельсовое крепление во время движения поездов. Оптимальный выбор жесткости прокладок должен учитывать специфику участка железнодорожного полотна, включая тип рельсового крепления, ожидаемые нагрузки, а также климатические и эксплуатационные условия.

Ключевые слова: рельс, крепление, железобетонная шпала, жесткость, железнодорожный путь

Abstract

Vertical stiffness of fasteners is determined by many factors, among which condition and characteristics of the gaskets are among the most significant. Despite the obvious role of the stiffness of the gaskets in ensuring the necessary vertical stiffness of the rail fasteners, in practice it is not possible to determine universal stiffness values that are optimal for all operating conditions. This is due to a significant number of variables affecting the capacity of the track, including the type and condition of the trackbed, climatic conditions, types and intensity of train traffic.

Differences in the stiffness of the gaskets affect the load distribution in the rail bond. High-rigidity gaskets provide a more uniform load distribution between the fastening elements, thus reducing the risk of local overloads and deformations. The use of gaskets with less rigid characteristics may be preferable in conditions requiring better cushioning and damping of vibrations passing through the rail fastener during train movement. The optimal choice of gasket stiffness should take into account the specifics of the railway section, including the type of rail fastening, expected loads, as well as climatic and operational conditions.

Keywords: rail, fastening, reinforced concrete sleeper, stiffness, railway track

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-76-81

При использовании железобетонных шпал узел промежуточного рельсового крепления выполняет дополнительную функцию — он действует как упругий амортизатор, который поглощает динамическое воздействие от колес подвижного состава [1]. Для этого подложка из упругого материала (часто из резины) устанавливается под подошву рельса.

В процессе сборки узла крепления, когда происходит клеммное нажатие $P_{к.о.}$, упругая прокладка подвергается первичной деформации $u_{о.к.}$. Под воздействием дополнительного постепенно возрастающего давления от колесной нагрузки на рельсы идет дальнейшая деформация прокладки, которая сопровождается уменьшением клеммного нажатия [2, 3]. Следовательно, эффективный узел рельсового крепления должен обеспечивать заданную упругость и одновременно сохранять необходимое клеммное давление.

Перед проектированием обычно известны параметры упругих прокладок и клемм, начальное требуемое клеммное нажатие, а также величина колесной нагрузки, передаваемой через рельсы на узел крепления.

Однако для успешного проектирования узла крепления необходимо учитывать:

зависимости между жесткостью прокладок $C_{пр}$, жесткостью клемм $C_{к}$ и общей жесткостью узла крепления $C_{у}$; влияние соотношения жесткостей $C_{п}$ и $C_{к}$ на допустимую нагрузку от колеса на подкладку $P_{кол}$;

изменение клеммного нажатия в процессе эксплуатации узла крепления под воздействием вертикальных сил [4].

Поэтому после установления этих зависимостей при переменных и постоянных значениях $C_{п}$ и $C_{к}$ авторами статьи была исследована вертикальная жесткость узла промежуточного рельсового крепления, имеющего параметры, типичные для креплений массового производства.

Вывод уравнения для исследования вертикальной жесткости узла промежуточного рельсового крепления $P_{кол} = f(y)$. Зависимости между силой P , прилага-

емой к упругой прокладке (или клемме), и деформацией этих элементов y

$$P_{\Pi} = F(y); \quad (1)$$

$$P_{\kappa} = f(y) \quad (2)$$

являются нелинейными (рис. 1). Обычно зависимости (1) и (2) получают в результате обработки материалов экспериментов [5, 6].

Жесткость прокладок C_{Π} или клемм C_{κ} — величина переменная и представляет собой тангенс угла касательной к кривой:

$$C_{\Pi} = \frac{dF(y)}{dy}; \quad (3)$$

$$C_{\kappa} = \frac{f(y)}{dy}. \quad (4)$$

С достаточной для практических целей точностью зависимости (1) и (2) могут быть представлены в параболическом виде, тогда:

$$C_{\Pi} = C_{\Pi}^H + \kappa_{\Pi} y; \quad (5)$$

$$C_{\kappa} = C_{\kappa}^H + \kappa_{\kappa} y; \quad (6)$$

где C_{Π} и C_{κ} — жесткости соответственно прокладки и клеммы; C_{Π}^H и C_{κ}^H — то же в начальный момент загрузки при $y = 0$; κ_{κ} и κ_{Π} — постоянные коэффициенты, характеризующие возрастание жесткости при загрузке.

При принятых условиях выражения (1) и (2) могут быть получены в следующем виде:

$$P_{\Pi} = \frac{\kappa_{\Pi}}{2} y^2 + C_{\Pi}^H y; \quad (1a)$$

$$P_{\kappa} = \frac{\kappa_{\kappa}}{2} y^2 + C_{\kappa}^H y. \quad (2a)$$

Узел рельсового крепления в данном случае может быть представлен в виде трех пружин (рис. 2) [7, 8]: одна находится под рельсом (упругая прокладка), а две обжимают рельс сверху (клеммное нажатие). Обозначим величину начального перемещения (деформации) верхних пружин $y_{0,\kappa}$, нижней пружины $y_{0,\Pi}$, силы, необходимой для начального обжатия клемм, $P_{\kappa,0}$ и прокладок $P_{\Pi,0}$. В соответствии с (1a) и (2a):

$$P_{\Pi,0} = \frac{\kappa_{\Pi}}{2} y_{0,\Pi}^2 + C_{\Pi}^H y_{0,\Pi}; \quad (1б)$$

$$P_{\kappa,0} = \frac{\kappa_{\kappa}}{2} y_{0,\kappa}^2 + C_{\kappa}^H y_{0,\kappa}. \quad (2б)$$

После приложения силы $P_{\text{кол}}$ произойдет дальнейшее сжатие нижней пружины (прокладки) на величину y , и ее общая деформация будет $y_{0,\Pi} + y$ (см. рис. 1б). Одновременно уменьшится сжатие верхних пружин (клемм) на ту же величину y , и общая деформация верхних пружин будет равной $y_{0,\kappa} - y$ (см. рис. 1а). Заметим, что исследуемая система работоспособна, если

$$y \leq y_{0,\kappa}. \quad (7)$$

В момент, когда

$$y = y_{0,\kappa} \quad (7a)$$

происходит «размыкание» упругой системы, и ее сопротивляемость при дальнейшем возрастании силы $P_{\text{кол}}$ будет определяться жесткостью только нижней пружины.

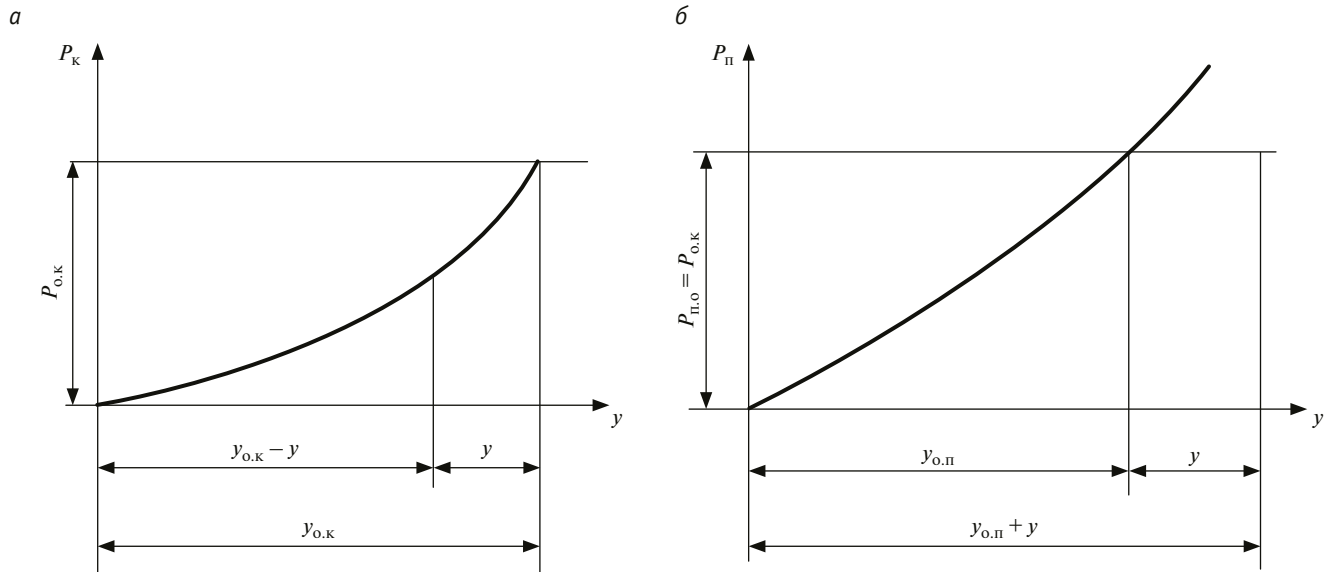


Рис. 1. Общий вид зависимостей между силой нажатия клемм P_{κ} и их деформацией y и между силой, прикладываемой к упругой прокладке P_{Π} , и деформацией последней y

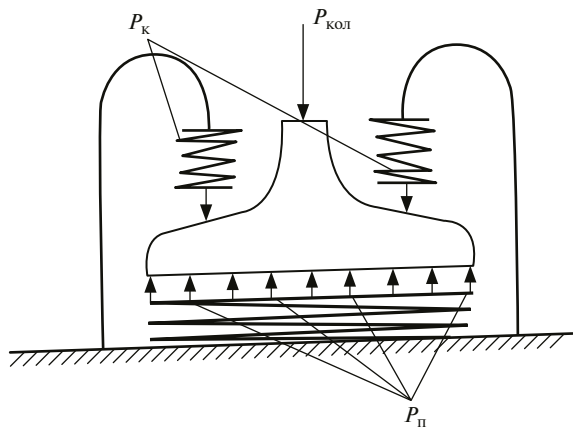


Рис. 2. Схема действия вертикальных сил на узел рельсового скрепления

В соответствии с вышеизложенным после приложения силы $P_{\text{кол}}$ равновесие системы будет определяться уравнением

$$P_{\text{кол}} + \int_0^{y_{0,к}} C_k dy = \int_0^{y_{0,п} + y} C_p dy. \quad (8)$$

После подстановки вместо C_p и C_k их значений в соответствии с (5) и (6) и преобразования получим

$$P_{\text{кол}} = \int_0^{y_{0,п} + y} (C_p^H + \kappa_p y) dy - \int_0^{y_{0,к}} (C_k^H + \kappa_k y) dy, \quad (8a)$$

а после интегрирования и преобразования

$$P_{\text{кол}} = \frac{\kappa_p - \kappa_k}{2} y^2 + (C_p^H + \kappa_p y_{0,п} + C_k^H + \kappa_k y_{0,к}) y + \left(\frac{\kappa_p}{2} y_{0,п}^2 + C_p^H y_{0,п} \right) - \left(\frac{\kappa_k}{2} y_{0,к}^2 + C_k^H y_{0,к} \right). \quad (9)$$

Согласно формулам (16) и (26), последние два выражения в скобках уравнения (9) представляют собой соответственно $P_{п,о}$ и $P_{к,о}$, которые равны между собой и, следовательно, взаимно уничтожаются. Таким образом, уравнение (9) может быть записано в следующем виде:

$$P_{\text{кол}} = Ay^2 + By, \quad (10)$$

где

$$A = \frac{\kappa_p - \kappa_k}{2}; \quad (11)$$

$$B = C_p^H + \kappa_p y_{0,п} + C_k^H + \kappa_k y_{0,к}. \quad (12)$$

Установление границы «размыкания» упругой системы [9, 10]. Уравнение (10) определяет работу системы до момента ее «размыкания», при котором $y = y_{0,к}$. Чтобы определить величину силы $P_{\text{кол}}$, при которой происходит «размыкание» системы (обозначим ее $\max P_{\text{кол}}$), нужно подставить в уравнение (8a) вместо y величину $y_{0,к}$. Тогда второй интеграл правой части уравнения превращается в нуль, и $\max P_{\text{кол}}$ рассчитывается так:

$$\begin{aligned} \max P_{\text{кол}} &= \int_0^{y_{0,п} + y_{0,к}} (C_p^H + \kappa_p y) dy = \\ &= C_p^H (y_{0,п} + y_{0,к}) + \frac{\kappa_p}{2} (y_{0,п} + y_{0,к})^2. \end{aligned} \quad (10a)$$

При $P_{\text{кол}} > \max P_{\text{кол}}$ верхние пружины (клеммы) на работу системы не влияют, и дальнейшее нарастание силы $P_{\text{кол}}$ определяется выражением (1a).

Исследование уравнения $P_{\text{кол}} = \varphi(y)$ [11, 12]. В уравнении (10) коэффициент B — величина всегда положительная, коэффициент A зависит от соотношения параметров, определяющих интенсивность нарастания жесткости прокладок и клемм при их деформации, т.е. от величин κ_p и κ_k . Если $\kappa_p > \kappa_k$, то

$$P_{\text{кол}} = Ay^2 + By.$$

Исследование последнего уравнения показывает, что при $P_{\text{кол}} = 0$:

$$Ay^2 + By = 0;$$

$$y(Ay + B) = 0;$$

$$y_1 = 0;$$

$$y_2 = -\frac{B}{A}.$$

Первая производная от $P_{\text{кол}}$ равна

$$P'_{\text{кол}} = 2Ay + B. \quad (13)$$

Приравняв $P'_{\text{кол}}$ нулю, получаем координату y вершины параболы:

$$Ay + B = 0;$$

$$y = -\frac{B}{2A}.$$

Другая координата равна

$$P_{\text{кол}} = A \left(-\frac{B}{2A} \right)^2 + B \left(-\frac{B}{2A} \right) = -\frac{B^2}{4A}.$$

Жесткость в начале координат (т.е. в момент начала приложения силы $P_{\text{кол}}$) станет равна [13]

$$\left| \frac{dP}{dy} \right|_{y=0} = |2Ay + B|_{y=0} = B. \quad (13a)$$

В соответствии с (12) при $y = 0$ величина B будет

$$B = C_p^H + C_k^H. \quad (14)$$

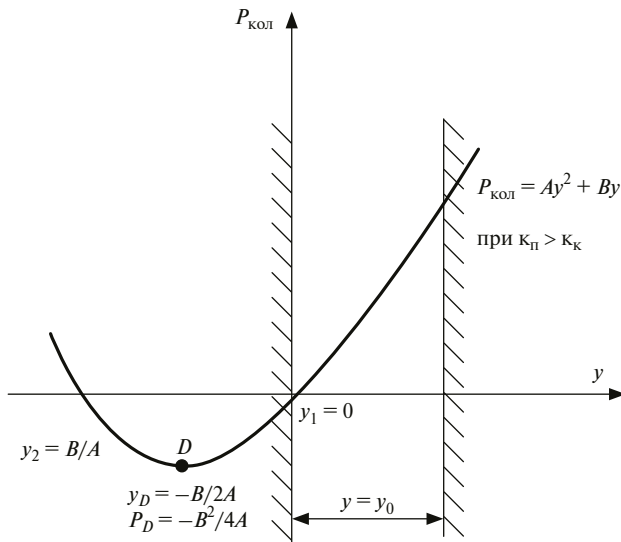


Рис. 3. Зависимость $P_{\text{кол}} = \varphi(y)$ при параметрах жесткости упругой прокладки ($\kappa_{\text{п}}$), более высоких, чем у клемм ($\kappa_{\text{к}}$)

Общий вид зависимости (10) при $\kappa_{\text{п}} > \kappa_{\text{к}}$ представлен на рис. 3. Однако применительно к работе узла крепления интересна только часть этой кривой, расположенная в интервале

$$0 < y \leq y_0, \quad (15)$$

так как в соответствии с (7) при $y = y_0$ происходит «размыкание» упругой системы (см. рис. 3).

Если $\kappa_{\text{п}} = \kappa_{\text{к}}$, то в соответствии с (11) $A = \frac{\kappa_{\text{п}} - \kappa_{\text{к}}}{2} = 0$, и уравнение (10) получает вид

$$P_{\text{кол}} = By, \quad (10б)$$

т. е. это будет уравнение прямой.

Жесткость такой системы до момента «размыкания» определяется параметром B :

$$C_y = B. \quad (13б)$$

Если в рассматриваемой системе нарастание жесткости у клемм происходит быстрее, чем у прокладки, т.е. в случае $\kappa_{\text{к}} > \kappa_{\text{п}}$, величина A имеет отрицательное значение, а уравнение (10) получает вид

$$P_{\text{кол}} = -Ay^2 + By. \quad (10в)$$

В соответствии с (10) и (13) при отрицательном значении A и при $P_{\text{кол}} = 0$:

$$y(-Ay + B) = 0;$$

$$y_1 = 0;$$

$$y_2 = \frac{B}{A}.$$

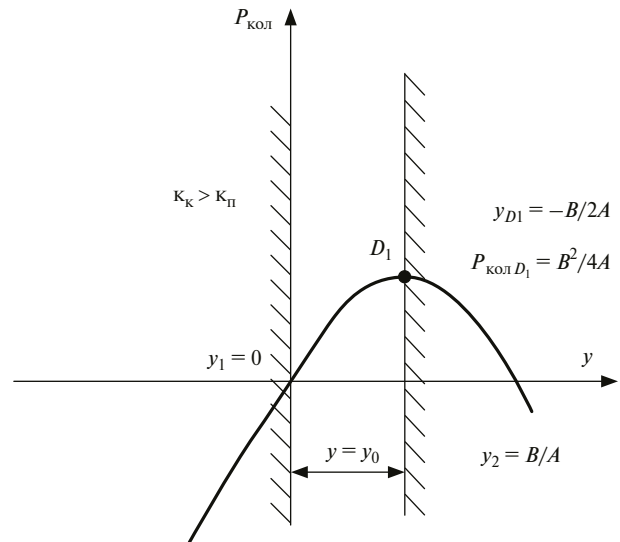


Рис. 4. Зависимость $P_{\text{кол}} = \varphi(y)$ при параметрах жесткости упругой прокладки ($\kappa_{\text{п}}$), меньших, чем у клемм ($\kappa_{\text{к}}$)

Координаты вершины параболы (точка D_1) примут вид:

$$y_{D1} = \frac{B}{2A};$$

$$P_{\text{кол} D1} = \frac{B^2}{4A},$$

а кривая — вид, изображенный на рис. 4.

В соответствии с вышеизложенным для исследования работы узла крепления до момента «размыкания» системы можно использовать ветвь параболы, расположенную в интервале от $y = 0$ до $y = y_0$ [14].

Исследование работы узла крепления при различных соотношениях $\kappa_{\text{п}}$ и $\kappa_{\text{к}}$.

Первый случай: $\kappa_{\text{п}} > \kappa_{\text{к}}$. От начала координат до $y = y_0$ зависимость $P_{\text{кол}} = \varphi(y)$ определяется выражением (10) при положительных значениях A и B , а после «размыкания» системы — только сопротивляемостью прокладки сжатию без какого-либо влияния клемм, т.е. выражением (1а). Жесткость узла крепления C_y до значения $y = y_0$ в соответствии с (13):

$$C_y = 2Ay + B.$$

После «размыкания» системы жесткость узла крепления при $y \geq y_0$ определяется только жесткостью прокладки в соответствии с выражением (5).

Второй случай: $\kappa_{\text{п}} = \kappa_{\text{к}}$ при этом $A = 0$. Соответственно при $y \leq y_0$ имеем

$$P_{\text{кол}} = By.$$

После «размыкания» системы (при $y \geq y_0$) сопротивляемость узла крепления определяется только сопротивляемостью прокладки сжатию без какого-либо влияния клемм, т.е. выражением (5).

Жесткость узла крепления C_y при $y \leq y_0$:

$$C_y = B.$$

При $y > y_0$, как и в предыдущем случае, жесткость узла крепления определяется только жесткостью прокладки C_{Π} .

Третий случай: $\kappa_{\Pi} < \kappa_K$, при этом A имеет отрицательное значение. При $y \leq y_0$:

$$P_{\text{кол}} = By - Ay^2.$$

При $y > y_0$ величина $P_{\text{кол}}$ определяется выражением (1а). Жесткость узла крепления C_y при $y \leq y_0$ будет равна

$$C_y = B - 2Ay.$$

При $y > y_0$ жесткость узла определяется выражением (5).

Для всех трех случаев графики изменения силы $P_{\text{кол}}$ и жесткости узла C_y в зависимости от деформации системы представлены на рис. 5 и 6. Точки E_1 , E_2 и E_3 на этих кривых обозначают места «размыкания» упругой системы.

Таким образом, как показало исследование, прокладки с высокой жесткостью обеспечивают более равномерное распределение нагрузки между элементами крепления, снижая, таким образом, риск локальных перегрузок и деформаций.

Использование прокладок с менее жесткими характеристиками может быть предпочтительным в условиях, которые требуют лучшей амортизации и гашения вибраций, проходящих через рельсовое крепление во время движения поездов. Это способствует повышению комфорта пассажиров и снижению износа рельсов и подвижного состава.

Оптимальный выбор жесткости прокладок должен учитывать специфику участка железнодорожного полотна, включая тип рельсового крепления, ожидаемые нагрузки, а также климатические и эксплуатационные условия. Системный подход к выбору компонентов рельсового крепления позволяет достигнуть наилучшего соотношения между надежностью, долговечностью и экономической эффективностью.

Сведения об авторах:

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

Вадим Вадимович Королев,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное
строительство» Российского университета транспорта (МИИТ)

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

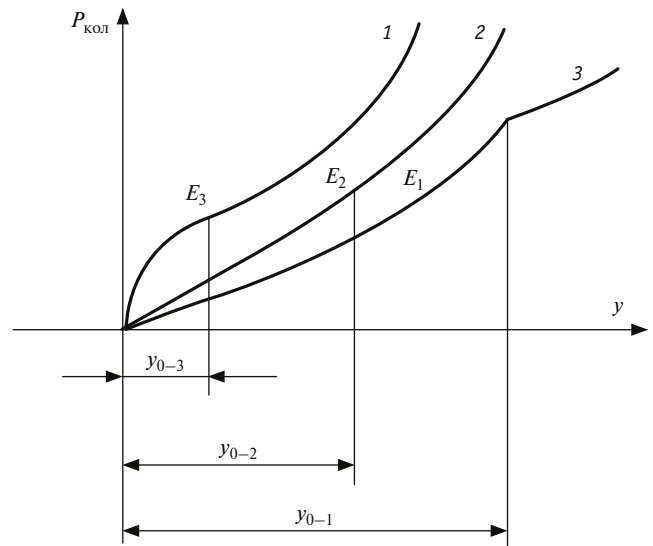


Рис. 5. Зависимость между давлением колеса на узел крепления $P_{\text{кол}}$ и деформацией последнего y при $\kappa_{\Pi} < \kappa_K$ (1), $\kappa_{\Pi} = \kappa_K$ (2) и $\kappa_{\Pi} > \kappa_K$ (3)

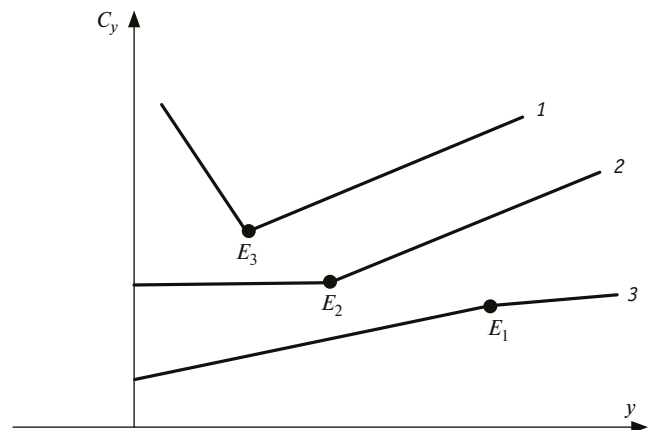


Рис. 6. Зависимость между жесткостью узла крепления C_y и его упругой деформацией y при $\kappa_{\Pi} < \kappa_K$ (1), $\kappa_{\Pi} = \kappa_K$ (2) и $\kappa_{\Pi} > \kappa_K$ (3)

Authors information:

Alexey A. Loktev,
DSc in Physics and Mathematics, Professor,
Head of Transport Construction Department,
Russian University of Transport (MIIT)

Vadim V. Korolev,
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transport
Construction Department, Russian University of Transport (MIIT)

Irina V. Shishkina,
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transport
Construction Department, Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Влияние напряжений в рельсе железнодорожного пути на волновые процессы от воздействия на него колеса // Наука и техника транспорта. 2023. № 4. С. 48–53. ISSN 2074-9325.
2. Принципы определения необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61.
3. Метод расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, А. В. Савин [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 46–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-46-52.
4. Локтев А. А., Сычев В. П. Прогнозирование развития отступлений от норм содержания рельсовой колеи до неисправности, влияющей на перевозочный процесс // Наука и техника транспорта. 2018. № 4. С. 17–26. ISSN 2074-9325.
5. Особенности динамического контакта колеса и рельса при высокоскоростном движении / А. Я. Коган, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.] // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 19–24 августа 2019 г. : сборник трудов. Уфа : Башкирский государственный университет, 2019. Т. 3. С. 119–121.
6. Локтев Д. А., Локтев А. А. Метод определения динамических параметров транспортных средств в автоматизированной системе мониторинга и измерений // Динамика сложных систем — XXI век. 2018. Т. 12. № 3. С. 34–39. DOI: 10.18127/j19997493-201803-05.
7. Потапов А. В., Сычева А. В., Локтев А. А. К вопросу о влиянии подуклонки рельсов на величину непогашенного ускорения // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2021. Т. 17. № 17. С. 92–98.
8. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Моделирование работы бесстыкового пути по критерию обеспечения его устойчивости // Наука и техника транспорта. 2021. № 2. С. 57–62. ISSN 2074-9325.
9. Сычева А. В., Локтев А. А., Сычев В. П. Формирование участка пути регулируемой жесткости // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 11–13. ISSN 0033-4715.
10. Локтев А. А., Гридасова Е. А., Королев В. В. Определение остаточных напряжений в старогодных рельсах // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 3. С. 30–33. ISSN 0033-4715.
11. Влияние высокочастотных вибраций в системе «колесо — рельс» на структуру рельсовой стали М76 / Е. А. Гридасова, А. А. Локтев, П. А. Никифоров, К. Ю. Тальских // Наука и техника транспорта. 2019. № 2. С. 40–46. ISSN 2074-9325.
12. Исследование микроструктуры рельсовой стали при высокочастотных динамических воздействиях / А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 5. С. 11–15. ISSN 0033-4715.
13. Расчет высокочастотных вибраций железнодорожного пути под подвижным составом при скоростях 200–250 км/час / А. Ю. Абдурашитов, А. А. Локтев, А. В. Сычева, П. В. Сычев // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6 (72). С. 22–28. ISSN 1997-0722.
14. Локтев А. А., Тальских К. Ю. Воздействие на объекты транспортной инфраструктуры высокочастотных вибраций и возможности их демпфирования // Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования : материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции, Елец, 25 апреля 2018 г. Елец : Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2018. С. 49–55.

References

1. Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev V. P. Impact of Stresses in Track Rail on Wave Processes from Wheel Impact on it. *Science and technology in transport*. 2023. No. 4. Pp. 48–53. ISSN 2074-9325. (In Russian).
2. Glyuzberg B. E., Loktev A. A., Korolev V. V. [et al.]. Principles of determination of required railway track strength with the consideration for intensity of its use. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61. (In Russian).
3. Glyuzberg B. E., Loktev A. A., Savin A. V. [et al.]. Method for calculation of required strength of railway track with the consideration for intensity of its use. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 46–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-46-52. (In Russian).
4. Loktev A. A., Sychev V. P. Forecasting the development of deviations from the standards of maintenance of the rail track to a malfunction affecting the transportation process. *Science and technology in transport*. 2018. No. 4. Pp. 17–26. ISSN 2074-9325. (In Russian).
5. Kogan A. Ya., Korolev V. V., Loktev A. A. [et al.]. Features of dynamic wheel-rail contact during high-speed movement : proceedings of the 12th All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics, Ufa, August 19–24, 2019. Ufa : Bashkir State University, 2019. Vol. 3. Pp. 119–121. (In Russian).
6. Loktev D. A., Loktev A. A. Method for determining the dynamic parameters of vehicles in an automated monitoring and measurement system. *Dynamics of Complex Systems — XXI century*. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 34–39. DOI: 10.18127/j19997493-201803-05. (In Russian).
7. Potapov A. V., Sycheva A. V., Loktev A. A. On the effect of rail deflection on the magnitude of outstanding acceleration. *Introduction of modern structures and advanced technologies in the track economy*. 2021. Vol. 17. No. 17. Pp. 92–98. (In Russian).
8. Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev V. P. Modelling of the operation of long-welded rails according to ensuring its stability criterion. *Science and technology in transport*. 2021. No. 2. Pp. 57–62. ISSN 2074-9325. (In Russian).
9. Sycheva A. V., Loktev A. A., Sychev V. P. Formation of a section of the path of adjustable stiffness. *Railway Track and Facilities*. 2023. No. 10. Pp. 11–13. ISSN 0033-4715. (In Russian).
10. Loktev A. A., Gridasova E. A., Korolev V. V. Determination of residual stresses in old rails. *Railway Track and Facilities*. 2020. No. 3. Pp. 30–33. ISSN 0033-4715. (In Russian).
11. Gridasova E. A., Loktev A. A., Nikiforov P. A., Talskikh K. Yu. The effect of high-frequency vibrations in the wheel — rail system on the structure of M76 rail steel. *Science and technology in transport*. 2019. No. 2. Pp. 40–46. ISSN 2074-9325. (In Russian).
12. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. [et al.]. Investigation of the microstructure of rail steel under high-frequency dynamic influences. *Railway Track and Facilities*. 2019. No. 5. Pp. 11–15. ISSN 0033-4715. (In Russian).
13. Abdurashitov A. Iu., Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev V. P. Calculation of the high-frequency vibrations of the railway track under the impact of the rolling stock moving at speeds of 200–250 km/h. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2018. No. 6 (72). Pp. 22–28. ISSN 1997-0722. (In Russian).
14. Loktev A. A., Talskikh K. Yu. Impact of high-frequency vibrations on transport infrastructure facilities and the possibility of their damping. *Control systems, technical systems: stability, stabilization, ways and methods of research* : proceedings of the 4th International scientific and practical conference, Yelets, April 25, 2018. Yelets : Yelets State University named after I. A. Bunin, 2018. Pp. 49–55. (In Russian).

Научная статья

УДК 625.1

Исследование вертикальной жесткости рельсовых креплений при постоянных значениях жесткостей прокладок

Алексей Алексеевич Локтев¹, Вадим Вадимович Королев¹, Ирина Викторовна Шишкина¹

¹Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

Investigation of vertical stiffness rail fasteners at constant values of gasket stiffness

Alexey A. Loktev¹, Vadim V. Korolev¹, Irina V. Shishkina¹

¹Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Аннотация

Представленное в статье исследование посвящено анализу жесткости рельсовых креплений при постоянных значениях жесткости прокладок, что позволяет предложить новые подходы к повышению эффективности функционирования железнодорожного полотна. Установлено влияние постоянных значений жесткости прокладок на общую систему жесткости пути.

Значение исследования вертикальной жесткости рельсовых креплений при постоянных значениях жесткостей прокладок заключается в возможности прогнозировать изменения в работе рельсового пути под воздействием различных факторов и в создании более точных математических моделей для расчета долговечности и надежности железнодорожных путей на основе реальных эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: рельс, крепление, железобетонная шпала, жесткость, железнодорожный путь

Abstract

Research presented in the article is devoted to the analysis of the rigidity of rail fasteners at constant values of the stiffness of the gaskets, which allows us to propose new approaches to improving the efficiency of the railway track. The influence of constant values of the stiffness of the gaskets on the overall system of stiffness of the track has been established.

The importance of studying the vertical stiffness of rail fasteners at constant values of gasket stiffness is the ability to predict changes in the operation of the rail track under the influence of various factors and to create more accurate mathematical models for calculating the durability and reliability of railway tracks based on real operational characteristics.

Keywords: rail, fastening, reinforced concrete sleeper, stiffness, railway track

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-82-87

Вопросы, связанные с увеличением сроков службы железнодорожного пути и повышением надежности его конструктивных элементов, занимают важное место в научной работе. Один из ключевых аспектов, влияющих на эти показатели, — вертикальная жесткость рельсовых креплений.

С вертикальной жесткостью рельсовых креплений непосредственно связана способность рельсовой колеи адаптироваться к переменным нагрузкам, возникающим вследствие движения подвижного состава. Исследование базируется на анализе статических и динамических нагрузок, воздействующих на элементы рельсового крепления, при различных условиях эксплуатации.

В ряде случаев при испытаниях клемм и прокладок зависимости между силой и деформацией на расчетном интервале получаются близкими к линейным [1]. В этих условиях после аппроксимации пологих кривых прямыми с постоянными значениями C_{Π} и C_K представляется возможным характеризовать жесткость упругих клемм и прокладок, а также узла крепления в целом определенными числовыми показателями.

Установление расчетных зависимостей. Зависимости $P_{\text{кол}} = \varphi(y)$ и $C_y = \psi(C_{\Pi}, C_K)$ могут быть получены как частный случай задачи. Кроме того, в связи с достаточной простотой поставленных условий они также могут быть получены и непосредственно [2]:

$$P_{\text{кол}} + P_{\text{к.о}} - C_K y = P_{\text{п.о}} + C_{\Pi} y, \quad (1)$$

где $P_{\text{кол}}$ — давление колеса; y — деформация после приложения силы $P_{\text{кол}}$.

Так как по условию задачи $P_{\text{к.о}} = P_{\text{п.о}}$ то уравнение (1) после преобразования приобретает вид:

$$P_{\text{кол}} = y(C_{\Pi} + C_K); \quad (1a)$$

$$y = \frac{P_{\text{кол}}}{(C_{\Pi} + C_K)}. \quad (1б)$$

Жесткость узла по условию задачи определяется отношением приращения силы $P_{\text{кол}}$ к перемещению системы y , поэтому при линейных зависимостях [3, 4]

$$C_y = \frac{P_{\text{кол}}}{y} = C_{\text{п}} + C_{\text{к}}, \quad (2)$$

т. е. жесткость узла в данном случае до момента «размыкания» системы определяется суммой жесткостей прокладки и клеммы.

Действительно, если $C_{\text{п}} = C_{\text{п}}^H + \kappa_{\text{п}}y$, а $C_{\text{к}} = C_{\text{к}}^H + \kappa_{\text{к}}y$, то в соответствии с выражением

$$P_{\text{кол}} = \frac{\kappa_{\text{п}} - \kappa_{\text{к}}}{2} y^2 + (C_{\text{п}}^H + \kappa_{\text{п}}y_{\text{о.п}} + C_{\text{к}}^H + \kappa_{\text{к}}y_{\text{о.к}})y + \left(\frac{\kappa_{\text{п}}}{2} y_{\text{о.п}}^2 + C_{\text{п}}^H y_{\text{о.п}} \right) - \left(\frac{\kappa_{\text{к}}}{2} y_{\text{о.к}}^2 + C_{\text{к}}^H y_{\text{о.к}} \right) \quad (3)$$

получим

$$P_{\text{кол}} = \frac{\kappa_{\text{п}} - \kappa_{\text{к}}}{2} y^2 + (C_{\text{п}}^H + C_{\text{к}}^H + \kappa_{\text{п}}y_{\text{о.п}} + \kappa_{\text{к}}y_{\text{о.к}})y. \quad (3a)$$

При отсутствии возрастания жесткости, т.е. тогда, когда $\kappa_{\text{п}} = 0$, $\kappa_{\text{к}} = 0$ и $C_{\text{п}} = C_{\text{п}}^H$, $C_{\text{к}} = C_{\text{к}}^H$, выражение (3a) принимает вид

$$P_{\text{кол}} = (C_{\text{п}} + C_{\text{к}})y,$$

т. е. превращается в формулу (1a).

Аналогично в соответствии с $P_{\text{кол}} = 2Ay + B$, где коэффициент B — величина всегда положительная, коэффициент A зависит от соотношения параметров, определяющих интенсивность нарастания жесткости прокладок и клемм при их деформации, т.е. от величин $\kappa_{\text{п}}$ и $\kappa_{\text{к}}$, тогда жесткость узла будет

$$C_y = 2Ay + B.$$

Если $\kappa_{\text{п}} = \kappa_{\text{к}} = 0$, то

$$A = \frac{\kappa_{\text{п}} - \kappa_{\text{к}}}{2} = 0; \quad B = C_{\text{п}}^H + C_{\text{к}}^H.$$

Тогда

$$C_y = C_{\text{п}} + C_{\text{к}},$$

т. е. получаем формулу (2).

Для анализа работы узла скрепления необходимо получить выражение, определяющее наибольшее значение колесной нагрузки, при которой наступает «размыкание» системы, $\max P_{\text{кол}}$. В общем случае [5]

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к.о}} - C_{\text{к}}y. \quad (4)$$

Подставляя в (4) выражение (1б), получим

$$P_{\text{к}} = P_{\text{к.о}} - \frac{C_{\text{к}}P_{\text{кол}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{к}}}. \quad (4a)$$

В тот момент, когда клеммное нажатие на рельс станет равным нулю, дальнейшая деформация прокладки приведет к «размыканию» системы.

Определим $\max P_{\text{кол}}$.

При $P_{\text{к}} = 0$

$$P_{\text{к.о}} - \frac{C_{\text{к}} \max P_{\text{кол}}}{C_{\text{п}} + C_{\text{к}}} = 0.$$

Отсюда

$$\max P_{\text{кол}} = \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{к}}}{C_{\text{к}}} P_{\text{к.о}}, \quad (5)$$

или

$$\max P_{\text{кол}} = \beta P_{\text{к.о}},$$

где

$$\beta = \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{к}}}{C_{\text{к}}}.$$

Как частный случай, когда $\kappa_{\text{п}} = 0$, выражение (5) может быть получено из формулы

$$\begin{aligned} \max P_{\text{кол}} &= \int_0^{y_{\text{о.п}} + y_{\text{о.к}}} (C_{\text{п}}^H + \kappa_{\text{п}}y) dy = \\ &= C_{\text{п}}^H (y_{\text{о.п}} + y_{\text{о.к}}) + \frac{\kappa_{\text{п}}}{2} (y_{\text{о.п}} + y_{\text{о.к}})^2. \end{aligned}$$

При $C_{\text{п}}^H = C_{\text{п}}$:

$$\begin{aligned} \max P_{\text{кол}} &= C_{\text{п}} (y_{\text{о.п}} + y_{\text{о.к}}) = C_{\text{п}} y_{\text{о.п}} + C_{\text{п}} y_{\text{о.к}} = \\ &= P_{\text{п.о}} + \frac{C_{\text{п}} y_{\text{о.к}} C_{\text{к}}}{C_{\text{к}}} = P_{\text{п.о}} + P_{\text{к.о}} \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{к}}}. \end{aligned}$$

Так как $P_{\text{п.о}} = P_{\text{к.о}}$, то

$$\max P_{\text{кол}} = P_{\text{к.о}} \frac{C_{\text{п}} + C_{\text{к}}}{C_{\text{к}}},$$

т. е. получаем формулу (5).

После прекращения давления клеммы на подошву рельса, что имеет место при $y = y_0$, влияние клеммы на формирование жесткости узла прекращается, и с этого момента величина C_y будет определяться только упругостью прокладки $C_{\text{п}}$ [6, 7].

Таким образом, при $y \leq y_0$

$$C_y = C_{\text{п}} + C_{\text{к}},$$

а после «размыкания» системы при $y > y_0$

$$C_y = C_{\text{п}}.$$

Однако при правильно запроектированных скреплениях не должно быть упругого «размыкания» [8, 9]. Следовательно, при всех уровнях загрузки необходимо выдерживать условие (5). Это требование является обязательным, но недостаточным. При наибольшем нагружении узла скрепления колесной нагрузкой $P_{\text{кол}}$ чтобы не допустить формирования продольных сил угона пути, клеммное нажатие должно быть

не ниже величины $P_{к.уг}$ устанавливаемой из условия исключения проскальзывания рельса по прокладке. Соответственно

$$\min P_{кол} > P_{к.уг}.$$

В наиболее распространенных конструкциях отношение $C_{п}$ к $C_{к}$ колеблется в пределах от 6 до 10.

Давление на упругий амортизатор $P_{п}$ не может быть меньше первоначального клеммного нажатия $P_{к.о}$ [10]. При постепенном возрастании колесной нагрузки $P_{кол}$ во всех случаях происходит добавочное сжатие прокладки на величину y , вследствие чего клеммное нажатие уменьшается.

Действительно, при постоянных значениях $C_{п}$ и $C_{к}$

$$P_{п} = P_{к.о} + yC_{п}.$$

Так как

$$y = \frac{P_{кол}}{C_{п} + C_{к}},$$

то

$$P_{п} = P_{к.о} + \frac{P_{кол} C_{п}}{C_{п} + C_{к}},$$

или после преобразования

$$P_{п} = P_{к.о} + \frac{P_{кол}}{1 + \frac{C_{к}}{C_{п}}}. \quad (6)$$

Таким образом, общее усилие на прокладку $P_{п}$ будет во всех случаях меньше суммарного значения колесной нагрузки $P_{кол}$ и начального нажатия клемм $P_{к.о}$, оно зависит от соотношения жесткостей клемм $C_{к}$ и прокладки $C_{п}$.

Значения $P_{п}$ для различных случаев соотношения величин $C_{к}$ и $C_{п}$ будут следующими:

При $C_{к} = 0,1C_{п}...$	$P_{п} = P_{к.о} + 0,91P_{кол}$
« $C_{к} = 0,25C_{п}...$	$P_{п} = P_{к.о} + 0,80P_{кол}$
« $C_{к} = 0,5C_{п}...$	$P_{п} = P_{к.о} + 0,66P_{кол}$
« $C_{к} = C_{п}...$	$P_{п} = P_{к.о} + 0,50P_{кол}$
« $C_{к} = 2C_{п}...$	$P_{п} = P_{к.о} + 0,33P_{кол}$

Таким образом, при очень жестких клеммах их влияние на работу упругой прокладки становится решающим.

Чем более жесткими будут клеммы, тем быстрее наступит упругое «размыкание» системы [11, 12]. На основании зависимости (5) и принятых выше соотношений $C_{к}$ и $C_{п}$ максимальное колесное давление, при котором наступает силовое «размыкание» системы, будет следующим:

При $C_{к} = 0,1C_{п}...$	$\max P_{кол} = 11P_{к.о}$
« $C_{к} = 0,25C_{п}...$	$\max P_{кол} = 5P_{к.о}$
« $C_{к} = 0,5C_{п}...$	$\max P_{кол} = 3P_{к.о}$
« $C_{к} = C_{п}...$	$\max P_{кол} = 2P_{к.о}$
« $C_{к} = 2C_{п}...$	$\max P_{кол} = 3/2P_{к.о}$

Значение $P_{к.о}$ обычно бывает достаточно определенной величиной [13]. По условию создания необходимого сопротивления перемещению рельса по шпалам $P_{к.о} = 1,6-2,0$ т. Колесное давление на узел скрепления $P_{кол}$ зависит от давления колеса на рельс, типа рельса, расстояния между шпалами, и с учетом динамики и неравноупругости пути для анализа оно может быть принято в пределах 6–8 т. Отсюда крайние соотношения между жесткостями упругой прокладки и клеммы, при которых наступают силовые «размыкания» системы, будут такими, как приведено в табл. 1.

Таблица 1

Крайние соотношения между жесткостями упругой прокладки и клеммы, при которых наступают силовые «размыкания» системы

$P_{к.о}$, кг	$P_{кол}$, т	Соотношения между $C_{к}$ и $C_{п}$
2000	6	$C_{к} > 0,5C_{п}$
2000	8	$C_{к} > 0,34C_{п}$
1600	6	$C_{к} > 0,36C_{п}$
1600	8	$C_{к} > 0,25C_{п}$

На рис. 1 приведены графики зависимости $P_{кол} = f\left(\frac{C_{к}}{C_{п}}\right)$

при клеммном нажатии 1000, 1600 и 2000 кг. Для анализа узла скрепления, имеющего $P_{к.о} = 2$ т и работающего при $\max P_{кол} = 5$ т, построен отдельный график (рис. 2). На оси ординат показано суммарное давление на упругую прокладку $P_{п}$ с момента ее загрузки клеммным нажатием, по оси абсцисс — упругая деформация прокладки y с этого же момента. Прямая OO_1D отражает зависимость между $P_{п}$ и y , тангенс угла ее наклона $\tan \alpha = C_{п}$. Горизонтальная линия, проведенная на уровне $P_{к.о} = 2$ т, определяет также начальную деформацию прокладки $y_{о.п}$.

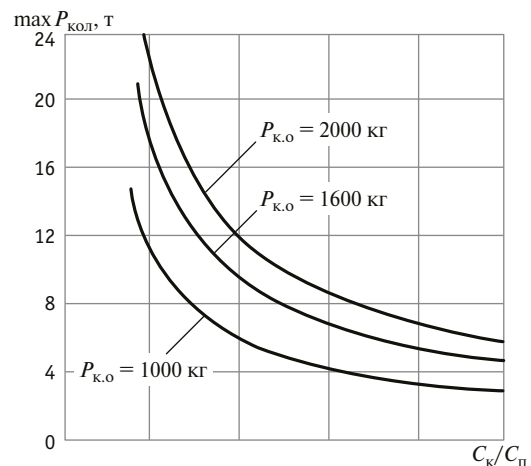


Рис. 1. Зависимость между давлением колеса на узел скрепления, при котором происходит «размыкание» упругой системы, и соотношением жесткостей $C_{к}$ и $C_{п}$

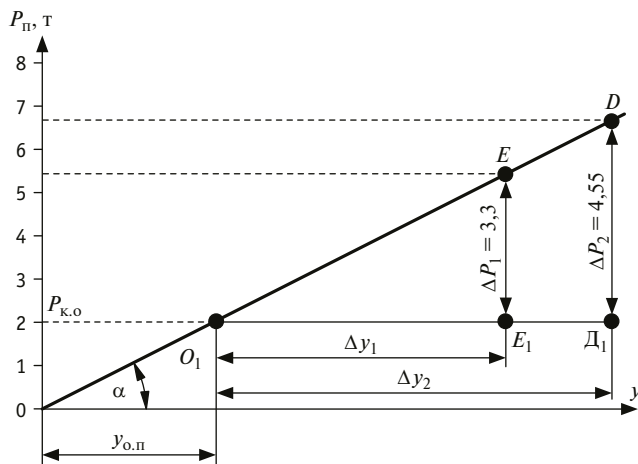


Рис. 2. Зависимость между вертикальными силами, которые воспринимаются упругой прокладкой P_{II} и ее деформацией y , для случая $P_{к.о} = 2$ т и $P_{кол} = 5$ т

При достаточно жесткой клемме, когда $C_k = 0,5C_{II}$ и еще не происходит «размыкания» упругой системы, в соответствии с (6) [14]:

если $P_{кол} = 0$, то $P_{II} = P_{к.о} = 2$ т;

если $P_{кол} = 5$ т, то $P_{II} = 2 + \frac{5}{1 + \frac{0,5C_{II}}{C_{II}}} = 5,3$ т.

При накатывании колеса и последовательном увеличении колесной нагрузки $P_{кол}$ сжатие упругой прокладки будет возрастать, и при приращении давления на нее с 2 до 5,3 т, т.е. на $\Delta P_1 = 3,3$ т, деформация возрастет на Δy_1 (см. рис. 2).

Если заменить клемму на более гибкую, жесткость которой, например, будет $C_k = 0,1C_{II}$, то:

при $P_{кол} = 0$ усилие на прокладку составит $P_{II} = P_{к.о} = 2$ т, а при $P_{кол} = 5$ т усилие на прокладку составит

$$P_{II} = 2 + \frac{5}{1 + \frac{0,1C_{II}}{C_{II}}} = 6,55 \text{ т.}$$

На рис. 2 для данного случая изменение силы и деформации узла крепления характеризуется отрезком O_1D , при этом приращение давления на упругую прокладку определяется величиной $\Delta P_2 = 4,55$ т, а добавочное сжатие прокладки величиной Δy_2 . Таким образом, при менее жесткой клемме «ход» упругой прокладки при приложении к узлу крепления одной и той же колесной нагрузки (в данном случае 5 т) будет существенно больше, чем при клемме, имеющей большую жесткость.

Жесткость узла крепления в целом C_y определяется отношением приращения давления на узел от рельса (за счет колесной нагрузки $P_{кол}$) к перемещению рельса Δy :

$$C_y = \frac{P_{кол}}{\Delta y}. \quad (7)$$

В обоих рассмотренных случаях давление на узел от колесной нагрузки увеличивается от нуля до 5 т, но при более жесткой клемме перемещение рельса в вертикальной плоскости составляет Δy_1 , а при менее жесткой — Δy_2 .

Для первого случая, когда $C_k = 0,5C_{II}$, жесткость узла будет

$$C_{y-1} = \frac{P_{кол}}{\Delta y_1},$$

для второго случая, т.е. когда $C_k = 0,1C_{II}$

$$C_{y-2} = \frac{P_{кол}}{\Delta y_2}.$$

Так как $\Delta y_2 > \Delta y_1$, а $P_{кол}$ в обоих случаях одинакова, то

$$C_{y-1} > C_{y-2}.$$

Из графика, приведенного на рис. 2, также можно получить зависимость жесткости узла крепления C_y от жесткостей прокладки C_{II} и клеммы C_k .

В выражении (7) знаменатель представляет собой приращение деформации прокладки после приложения силы $P_{кол}$. Установлено, что при наличии упругих прокладок и клемм любое по величине дополнительное приложение вертикальной силы к рельсу (а через него к прокладке) вызывает ее дополнительное сжатие с соответствующим уменьшением клеммного нажатия.

Следовательно, величины Δy_1 и Δy_2 , показанные на рис. 2, есть не что иное, как y , величина которого определяется выражением (16).

Построение зависимостей $P_{кол} = \varphi(y)$. На рис. 2 приведена зависимость между суммарным давлением P_{II} , воспринимаемым упругой прокладкой, и ее деформацией. Для исследования работы крепления необходимо иметь зависимость между приращением силы $P_{кол}$ и деформацией узла крепления. Полученные выше зависимости позволяют произвести такие построения.

До момента «размыкания» упругой системы:

$$P_{кол} = C_y y = (C_{II} + C_k) y.$$

После достижения колесной нагрузки максимальной величины $\max P_{кол}$ и прекращения давления клемм на подшву рельса

$$P_{кол} = C_{II} y.$$

В общем виде зависимость между $P_{кол}$ и y приведена на рис. 2. При этом:

$$C'_y y = \operatorname{tg} \gamma = C_{II} + C_k;$$

$$C''_y y = \operatorname{tg} \beta = C_{II}$$

где C'_y и C''_y — жесткости узла крепления соответственно до и после «размыкания» упругой системы.

В процессе упругой деформации прокладок от колесных нагрузок происходит уменьшение клеммного нажатия, обусловленное соотношением жесткостей этих двух элементов скрепления. При зависимостях между силой и деформацией, близких к линейным (на расчетном интервале работы собранного узла промежуточного рельсового скрепления), начальном клеммном нажатии в узле скрепления 1600 кг по условию недопущения «размыкания» упругой системы соотношения жесткости клемм C_k и прокладки C_{Π} должны быть $C_k < 0,25C_{\Pi}$.

С учетом требования необходимости определенного клеммного нажатия на подошву рельса при максимальной нагрузке от колеса на подкладку соотношение между рассматриваемыми жесткостями должно быть существенно большим.

Сведения об авторах:

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

Вадим Вадимович Королев,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное
строительство» Российского университета транспорта (МИИТ)

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

Значение исследования вертикальной жесткости рельсовых скреплений при постоянных значениях жесткостей прокладок проявляется в возможности прогнозирования изменений в работе рельсового пути под воздействием различных факторов и создания более точных математических моделей для расчета долговечности и надежности железнодорожных путей на основе реальных эксплуатационных характеристик.

Таким образом, данное исследование представляет существенный вклад в разработку технических решений, направленных на улучшение эксплуатационных качеств железнодорожного транспорта, и служит основой для дальнейших работ по оптимизации конструкции рельсовых скреплений.

Authors information:

Alexey A. Loktev,
DSc in Physics and Mathematics,
Professor, Head of Transport Construction Department,
Russian University of Transport (MIIT)

Vadim V. Korolev,
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transport
Construction Department, Russian University of Transport (MIIT)

Irina V. Shishkina,
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Transport
Construction Department, Russian University of Transport (MIIT)

Литература

1. Локтев А. А., Тальских К. Ю. Воздействие на объекты транспортной инфраструктуры высокочастотных вибраций и возможности их демпфирования // Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования : материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции, Елец, 25 апреля 2018 г. Елец : Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2018. С. 49–55.
2. Принципы определения необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, В. В. Королев [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61.
3. Локтев Д. А., Локтев А. А. Метод определения динамических параметров транспортных средств в автоматизированной системе мониторинга и измерений // Динамика сложных систем — XXI век. 2018. Т. 12. № 3. С. 34–39. DOI: 10.18127/j19997493-201803-05.
4. Метод расчета необходимой прочности железнодорожного пути с учетом интенсивности его использования / Б. Э. Глюзберг, А. А. Локтев, А. В. Савин [и др.] // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 46–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-46-52.
5. Потапов А. В., Сычева А. В., Локтев А. А. К вопросу о влиянии подуклонки рельсов на величину непогашенного ускорения // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2021. Т. 17. № 17. С. 92–98.
6. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Влияние напряжений в рельсе железнодорожного пути на волновые процессы от

References

1. Loktev A. A., Talskikh K. Yu. Impact of high-frequency vibrations on transport infrastructure facilities and the possibility of their damping. *Control systems, technical systems: stability, stabilization, ways and methods of research* : proceedings of the 4th International scientific and practical conference, Yelets, April 25, 2018. Yelets : Yelets State University named after I. A. Bunin, 2018. Pp. 49–55. (In Russian).
2. Glyuzberg B. E., Loktev A. A., Korolev V. V. [et al.]. Principles of determination of required railway track strength with the consideration for intensity of its use. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 53–61. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-53-61. (In Russian).
3. Loktev D. A., Loktev A. A. Method for determining the dynamic parameters of vehicles in an automated monitoring and measurement system. *Dynamics of Complex Systems — XXI century*. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 34–39. DOI: 10.18127/j19997493-201803-05. (In Russian).
4. Glyuzberg B. E., Loktev A. A., Savin A. V. [et al.]. Method for calculation of required strength of railway track with the consideration for intensity of its use. *Transport of the Urals*. 2022. No. 1 (72). Pp. 46–52. DOI: 10.20291/1815-9400-2022-1-46-52. (In Russian).
5. Potapov A. V., Sycheva A. V., Loktev A. A. On the effect of rail deflection on the magnitude of outstanding acceleration. *Introduction of modern structures and advanced technologies in the track economy*. 2021. Vol. 17. No. 17. Pp. 92–98. (In Russian).
6. Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev V. P. Impact of Stresses in Track Rail on Wave Processes from Wheel Impact on it.

- воздействия на него колеса // Наука и техника транспорта. 2023. № 4. С. 48–53. ISSN 2074-9325.
7. Локтев А. А., Сычева А. В., Сычев В. П. Моделирование работы бесстыкового пути по критерию обеспечения его устойчивости // Наука и техника транспорта. 2021. № 2. С. 57–62. ISSN 2074-9325.
 8. Локтев А. А., Сычев В. П. Прогнозирование развития отступлений от норм содержания рельсовой колеи до неисправности, влияющей на перевозочный процесс // Наука и техника транспорта. 2018. № 4. С. 17–26. ISSN 2074-9325
 9. Особенности динамического контакта колеса и рельса при высокоскоростном движении / А. Я. Коган, В. В. Королев, А. А. Локтев [и др.] // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, 19–24 августа 2019 г. : сборник трудов. Уфа : Башкирский государственный университет, 2019. Т. 3. С. 119–121.
 10. Сычева А. В., Локтев А. А., Сычев В. П. Формирование участка пути регулируемой жесткости // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 10. С. 11–13. ISSN 0033-4715.
 11. Влияние высокочастотных вибраций в системе «колесо — рельс» на структуру рельсовой стали М76 / Е. А. Гридасова, А. А. Локтев, П. А. Никифоров, К. Ю. Тальских // Наука и техника транспорта. 2019. № 2. С. 40–46. ISSN 2074-9325.
 12. Локтев А. А., Гридасова Е. А., Королев В. В. Определение остаточных напряжений в старогодных рельсах // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 3. С. 30–33. ISSN 0033-4715.
 13. Исследование микроструктуры рельсовой стали при высокочастотных динамических воздействиях / А. А. Локтев, В. В. Королев, И. В. Шишкина [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2019. № 5. С. 11–15. ISSN 0033-4715.
 14. Расчет высокочастотных вибраций железнодорожного пути под подвижным составом при скоростях 200–250 км/час / А. Ю. Абдурашитов, А. А. Локтев, А. В. Сычева, П. В. Сычев // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 6 (72). С. 22–28. ISSN 1997-0722.
- Science and technology in transport*. 2023. No. 4. Pp. 48–53. ISSN 2074-9325. (In Russian).
 7. Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev V. P. Modelling of the operation of long-welded rails according to ensuring its stability criterion. *Science and technology in transport*. 2021. No. 2. Pp. 57–62. ISSN 2074-9325. (In Russian).
 8. Loktev A. A., Sychev V. P. Forecasting the development of deviations from the standards of maintenance of the rail track to a malfunction affecting the transportation process. *Science and technology in transport*. 2018. No. 4. Pp. 17–26. ISSN 2074-9325. (In Russian).
 9. Kogan A. Ya., Korolev V. V., Loktev A. A. [et al.]. Features of dynamic wheel-rail contact during high-speed movement : proceedings of the 12th All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics, Ufa, August 19–24, 2019. Ufa : Bashkir State University, 2019. Vol. 3. Pp. 119–121. (In Russian).
 10. Sycheva A. V., Loktev A. A., Sychev V. P. Formation of a section of the path of adjustable stiffness. *Railway Track and Facilities*. 2023. No. 10. Pp. 11–13. ISSN 0033-4715. (In Russian).
 11. Gridasova E. A., Loktev A. A., Nikiforov P. A., Talskikh K. Yu. The effect of high-frequency vibrations in the wheel — rail system on the structure of M76 rail steel. *Science and technology in transport*. 2019. No. 2. Pp. 40–46. ISSN 2074-9325. (In Russian).
 12. Loktev A. A., Gridasova E. A., Korolev V. V. Determination of residual stresses in old rails. *Railway Track and Facilities*. 2020. No. 3. Pp. 30–33. ISSN 0033-4715. (In Russian).
 13. Loktev A. A., Korolev V. V., Shishkina I. V. [et al.]. Investigation of the microstructure of rail steel under high-frequency dynamic influences. *Railway Track and Facilities*. 2019. No. 5. Pp. 11–15. ISSN 0033-4715. (In Russian).
 14. Abdurashitov A. Iu., Loktev A. A., Sycheva A. V., Sychev P. V. Calculation of the high-frequency vibrations of the railway track under the impact of the rolling stock moving at speeds of 200-250 km/h. *Bulletin of transport of the Volga region*. 2018. No. 6 (72). Pp. 22–28. ISSN 1997-0722. (In Russian).

Объем статьи 0,55 авторских листа

Научная статья

УДК 625.113:625.033.36

К вопросу о применимости бикадиоид в геометрии трассы железнодорожного пути

Артем Викторович Чонка¹, Айдар Рафатович Исламов¹

¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

On the applicability of bicadioids in the geometry of railway track

Artem V. Chonka¹, Aydar R. Islamov¹

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

Совершенствование геометрии криволинейных участков пути относится к важнейшим задачам развития железнодорожной инфраструктуры. Выбор оптимальных очертаний кривых позволяет снизить нагрузки на путь и состав, повысить межремонтные интервалы, комфортабельность и безопасность движения, особенно в условиях развития высокоскоростного магистрального движения.

Статья посвящена первичной оценке применимости бикадиоидных кривых в геометрии трассы железнодорожного пути. Приведены математическое описание рассматриваемых кривых, формулы и графики основных расчетных характеристик, сделано сравнение со стандартной геометрией криволинейных участков и биклотоидной геометрией. В графической и численной форме представлены результаты имитационного моделирования, позволяющие сделать выводы о преимуществах бикадиоидной геометрии.

Ключевые слова: трасса, бикадиоид, биклотоид, инфраструктура пути, имитационное моделирование

Abstract

Improving the geometry of curved sections of track is one of the most important tasks for development of railway infrastructure. The choice of optimal curve outlines allows to reduce the load on the track and composition, increase repair intervals, comfort and safety of traffic, especially in conditions of the development of high-speed mainline traffic.

The article is devoted to the primary assessment of the applicability of bicadioid curves in the geometry of railway track. Mathematical description of curves under consideration, formulas and graphs of the main design characteristics are given, a comparison is made with the standard geometry of curved sections and biclotoid geometry. The results of simulation modeling are presented in graphical and numerical form, allowing to draw conclusions about the advantages of bicadioid geometry.

Keywords: track, bicadioid, biclotoid, track infrastructure, simulation

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-88-99

Развитие железнодорожного транспорта, особенно высокоскоростного, требует решений по повышению плавности движения состава в кривых. Концепты, заложенные в основу норм проектирования геометрии трассы железнодорожной линии, имеют недочеты, которые отчетливо проявляются себя при больших скоростях движения.

Вопросы важности обеспечения плавности трасс на примере автомобильных дорог поднимались в работах Г. В. Величко и В. В. Филиппова [1, 2], А. А. Белятынского и А. М. Таранова [3] А. А. Белятынского и В. Н. Чешуйко [4]. Авторами отмечены недостатки клотоидной геометрии, приведены сравнительные анализы с другими видами переходных кривых. Кроме того, исследования в области геометрии железнодорожной трассы указывают на преимущество ликвидации круговой кривой — использование биклотоидной геометрии [5–9].

В данной статье рассмотрены перспективы применения на криволинейных участках железнодорожной линии бикадиоиды, представленной двумя сопряженными кдиоидами типа I, и сравнение ее со стандартной и биклотоидной кривыми.

Для проведения первичного сравнительного анализа принято четыре радиуса кривых — 5500, 6000, 7000 и 10000 м, по которым подобраны по три вида геометрии кривых участков: стандартная, биклотоидная, бикадиоидная. Характеристики кривых подбирались согласно требованиям специальных технических условий проектирования высокоскоростной магистрали [10] с учетом скорости движения 300 км/ч.

В статье приведены математические модели, принятые в соответствии с предшествующими работами по данной теме [11, 12].

Кдиоида типа I описывается системой параметрических уравнений [3]

$$\begin{cases} x(\tau) = R\alpha \int_0^\tau \cos\left(\alpha \cdot \left(\tau^3 - \frac{\tau^4}{2}\right)\right) d\tau \\ y(\tau) = R\alpha \int_0^\tau \sin\left(\alpha \cdot \left(\tau^3 - \frac{\tau^4}{2}\right)\right) d\tau, 0 \leq \tau \leq L \end{cases}, \quad (1)$$

где R — радиус круговой кривой, м; α — угол поворота трассы, рад, $\alpha = L/R$; L — длина переходной кривой, м; S — длина пути от начала кривой до рассматриваемой точки, м; $\tau = S/L$.

Клотоида, описываемая интегралами Эйлера:

$$\begin{cases} x(\tau) = \frac{1}{\alpha} \int_0^s \cos(s^2) ds \\ y(\tau) = \frac{1}{\alpha} \int_0^s \sin(s^2) ds \\ a = \frac{1}{\sqrt{2R_{\text{кк}}L_{\text{пк}}}} \\ s = L_{\text{пк}} \cdot a \cdot \tau \end{cases} \quad (2)$$

Также учтены следующие показатели:
теоретическая величина непогашенного ускорения [13]

$$a_{\text{нп}} = \frac{v^2}{3,6^2 R(t)} - g \cdot \frac{h(t)}{S_{\text{к}}}, \quad (3)$$

где v — скорость движения 300 км/ч; g — ускорение свободного падения 9,807 м/с²; h — возвышение наружного рельса в круговой кривой, мм; $S_{\text{к}}$ — расстояние между осями рельсов 1600 мм; $a_{\text{нп}}$ — ускорение непогашенного ускорения

$$j_{\text{нп}}(\tau) = \frac{v}{L_{\text{пк}}} \frac{da_{\text{нп}}}{d\tau}; \quad (4)$$

отвод возвышения принят прямо пропорциональным кривизне соответствующей кривой

$$h_s(\tau) \propto a_{\text{цб}}(\tau) \propto K(\tau) \Rightarrow h(\tau) = h_{\text{кк}} \frac{K(\tau)}{K_{\text{кк}}}, \quad (5)$$

где $h_{\text{кк}}$ — возвышение наружного рельса в круговой кривой (КК); $K_{\text{кк}} = \frac{1}{R_{\text{кк}}}$ — кривизна КК;
скорость подъема колеса по возвышению

$$h'(\tau) = \frac{v}{L_{\text{пк}}} \frac{dh(\tau)}{d\tau}. \quad (6)$$

Графики, характеризующие выбранные для сравнения кривые, представлены на рис. 1–4.

На представленных рисунках отрицательное значение возвышения означает возвышение правой рельсовой нити.

Для сравнения и анализа динамики поезда при движении его по рассматриваемым кривым при помощи моделирования выполнены расчеты в программном комплексе «Универсальный механизм» [14] с использованием модели высокоскоростного электропоезда TGV.

По результатам моделирования на рис. 5–8 представлены только расчеты непогашенного ускорения. Интегральная оценка других усилий приведена в табл. 1.

Из рис. 5–8 следует отметить достаточное соответствие усредненных значений ускорения, полученных изоляцией низких частот при помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT), с вычисленными по идеализированной математической модели кривой, рассчитанное неразрывное плавное изменение усилий также подтверждается. Отдельно стоит выделить достаточно низкую амплитуду колебаний усилий, воздействующих на поезд при прохождении первой переходной кривой. Данный результат подтверждается исследованиями взаимодействия поезда с S -образным отводом возвышения наружного рельса в переходной кривой [15].

Моделирование динамики поезда проводилось с достаточно малым шагом интегрирования, что позволяет выполнить частотный анализ полученных результатов. На графиках спектров откликов (см. рис. 5–8) отчетливо видно преобладание низких частот (до 10 Гц) вне зависимости от геометрии. На рис. 5–8 также отмечены частоты и амплитуды откликов, выбранные для построения усредненных графиков результатов.

Несмотря на схожесть графиков частотных откликов, очевидна разница в характере нарастания амплитуд колебаний. Для оценки общего силового воздействия на состав подсчитаны интегральные значения различных усилий (импульсы сил). Сводная оценка приведена в табл. 1.

Результаты свидетельствуют о значительном преимуществе би-кривых при меньших радиусах поворота (где повышение плавности и имеет наибольший смысл), а при больших радиусах кривых усилия не так велики. Это приводит к тому, что большая длина би-кривых порождает хоть и смягченные, но избыточно долгие колебания, отсюда и нарастает суммарное воздействие. Также стоит отметить снижение непогашенного ускорения в бикадиоидных кривых во всех случаях.

Основные выводы сравнительного анализа:

1. Бикадиоидные и биклотоидные кривые имеют замедленное нарастание угла поворота и, как следствие, большую длину, что влечет за собой некоторые ограничения.
2. Применение бикадиоидных и биклотоидных кривых при больших радиусах поворота требует отдельного рассмотрения.
3. Применение бикадиоидных и биклотоидных кривых позволяет существенно снизить силовую нагрузку на путь и состав в кривых меньших радиусов.
4. Кадиоидная геометрия позволяет сгладить и замедлить нарастание амплитуд колебаний в переходной кривой.
5. Кадиоидная геометрия позволяет снизить действие непогашенного ускорения.
6. Необходимо решение по снижению низкочастотных колебаний в кривых, так как исследования указывают на связь между колебаниями частотой в 1 Гц и возникновением у пассажиров симптомов морской болезни [16, 17].

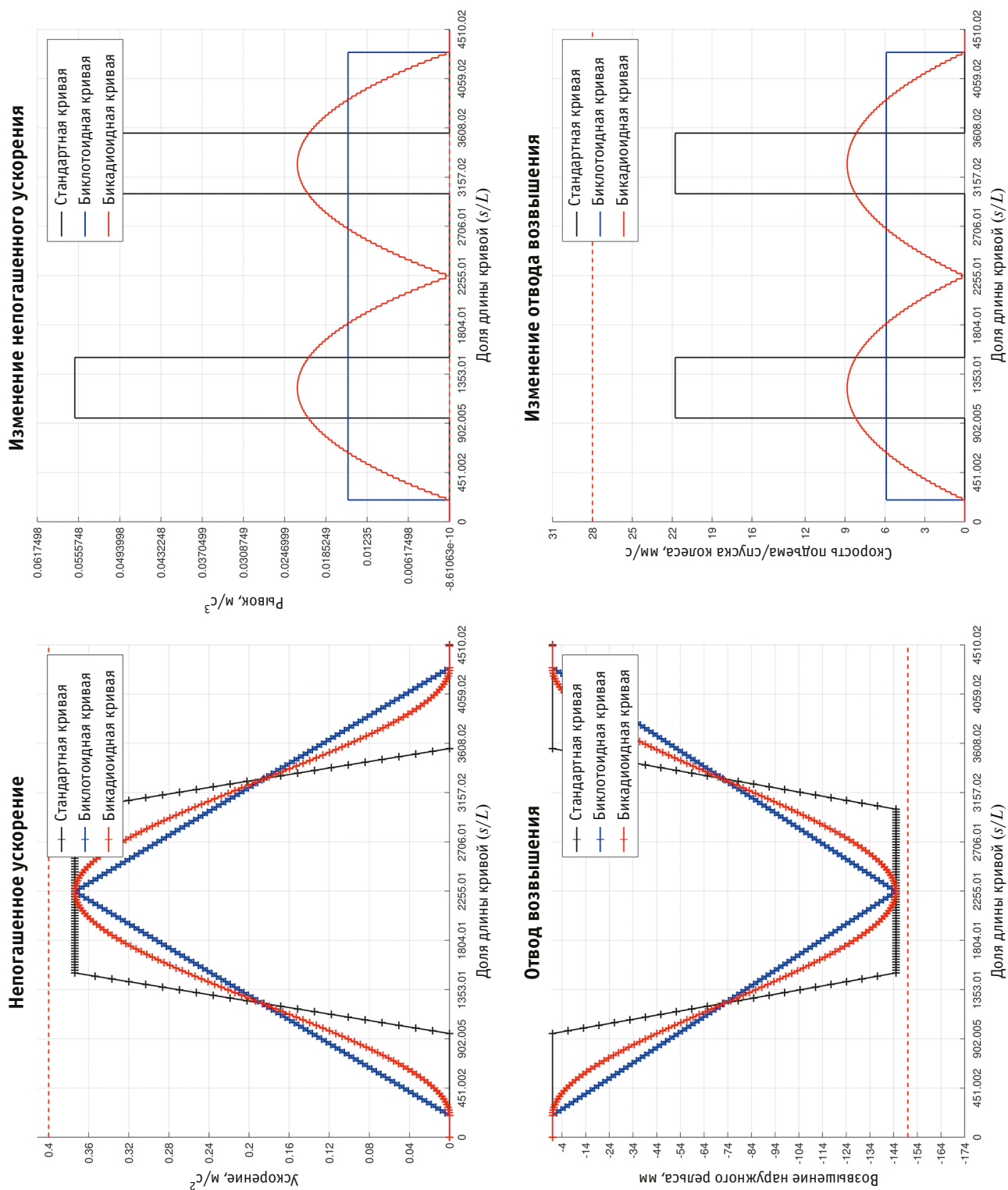


Рис. 1. Сравнительные графики характеристик кривых для R500

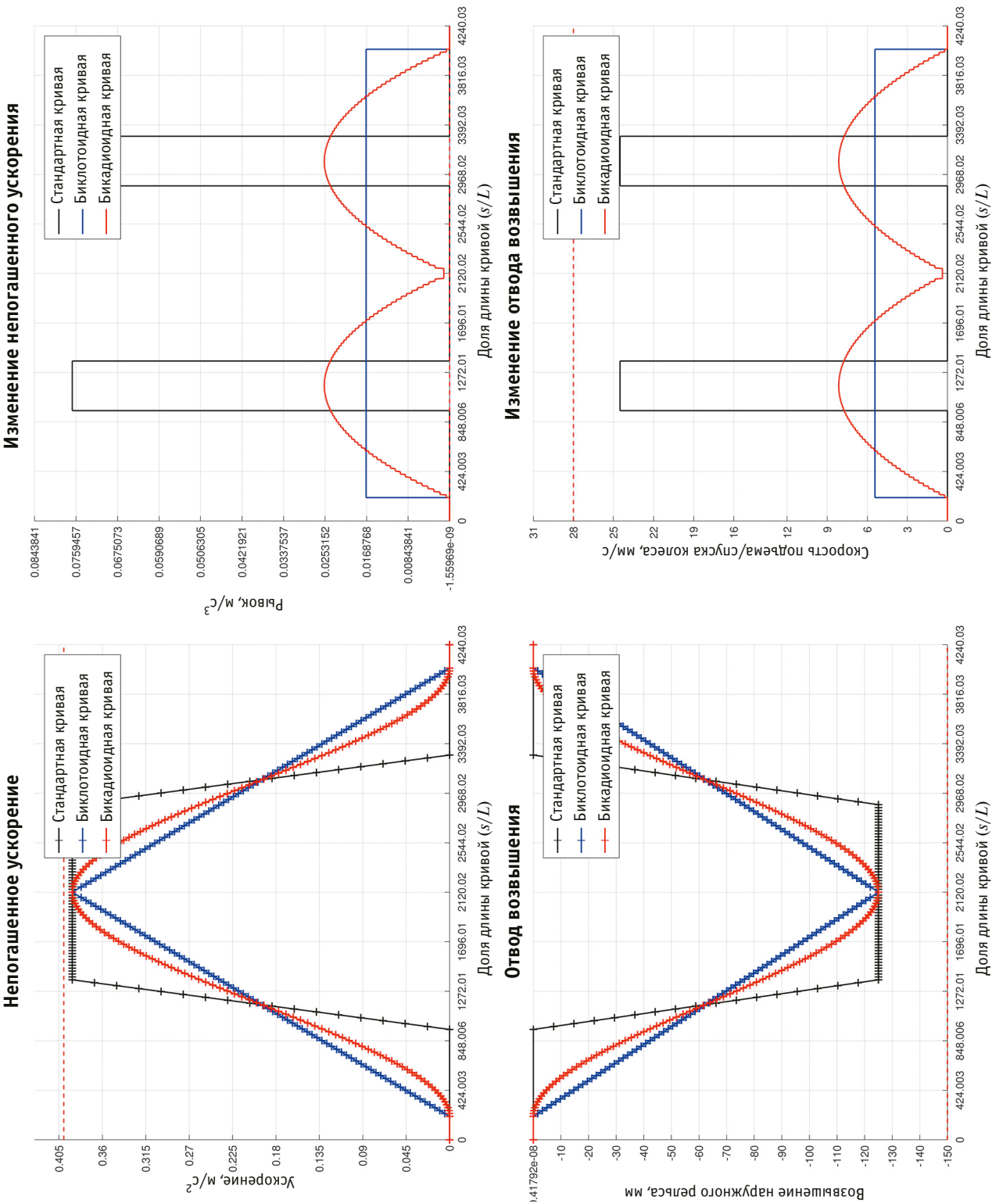


Рис. 2. Сравнительные графики характеристик кривых для R6000

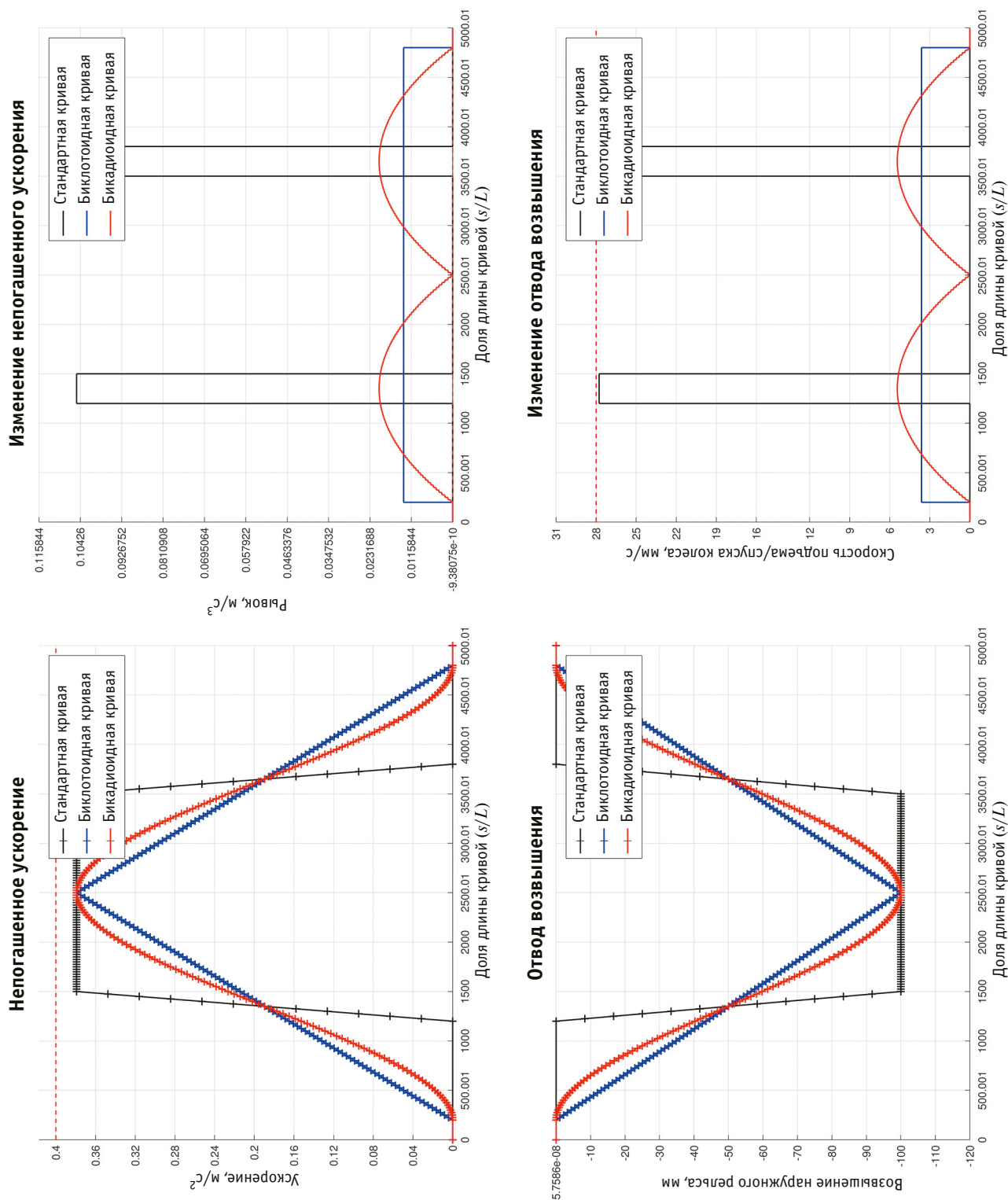


Рис. 3. Сравнительные графики характеристик кривых для R7000

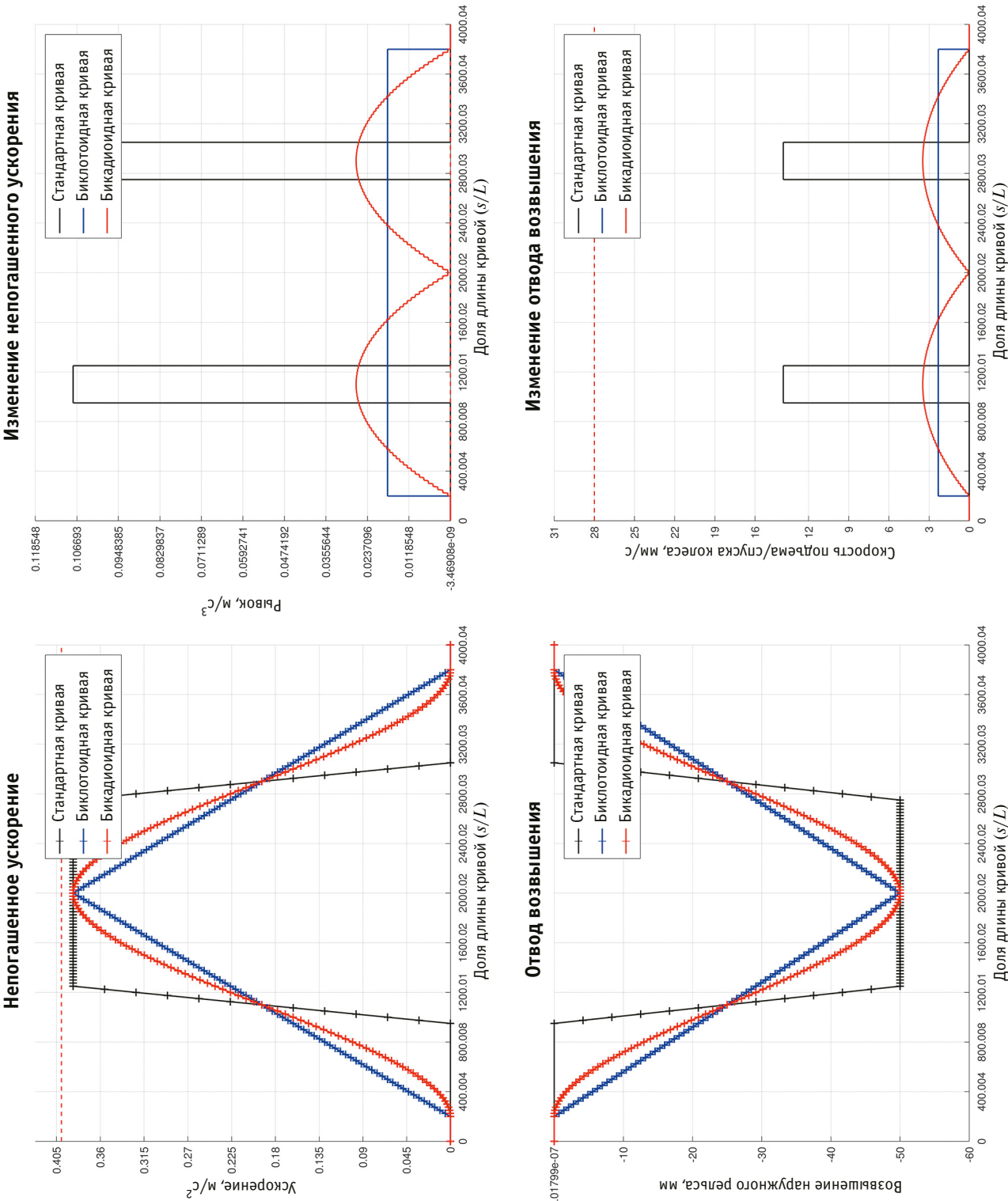


Рис. 4. Сравнительные графики характеристик кривых для R10000

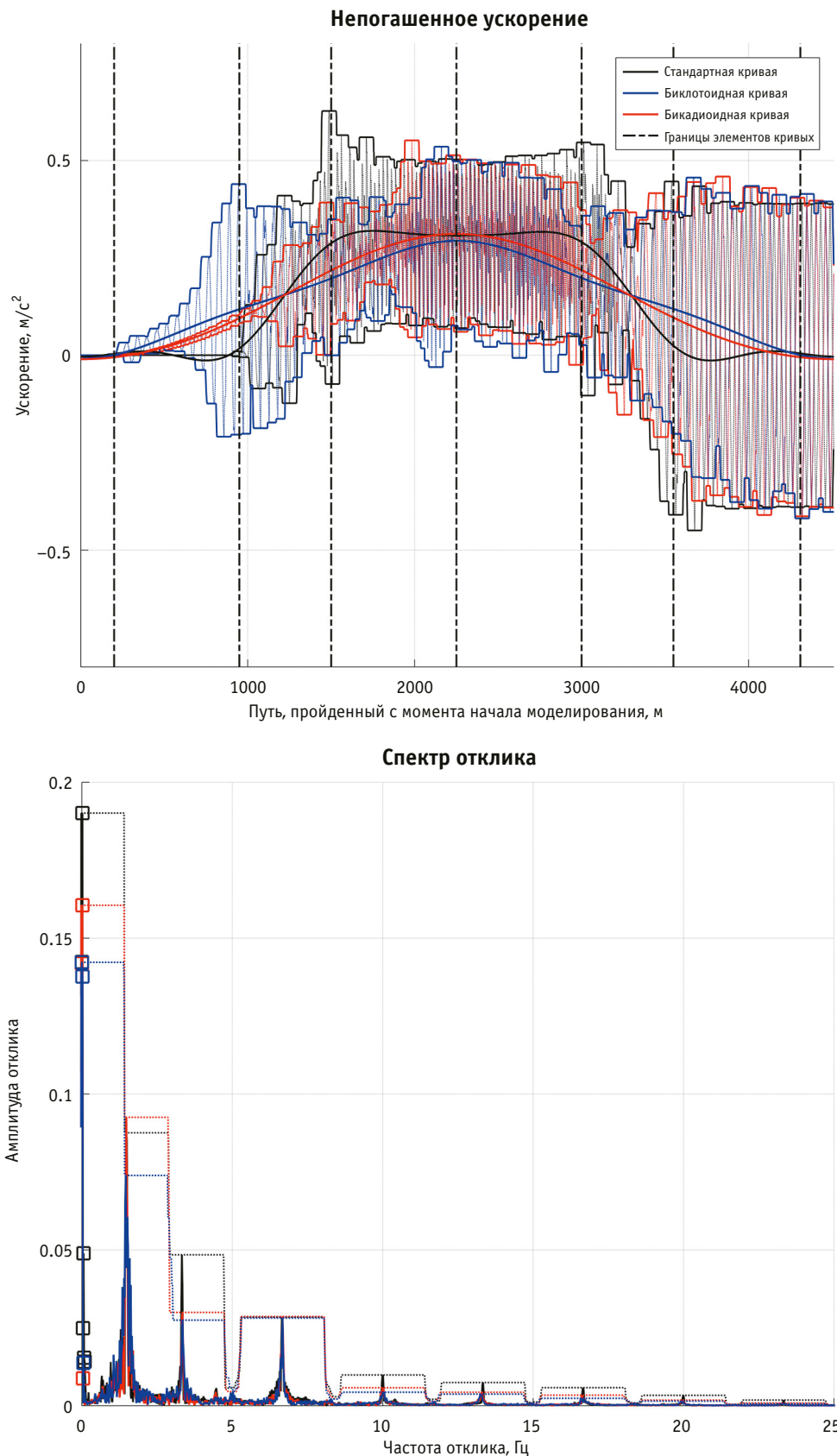


Рис. 5. Результаты расчета непогашенного ускорения для R5500

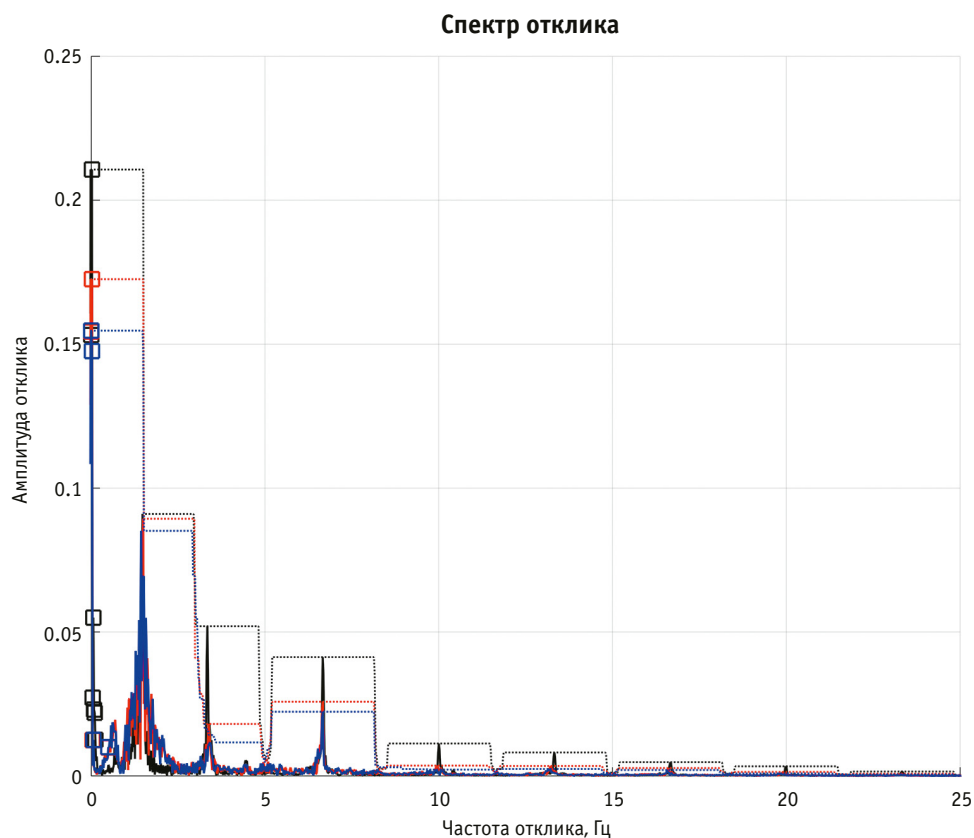
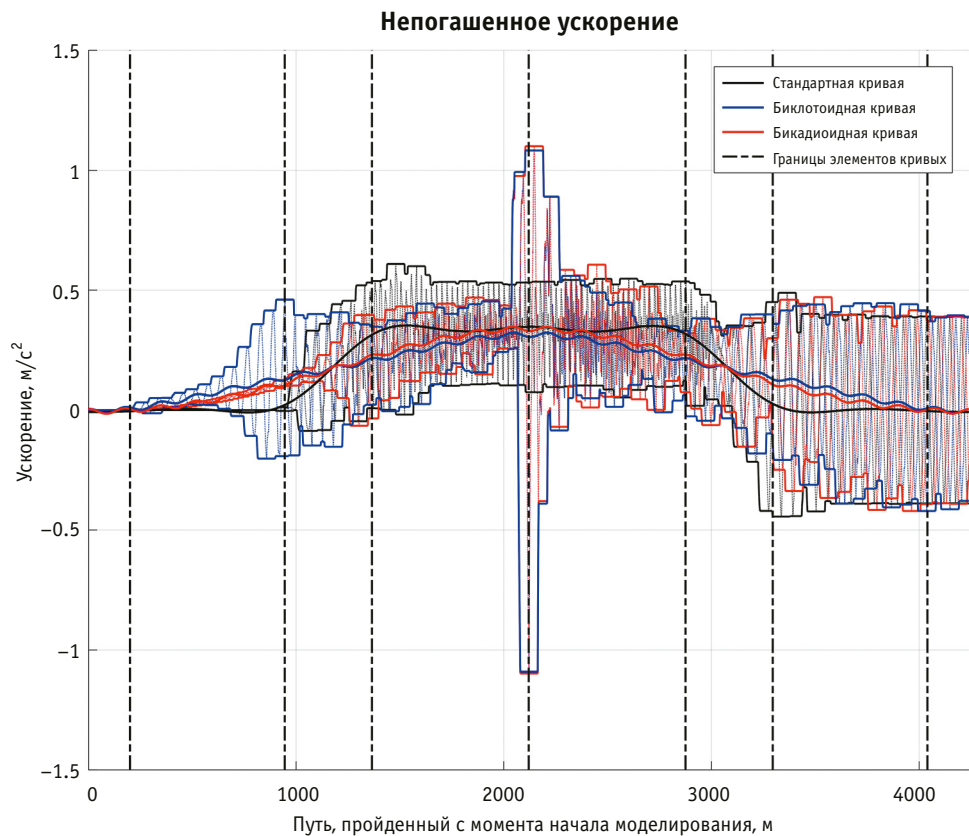


Рис. 6. Результаты расчета непогашенного ускорения для R6000

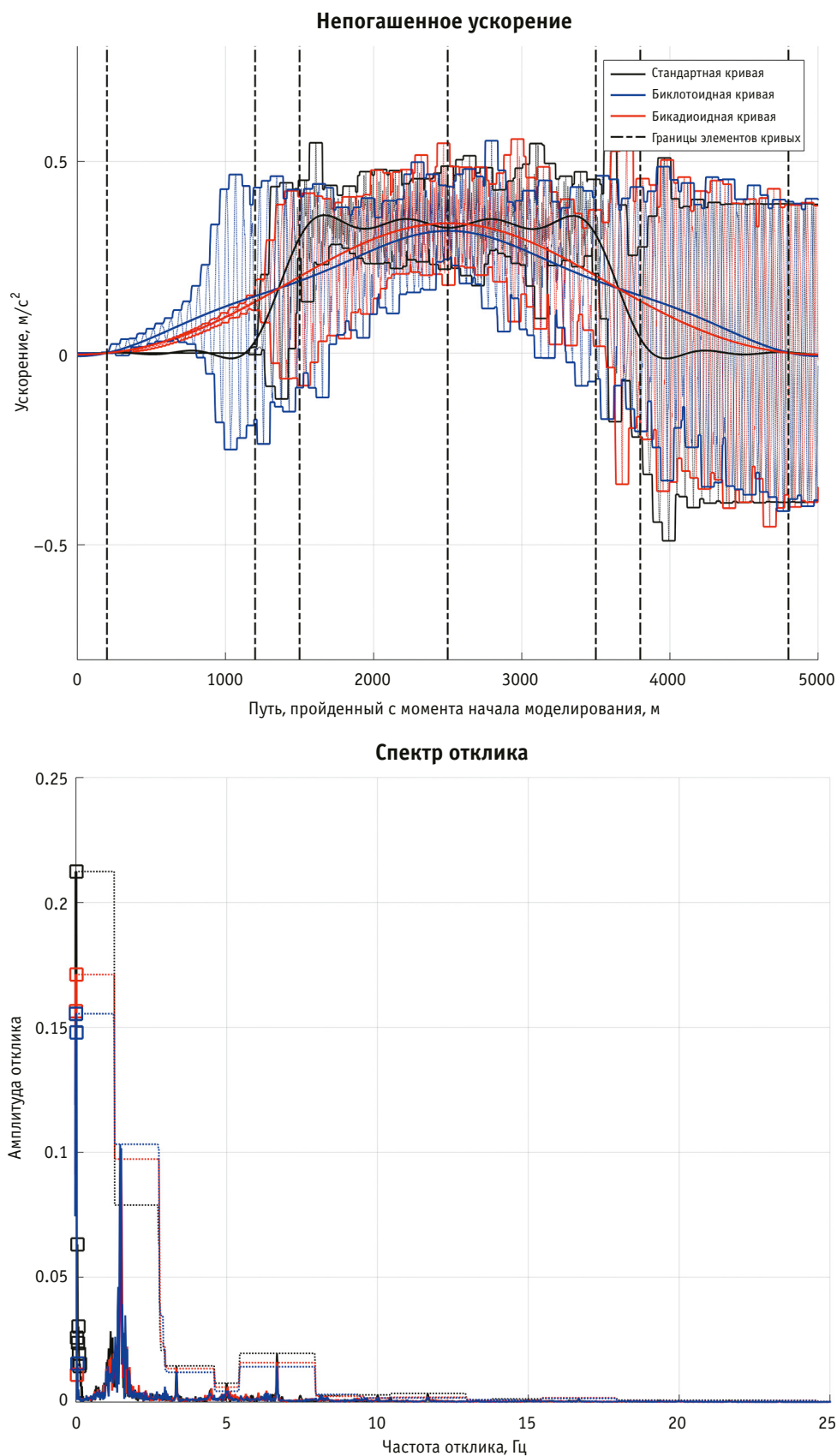


Рис. 7. Результаты расчета непогашенного ускорения для R7000

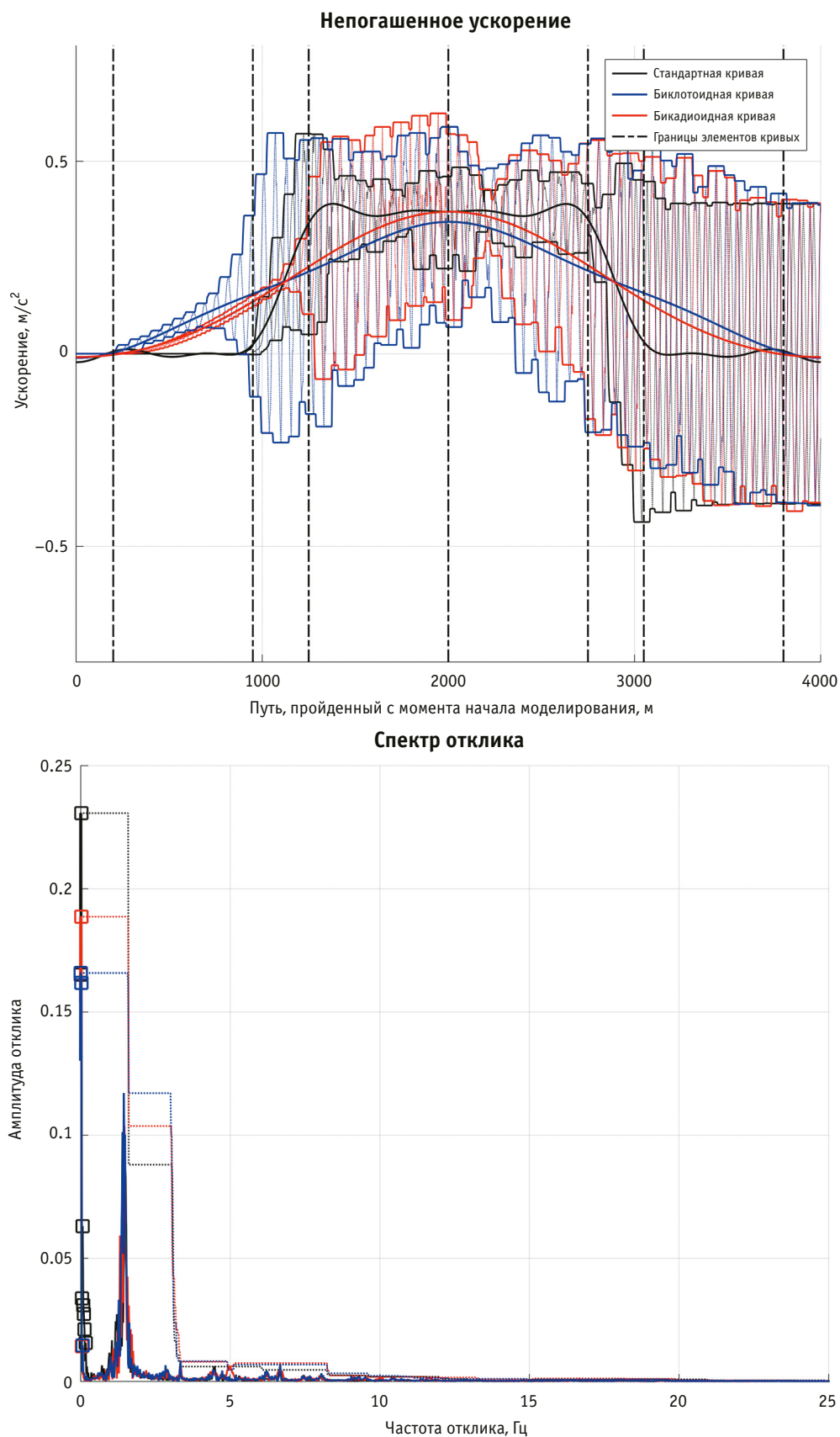


Рис. 8. Результаты расчета непогашенного ускорения для R10000

Таблица 1

Интегральные значения усилий при движении в различных кривых

	Интегралы по времени										Снижение значения, %											
	продольной силы крипа (ЛК), Н·с	продольной силы крипа (ЛК), Н·с	продольной силы крипа (ЛК), Н·с	продольной силы крипа (ЛК), Н·с	поперечной силы крипа (ПК), Н·с	продольной силы крипа (ЛК), Н·с	поперечной силы крипа (ПК), Н·с	вертикальной силы (ЛК), Н·с	вертикальной силы (ПК), Н·с	непогашенного ускорения, м/с	продольной силы крипа (ЛК)	продольной силы крипа (ПК)	поперечной силы крипа (ЛК)	поперечной силы крипа (ПК)	продольной силы (ЛК)	поперечной силы (ПК)	вертикальной силы (ЛК)	вертикальной силы (ПК)	непогашенного ускорения			
R5500 L4510																						
Стандарт	1.61E+05	1.86E+05	2.18E+05	2.15E+05	1.96E+05	2.00E+05	2.78E+05	3.86E+05	4.39E+06	4.67E+06	10.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Бикадиоида	1.71E+05	1.72E+05	1.84E+05	1.89E+05	1.93E+05	1.94E+05	2.12E+05	2.97E+05	4.39E+06	4.66E+06	10.1	-6.2	7.5	15.7	12.0	1.7	3.0	23.8	23.0	-0.1	0.3	4.7
Биклотоида	1.79E+05	1.70E+05	1.73E+05	1.82E+05	1.97E+05	1.97E+05	1.94E+05	2.77E+05	4.39E+06	4.66E+06	10.2	-11.3	8.7	20.5	15.4	-0.3	1.4	30.2	28.2	-0.1	0.3	3.9
R6000 L4240																						
Стандарт	1.47E+05	1.71E+05	2.07E+05	1.97E+05	1.81E+05	1.83E+05	2.52E+05	3.62E+05	4.12E+06	4.40E+06	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Бикадиоида	1.56E+05	1.50E+05	1.64E+05	1.59E+05	1.71E+05	1.72E+05	1.56E+05	2.41E+05	4.12E+06	4.39E+06	10.2	-6.5	12.0	20.8	19.2	5.2	6.0	37.9	33.6	-0.2	0.3	4.1
Биклотоида	1.67E+05	1.54E+05	1.55E+05	1.52E+05	1.79E+05	1.78E+05	1.45E+05	2.28E+05	4.12E+06	4.38E+06	10.4	-13.4	9.9	25.3	22.7	1.3	2.3	42.2	36.9	-0.2	0.3	2.5
R7000 L5000																						
Стандарт	1.79E+05	1.51E+05	1.82E+05	1.72E+05	1.89E+05	1.88E+05	1.40E+05	2.49E+05	4.86E+06	5.17E+06	12.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Бикадиоида	1.86E+05	1.64E+05	1.80E+05	1.62E+05	1.96E+05	1.95E+05	1.37E+05	2.37E+05	4.86E+06	5.17E+06	12.1	-4.1	-8.3	0.9	5.7	-3.6	-3.7	2.3	4.9	0.0	0.1	4.8
Биклотоида	1.95E+05	1.71E+05	1.76E+05	1.57E+05	2.03E+05	2.03E+05	1.33E+05	2.35E+05	4.86E+06	5.17E+06	12.2	-9.3	-13.0	3.0	9.0	-7.5	-7.6	5.6	5.5	0.0	0.1	4.0
R10000 L4000																						
Стандарт	1.24E+05	1.18E+05	1.55E+05	9.59E+04	1.30E+05	1.30E+05	7.36E+04	1.66E+05	3.88E+06	4.14E+06	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Бикадиоида	1.38E+05	1.27E+05	1.54E+05	1.07E+05	1.46E+05	1.46E+05	9.08E+04	1.88E+05	3.87E+06	4.14E+06	10.3	-11.1	-7.6	0.8	-11.5	-12.2	-12.1	-23.3	-13.3	0.1	0.0	3.6
Биклотоида	1.48E+05	1.35E+05	1.52E+05	1.02E+05	1.55E+05	1.54E+05	8.87E+04	1.91E+05	3.87E+06	4.14E+06	10.4	-18.9	-13.9	2.2	-6.7	-18.8	18.8	-20.5	-15.4	0.1	-0.1	2.6

Сведения об авторах:

Артем Викторович Чонка,

аспирант кафедры «Путь и железнодорожное строительство»
Уральского государственного университета путей сообщения

Айдар Рафатович Исламов,

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Путь и железнодорожное строительство»
Уральского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Artem V. Chonka,

postgraduate student of Railway Construction and Railway Track
Department, Ural State University of Railway Transport

Aydar R. Islamov,

PhD in Engineering, Associate Professor
of Railway Construction and Railway Track Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Величко Г. В., Филиппов В. В. Нормирование переходных кривых и контроль плавности трассы // Дороги и мосты. 2006. № 4.
2. Величко Г. В., Филиппов В. В. Сравнительные свойства переходных кривых. URL: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/28ba3ec2-3d4d-4087-b8d8-a24a7de6296a> (дата обращения: 10.10.2024).
3. Белятинский А. А., Таранов А. М. Проектирование кривых при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. Киев : Выща школа, 1988. 302 с.
4. Белятинский А. А., Чешуйко В. Н. Проектирование переходных кривых при реконструкции автомобильных дорог // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2007. № 2 (25). С. 34–36.
5. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Каргапольцев Д. В. Инновации в геометрии трассы // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2019. № 4 (21). С. 40–43. ISSN 2415-8658.
6. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Биклотоидное проектирование криволинейных участков железной дороги // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 10. С. 20–30. ISSN 0033-4715.
7. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Метод снижения затрат на содержание криволинейных участков пути // Железнодорожный транспорт. 2011. № 5. С. 41–42. ISSN 0044-4448.
8. Аккерман Г. Л., Кошелев Д. А. Оценка возможности применения биклотоидного проектирования смежных кривых для движения высокоскоростных и тяжеловесных поездов методом имитационного моделирования // Железнодорожный транспорт. 2012. № 5. С. 3–9. ISSN 0044-4448.
9. Прокопьева О. А., Журавская М. А. К вопросу создания энергосберегающих элементов транспортно-логистической инфраструктуры на примере биклотоидного проектирования // Инновационный транспорт. 2017. № 1. С. 3–7. DOI:10.20291/2311-164X-2017-1-3-7.
10. Специальные технические условия. Проектирование участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Казань — Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч, № 14574-ЛС/03. Минстрой России, 2017.
11. Чонка А. В. Расчет параметров кадиоидных кривых // Транспорт: логистика, строительство, эксплуатация, управление : сборник трудов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 18 мая 2023 г. Екатеринбург : УрГУПС, 2023. Вып. 7 (255). С. 93–98.
12. Чонка А. В. Расчет параметров бикадиоидных кривых // Железнодорожный транспорт и технологии. 2024. № 1 (256). С. 155–159.
13. Проектирование высокоскоростных специализированных железнодорожных магистралей / И. И. Кантор, В. А. Копыленко, В. Ю. Козлов, Л. В. Элькина. Москва : МИИТ, 1996. 67 с.
14. Программный комплекс «Универсальный механизм» (UM). URL: <http://www.universalmechanism.com/> (дата обращения: 10.10.2024).
15. Аккерман Г. Л., Кравченко О. А. Сравнительный анализ переходных кривых с прямым и S-образным отводом возвышения // Вестник СГУПС. 2010. № 22. С. 82–86. ISSN 1815-9265.
16. European Committee for Standardization Brussels. CEN Railway Applications Ride Comfort for Passengers Measure and Evaluation. EN 12299:2009.
17. Persson R. Tilting trains: Benefits and motion sickness // Journal of Rail and Rapid Transit. 2008. No. 224 (6). Pp. 5213–5222.

References

1. Velichko G. V., Filippov V. V. Standardization of transition curves and control of route smoothness. *Roads and bridges*. 2006. No. 4. (In Russian).
2. Velichko G. V., Filippov V. V. Comparative properties of transition curves. URL: <http://www.credo-dialogue.com/getattachment/28ba3ec2-3d4d-4087-b8d8-a24a7de6296a> (access date: 10.10.2024). (In Russian).
3. Belyatynsky A. A., Taranov A. M. Design of curves in the construction and reconstruction of highways. Kyiv : Higher School, 1988. 302 p. (In Russian).
4. Belyatynsky A. A., Cheshuyko V. N. Design of transition curves in the reconstruction of highways. *Automated technologies of surveys and design*. 2007. No. 2 (25). Pp. 34–36. (In Russian).
5. Akkerman G. L., Akkerman S. G., Kargapoltsev D. V. Innovations in track geometry. *Transport of the Asia-Pacific region*. 2019. No. 4 (21). Pp. 40–43. ISSN 2415-8658. (In Russian).
6. Akkerman G. L., Akkerman S. G., Kravchenko O. A. Biclothoid design of curved railway sections. *Railway Track and Facilities*. 2010. No. 10. Pp. 20–30. ISSN 0033-4715. (In Russian).
7. Akkerman G. L., Akkerman S. G., Kravchenko O. A. Method for reducing the costs of maintaining curved track sections. *Railway Transport*. 2011. No. 5. Pp. 41–42. ISSN 0044-4448. (In Russian).
8. Akkerman G. L., Koshelev D. A. Evaluation of the possibility of using biclothoid design of adjacent curves for the movement of high-speed and heavy-haul trains using the simulation modeling method. *Railway Transport*. 2012. No. 5. Pp. 3–9. ISSN 0044-4448. (In Russian).
9. Prokop'eva O. A., Zhuravskaya M. A. On the issue of creating energy-saving elements of the transport and logistics infrastructure on the example of biclotoid projecting. *Innotrans*. 2017. No. 1. Pp. 3–7. DOI:10.20291/2311-164X-2017-1-3-7. (In Russian).
10. Special technical conditions. Design of the Moscow — Kazan section of the Moscow — Kazan — Ekaterinburg high-speed railway with speeds of up to 400 km/h, No. 14574-LS/03. Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, 2017. (In Russian).
11. Chonka A. V. Calculation of parameters of biclothoid curves. *Transport: logistics, construction, operation, Management* : proceedings of International scientific and practical conference, Ekaterinburg, May18, 2023. Ekaterinburg : USURT, 2023. Issue 7 (255). Pp. 93–98. (In Russian).
12. Chonka A. V. Calculation of parameters of bi-cadal curves. *Railway transport and technologies*. 2024. No. 1 (256). Pp. 155–159. (In Russian).
13. Kantor I. I., Kopylenko V. A., Kozlov V. Yu., Elkina L. V. Design of high-speed specialized railway lines. Moscow : MIIT, 1996. 67 p. (In Russian).
14. Software package «Universal mechanism» (UM). URL: <http://www.universalmechanism.com/> (access date: 10.10.2024). (In Russian).
15. Akkerman G. L., Kravchenko O. A. Comparative analysis of transition curves with straight and S-shaped elevation bends. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2010. No. 22. Pp. 82–86. ISSN 1815-9265. (In Russian).
16. European Committee for Standardization Brussels. CEN Railway Applications Ride Comfort for Passengers Measure and Evaluation. EN 12299:2009.
17. Persson R. Tilting trains: Benefits and motion sickness. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2008. No. 224 (6). Pp. 5213–5222.



Научная статья

УДК 621.311

Разработка модели распределения потенциала и растекания тока в поперечном сечении пути

Владислав Артемович Третьяков¹, Александр Викторович Паранин¹¹Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Development of model of potential distribution and current flow in the cross-section of the track

Vladislav A. Tretyakov¹, Alexander V. Paraniin¹¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Аннотация

В статье представлена разработка модели распределения потенциала и растекания тока в поперечном сечении рельсового пути, что имеет большое значение для обеспечения электробезопасности и надежности железнодорожной инфраструктуры. Основное внимание уделено моделированию переходного сопротивления «рельс — земля» и исследованию влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на распределение тягового тока. Моделирование выполнялось при помощи программы COMSOL Multiphysics с использованием метода конечных элементов, что позволило сделать детализированный анализ сложных физических процессов. Результаты исследования показали, что конструкция шпал и балластной призмы оказывает значительное влияние на распределение тягового тока и на величину переходного сопротивления «рельс — земля».

Ключевые слова: рельсовый путь, растекание тока, переходное сопротивление, COMSOL Multiphysics, моделирование, метод конечных элементов

Abstract

The article presents the development of a model of potential distribution and current flow in the cross-section of a rail track, which is of great importance for ensuring electrical safety and reliability of railway infrastructure. The main attention is paid to the modeling of the «rail — ground» transient resistance and the study of the influence of design and operational factors on the distribution of traction current. The simulation was carried out using the COMSOL Multiphysics program using the finite element method, which made it possible to perform a detailed analysis of complex physical processes. The results of the study showed that the design of sleepers and ballast prism has a significant effect on the distribution of traction current and on the value of the «rail — ground» transient resistance.

Keywords: rail track, current flow, transient resistance, COMSOL Multiphysics, modeling, finite element method

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-100-105

ВВЕДЕНИЕ

Рельсовый путь играет ключевую роль в железнодорожной инфраструктуре, обеспечивая механическую поддержку поездов и выполняя функцию проводника обратного тягового тока в системах электроснабжения. Кроме того, рельсы могут быть источником утечек тока в землю, что определяется их потенциалом, сопротивлением, а также переходным сопротивлением «рельс — земля» и погодными условиями [1]. Утечки проходят через разные элементы инфраструктуры, включая металлические соединения, шурупы, подкладки и заземлители. На линиях с постоянным током заземление осуществляется при помощи искровых промежутков или газоразрядных приборов, предназначенных для защиты металлических и железобетонных конструкций от электрокоррозии [2, 3]. С ростом нагрузки на систему электроснабжения из-за увеличения массы и скорости поездов проблема утечек тока становится все более актуальной, так как влияет на надежность и безопасность инфраструктуры [4].

В статье рассматривается распределение потенциала и растекания тока в поперечном сечении пути, оказывающее воздействие на электробезопасность и на величину переходного сопротивления «рельс — земля». От этого параметра существенно зависит работа всей обратной тяговой сети, однако его величина может значительно изменяться в процессе эксплуатации [5], что во многом определяется конструкцией и состоянием верхнего и нижнего строения пути. Например, в статье [6] показано, что переходное сопротивление «рельс — земля» зависит от состояния балласта и наличия геотекстиля, а в монографии [7] отмечено, что наибольшее влияние на него оказывает изоляция рельсов от шпал. Исследовать влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на распределение потенциала и растекание тягового тока в поперечном сечении пути, а также на величину переходного сопротивления «рельс — земля» от утечки через шпалу позволит разработка соответствующей модели.

ГЕОМЕТРИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ УРАВНЕНИЯ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

Для моделирования распределения тока и для оценки величины утечек наиболее эффективным является использование сеточных методов. Эти методы представляют собой численные подходы к решению дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают процессы протекания электрического тока в сложных структурах. Среди множества существующих численных методов особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ), широко применяемый в том числе для анализа электромагнитных и электрических полей [8, 9].

В рамках нашего исследования для моделирования процесса распространения тока в поперечном сечении пути использовалась основанная на МКЭ программа COMSOL Multiphysics, позволяющая создавать детализированные математические модели сложных физических систем и проводить их численный анализ с высокой степенью точности.

Одним из важных аспектов моделирования поперечного сечения пути является параметризация геометрии объектов, с помощью которой можно исследовать и анализировать различные сценарии эксплуатации железнодорожного пути. Параметризация обеспечивает гибкость модели, делая ее универсальным инструментом, позволяющим изучать множество конструктивных решений и их влияние на распределение электрических токов в поперечном сечении пути.

Параметризация геометрии дает возможность моделировать различные конфигурации железнодорожного пути, такие как однопутные и двухпутные участки, участки на насыпи или в выемке, участки с нулевыми отметками, где рельсы располагаются на уровне земли. Каждый из этих сценариев имеет свои особенности, которые могут существенно влиять на распределение потенциала и токов в системе. В модели для исследования эксплуатационных условий можно изменять такие параметры, как размеры балластного слоя, высота насыпи, глубина выемки и др. Например, на рис. 1а представлена

вся расчетная область, использованная для моделирования, на рис. 1б — двухпутный участок с выемкой, на рис. 1в — однопутный участок с насыпью, на рис. 1г — двухпутный участок с нулевым местом, полученные в результате параметризации геометрии объектов.

Для выполнения расчетов и моделирования процесса распределения обратного тягового тока в качестве типового примера железнодорожной инфраструктуры, представляющего собой сложную конструкцию, включающую несколько различных компонентов, нами был выбран однопутный участок железнодорожной линии, расположенный на насыпи.

Распределение потенциала и растекание тока в поперечном сечении пути описывается уравнениями неразрывности электрического тока:

$$\operatorname{div}(J) = 0; \quad (1)$$

$$J = \frac{E}{r}; \quad (2)$$

$$E = \operatorname{grad}(U), \quad (3)$$

где J — вектор плотности тока, A/m^2 ; E — вектор напряженности электрического поля, V/m ; U — электрический потенциал, V .

На рис. 2а, иллюстрирующем исследуемую расчетную область, подробно изображены основные элементы конструкции железнодорожного пути — рельсы, шпалы, балластный слой, геотекстиль и земля. Все они обладают уникальными физическими свойствами, которые были учтены при построении математической модели. Например, для каждого элемента заданы соответствующие материалы в зависимости от удельного сопротивления и других электрических характеристик, приведенных в табл. 1. Эти параметры играют ключевую роль в решении дифференциальных уравнений, описывающих распространение электрического тока в поперечном сечении пути.

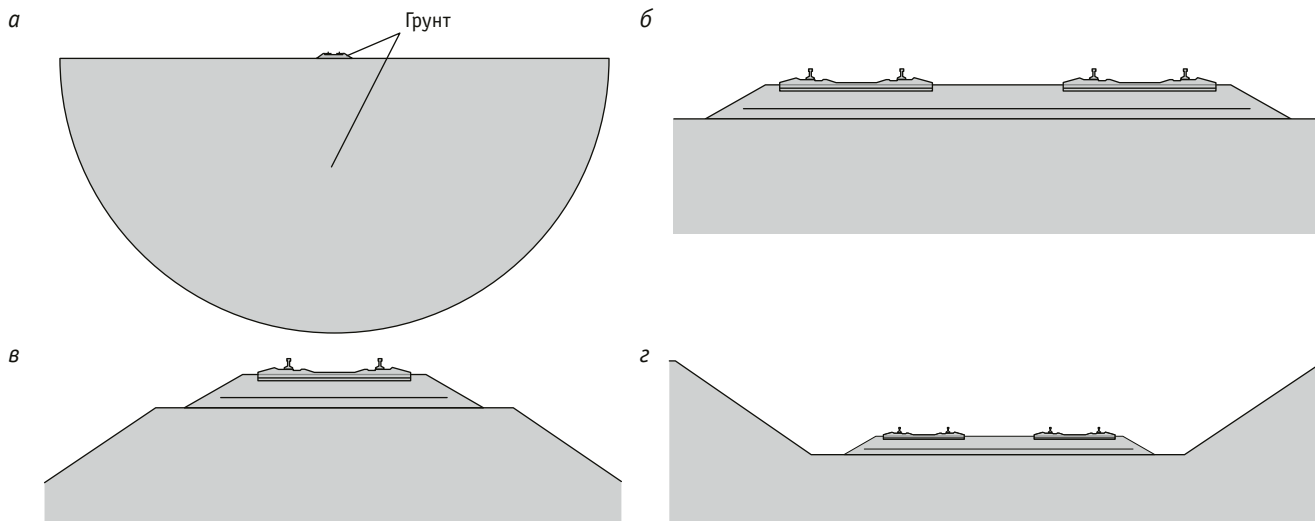


Рис. 1. Геометрия расчетной области:

а — вся расчетная область; б — часть расчетной области на двухпутном участке с выемкой; в — часть расчетной области на однопутном участке с насыпью; г — часть расчетной области на двухпутном участке с нулевым местом

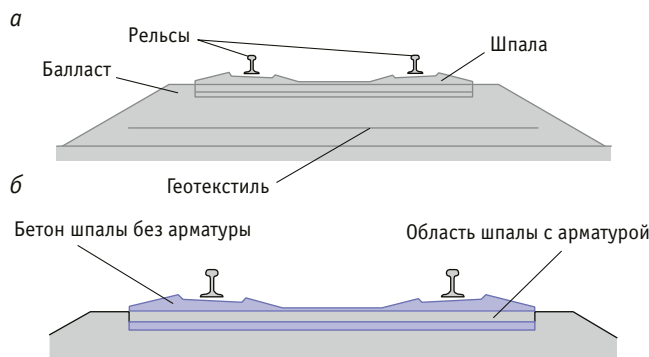


Рис. 2. Область вблизи балластной призмы:

а — часть расчетной области; б — шпала без арматуры и область шпалы с арматурой

Таблица 1

Удельное электрическое сопротивление некоторых элементов расчетной области

№ п/п	Элемент расчетной области	Величина сопротивления, Ом·м
1	Стальные рельсы	$2,1 \cdot 10^{-7}$
2	Бетон шпал без арматуры	3000
3	Бетон шпал с арматурой	$2,8648 \cdot 10^{-5}$ (вдоль оси x) 2400 (вдоль оси y)
4	Балласт	3000
5	Грунт	250

При проектировании железнодорожного пути особое внимание уделяется конструкции балластной призмы, так как она оказывает значительное влияние на эксплуатационные характеристики всей системы. Одно из ключевых требований к балластной призме — обеспечение превышения площади геотекстиля над площадью железнодорожного полотна.

Что касается шпал, они также являются важным элементом, существенно влияющим на электромагнитные процессы, происходящие в зоне пути. Шпалы представляют собой сложные конструктивные элементы, которые состоят из двух основных частей — области с арматурой и области без арматуры. Эти области имеют разные электрические свойства, что необходимо учитывать при моделировании.

Бетон, используемый для изготовления шпал, обладает различной проводимостью в зависимости от наличия арма-

туры. Область шпалы без арматуры является изотропной, т.е. обладает одинаковой электрической проводимостью во всех направлениях. В такой области токи распределяются равномерно, и предпочтительных направлений для их протекания не возникает.

Однако в зоне шпалы с арматурой армированный бетон характеризуется анизотропными свойствами — его проводимость значительно различается в продольном и поперечном направлениях. Арматура, расположенная вдоль шпалы, существенно снижает продольное сопротивление, благодаря чему электрические токи легче протекают вдоль шпалы. В то же время поперечное сопротивление в этой области остается более высоким, что затрудняет прохождение тока поперек шпалы. Таким образом, продольное сопротивление в армированной области шпалы значительно ниже, чем поперечное, что делает прохождение тока вдоль шпалы более предпочтительным, в то время как прохождение тока поперек шпалы становится затруднительным. На рис. 2б представлена схема шпалы, включающая и область с арматурой, и область без арматуры. Также на рис. 3 представлены граничные условия расчетной области.

Для рассматриваемой модели были заданы условия, которые показывают, что за ее границами ток возникнуть не может. Поверхностная проводимость для линии геотекстиля рассчитывалась следующим образом:

$$n \cdot J = \frac{1}{\rho_s} \cdot (V_2 - V_1), \quad (4)$$

где ρ_s — поверхностное сопротивление геотекстиля, Ом · м².

Напряжение на подошве шпал определялось по уравнению

$$U_{ш} = U_p - \frac{I_{изол.р} \cdot R_{изол.р}}{2}, \quad (5)$$

где U_p — напряжение рельса, В; $I_{изол.р}$ — ток, проходящий через изоляцию рельсов, А; $R_{изол.р}$ — сопротивление изоляции между рельсом и шпалой, Ом.

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Один из ключевых этапов моделирования с использованием МКЭ — построение расчетной сетки. Она представляет собой разбиение исходной геометрической модели на множество мелких элементов, что позволяет более точно аппроксимировать сложные физические процессы, протекающие в системе [10]. В рассматриваемой модели, представленной на рис. 4,

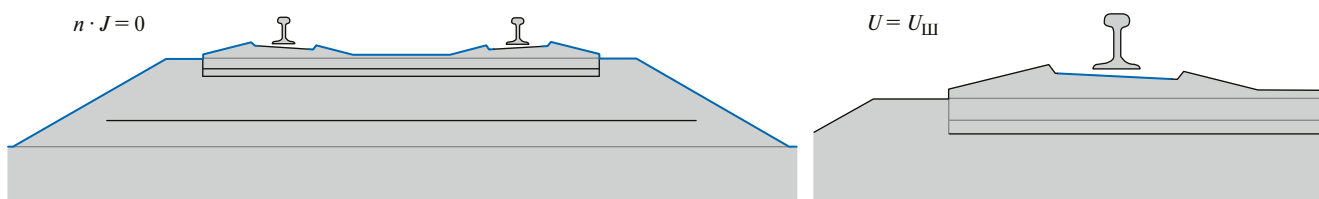


Рис. 3. Граничные условия расчетной области

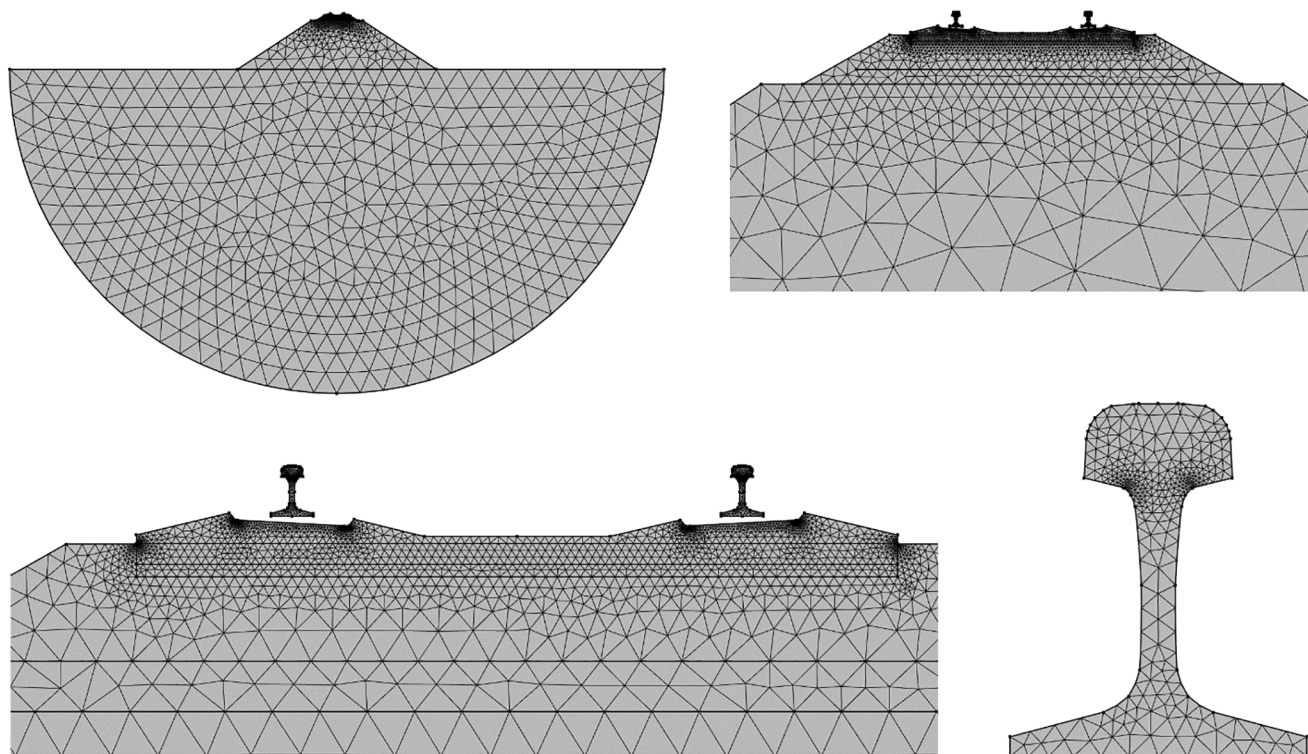


Рис. 4. Расчетная сетка

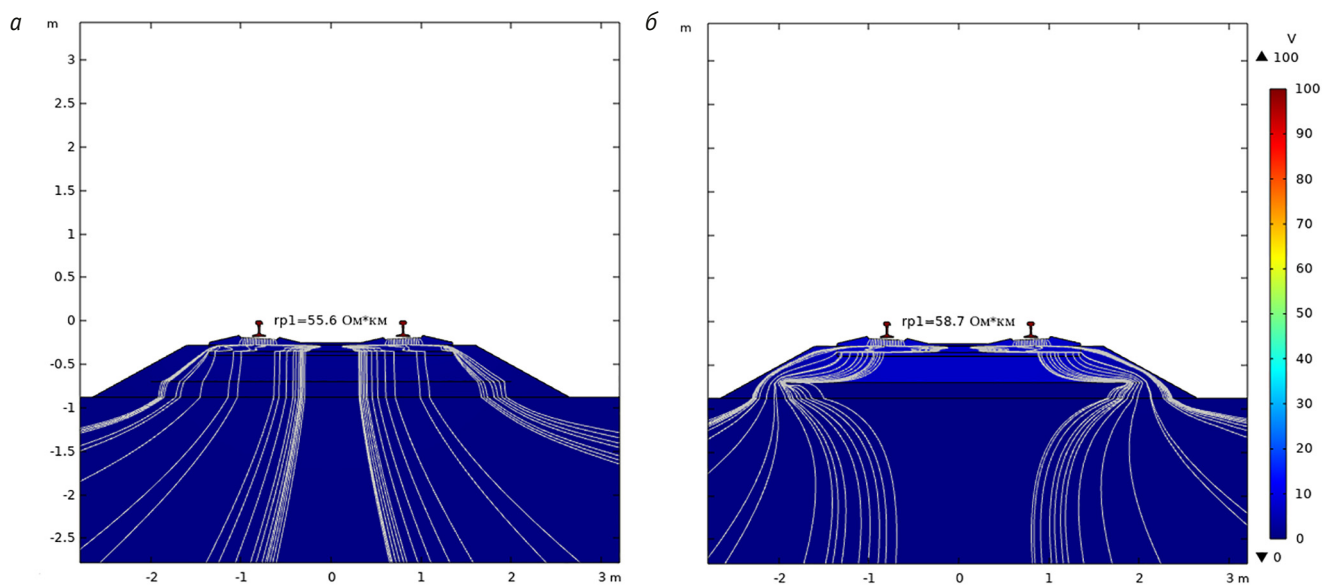


Рис. 5. График распределения тягового тока при удельном контактном поверхностном сопротивлении геотекстиля:
 $a - r_s = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$; $b - r_s = 100000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$

в качестве элементарных ячеек использованы треугольники, которые хорошо подходят для моделирования плоских объектов сложной формы. Внутри каждого треугольника поле потенциала и другие физические величины аппроксимируются с помощью полиномиальных функций. Эти функции описывают деформацию или изменение других параметров объекта в каждой из двух координатных осей.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 5 представлены графики, показывающие распределение тягового тока. Эти графики наглядно иллюстрируют поведение токовых линий — траекторий, по которым движется электрический ток. Линии тока представляют собой вектор плотности тока, направленный по касательной к каждому конкретному участку траектории. Анализ этих линий позволяет понять,

как именно распределяется ток внутри поперечного сечения пути и как он взаимодействует с различными элементами, такими как арматура в шпалах, геотекстиль и балластный слой.

Когда тяговый ток достигает области, содержащей арматуру, происходит его значительное растекание вдоль шпалы. Область шпал с арматурой, обладая низким продольным сопротивлением, создает благоприятные условия для протекания тока в продольном направлении. В результате ток быстро распространяется вдоль шпалы, после чего большая его часть вытекает в одну или другую сторону. Далее ток обходит геотекстиль, который хотя и оказывает определенное сопротивление, но не является существенным барьером для дальнейшего распространения тока. В конечном счете ток растекается в земле, проходя через балласт и достигая окружающий грунт.

Важно отметить, что количество тока, покидающего сопротивление изоляции, должно быть эквивалентно количеству тока, стекающего в землю. Таким образом, анализ рис. 5 позволяет сделать вывод, что основные пути растекания тягового тока определяются конструкцией шпал и сопротивлением материалов.

В процессе моделирования и анализа поперечного сечения пути было установлено, что поверхностное сопротивление геотекстиля играет значительную роль в определении траекторий протекания тягового тока. Увеличение значения этого параметра существенно затрудняет прохождение тока через геотекстиль, заставляя находить альтернативные пути растекания. В результате ток вынужден обходить области с высоким сопротивлением и следовать по маршрутам, где сопротивление ниже, что влияет на общую электрическую характеристику системы. Результаты, полученные при исследовании влияния изменения поверхностного сопротивления геотекстиля на распределение тягового тока и сопротивление под шпалами, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние удельного поверхностного контактного сопротивления геотекстиля на переходное сопротивление от элементов ниже изоляции шпал

Поверхностное контактное сопротивление геотекстиля, Ом·м ²	Переходное сопротивление от элементов ниже изоляции шпал, Ом·м
1000	1597,2
10000	2879,2
100000	4662,9

Как видно из табл. 2, поверхностное контактное сопротивление геотекстиля в диапазоне до 1000 Ом·м² оказывает лишь незначительное влияние на переходное сопротивление ниже изоляции шпал. Однако при значениях сопротивления, превышающих 10000 Ом·м², наблюдается существенное увеличение переходного сопротивления. Это свидетельствует о том, что при высоких значениях контактного поверхностного сопротивления геотекстиля тяговый ток сложнее проходит че-

рез этот слой, что приводит к обтеканию геотекстиля и, как следствие, к изменению общего распределения токов в поперечном сечении пути.

Изменения переходного сопротивления, обусловленные элементами, расположенными ниже изоляции шпал, от величины контактного поверхностного сопротивления геотекстиля представлены на рис. 6.

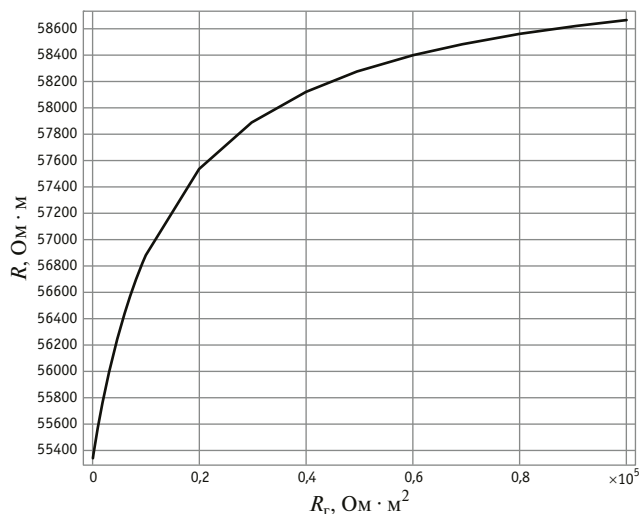


Рис. 6. График изменения части переходного сопротивления, вызванного элементами, расположенными ниже изоляции шпал, от величины контактного поверхностного сопротивления геотекстиля

Переходное сопротивление «рельс — земля» рассчитывается по уравнению

$$R = \frac{U_p}{I_{\text{изол.р}} \cdot L_{\text{м.ш}}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{м.ш}}$ — расстояние между осями соседних шпал, м.

Переходное сопротивление «рельс — земля» через шпалы определяется следующим образом:

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{обл.ш}} + R_{\text{изол.ш}}; \quad (7)$$

$$R_{\text{изол}} = 0,5 \cdot R_{\text{изол.ш}} + L_{\text{м.ш}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{обл.ш}}$ — переходное сопротивление от элементов ниже изоляции шпал, Ом; $R_{\text{изол.ш}}$ — сопротивление изоляции шпалы, Ом.

Часть переходного сопротивления, обусловленная элементами ниже изоляции шпал, зависит от сопротивления и высоты балласта, от наличия геотекстиля и его параметров. В то же время сопротивление $R_{\text{ш}}$ от данных факторов не зависит.

ВЫВОДЫ

В ходе исследования была разработана и успешно протестирована модель, позволяющая детально анализировать распределение потенциала и тока в поперечном сечении рельсового пути. Установлено, что такие факторы, как поверхностное сопротивление геотекстиля и конструкция шпал, существен-

но влияют на величину переходного сопротивления «рельс — земля», повышение сопротивления геотекстиля затрудняет прохождение тягового тока, что приводит к изменению его распределения в системе. Модель не только позволяет точно определять значения этого сопротивления в различных эксплуатационных условиях, но и служит основой для дальнейшей аппроксимации переходного сопротивления. Такая ап-

проксимация может быть интегрирована в другие программные комплексы, используемые при проектировании и анализе поперечного сечения пути. В целом разработанная модель представляет собой эффективный инструмент для изучения и оптимизации электроснабжения железнодорожного транспорта, а также для обеспечения электробезопасности и надежности инфраструктуры.

Сведения об авторах:

Владислав Артемович Третьяков,

аспирант кафедры «Электроснабжение транспорта»
Уральского государственного университета путей сообщения

Александр Викторович Паранин,

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроснабжение транспорта» Уральского
государственного университета путей сообщения

Authors information:

Vladislav A. Tretyakov,

postgraduate student of Transport Power Supply Department,
Ural State University of Railway Transport

Alexander V. Pararin,

PhD in Engineering, Associate Professor
of Transport Power Supply Department,
Ural State University of Railway Transport

Литература

1. Косарев А. Б., Косарев Б. И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. Москва : Интекст, 2008. 480 с.
2. Инструкция по заземлению устройств энергоснабжения на электрифицированных железных дорогах : утв. Министерством путей сообщения Российской Федерации 10.06.1993 г. ЦЭ-191. Москва, 1993. 68 с.
3. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 г. № 1047/р (в ред. от 19.01.2023 г. № 91/р). Москва, 2024. 80 с.
4. Лунев С. А., Ходкевич А. Г., Сероштанов С. С. В рамках организации тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. 2015. № 11. С. 62–63. ISSN 0044-4448.
5. Наумов А. В., Наумов А. А. Потенциал рельсов и электробезопасность // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 5. С. 20–23. ISSN 3034-3194.
6. Горенбейн Е. В. Определение, методы измерения и контроля первичных параметров рельсовой линии // Наука и техника транспорта. 2010. № 4. С. 37–47. ISSN 2074-9325.
7. Бушуев А. В., Бушуев В. И., Бушуев С. В. Рельсовые цепи: теоретические основы и эксплуатация. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. 312 с.
8. Секулович М. Метод конечных элементов. Москва : Стройиздат, 1993. 664 с.
9. Бате К. Ю. Методы конечных элементов. Москва : Физматлит, 2010. 1024 с.
10. Лесников Д. В. Совершенствование тяговых сетей постоянного тока с помощью протяженных заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2018. 279 с.

References

1. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Fundamentals of electromagnetic safety of railway power supply systems. Moscow : Intext, 2008. 480 p. (In Russian).
2. Instructions for grounding power supply devices on electrified railways : approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 10.06.1993 TsE-191. Moscow, 1993. 68 p. (In Russian).
3. Instructions for maintenance and repair of contact network support structures : approved by the Order of JSC RZD dated 18.04.2022 No. 1047/r (in edition dated 19.01.2023 No. 91/r). Moscow, 2024. 80 p. (In Russian).
4. Lunev S. A., Khodkevich A. G., Seroshtanov S. S. To assist heavy haulage. *Railway Transport*. 2015. No. 11. Pp. 62–63. ISSN 0044-4448. (In Russian).
5. Naumov A. V., Naumov A. A. Potential of rails and electrical safety. *Automation, communication, informatics*. 2014. No. 5. Pp. 20–23. ISSN 3034-3194. (In Russian).
6. Gorenbein E. V. Definition, methods of measurement and control of primary parameters of a rail line. *Science and technology in transport*. 2010. No. 4. Pp. 37–47. ISSN 2074-9325. (In Russian).
7. Bushuev A. V., Bushuev V. I., Bushuev S. V. Rail circuits: theoretical foundations and operation. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2014. 312 p. (In Russian).
8. Sekulovic M. Finite element method. Moscow, 1993. 664 p. (In Russian).
9. Bathe K. J. Finite element procedures. Moscow, 2010. 1024 p. (In Russian).
10. Lesnikov D. V. Development of direct current traction power system with the use of extended grounding devices of catenary reinforced concrete poles : PhD in Engineering Thesis. Ekaterinburg, 2018. 279 p. (In Russian).

Объем статьи 0,69 авторских листа

Научная статья
УДК 621.332.3

Разработка вероятностной модели прогнозирования продолжительности гололедоопасного периода в границах дистанции электроснабжения

Александр Николаевич Смердин¹, Александр Владимирович Тарасенко¹,
Иван Евгеньевич Чертков¹, Антон Сергеевич Голубков¹

¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Development of a probabilistic forecasting model duration of the ice-hazardous period within the boundaries of the power supply distance

Alexander N. Smerdin¹, Alexander V. Tarasenko¹, Ivan E. Chertkov¹, Anton S. Golubkov¹

¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

В статье приведены условия и факторы, оказывающие непосредственное влияние на образование гололедных и изморозевых отложений на проводах контактной подвески. Отмечено негативное влияние гололеда на работу токосъемных устройств, обоснована необходимость его своевременного удаления. Рассмотрено прогнозирование продолжительности гололедоопасного периода (среднего числа дней с образованием гололеда), учитываемой в методике расчета количества вибропантографов, пневмобарабанов на железнодорожном подвижном составе и устройств для механической очистки гололеда в районах контактной сети в зависимости от районирования участков железных дорог. Показана возможность использования модели-классификатора на основе дерева принятия решений в случае недостаточности метеорологических данных наблюдений. Предложенная вероятностная модель прогнозирования продолжительности гололедоопасного периода позволяет с приемлемой погрешностью относительно фактических данных прогнозировать среднее количество дней образования гололеда на проводах контактной подвески при учете нескольких входных переменных.

Ключевые слова: контактная сеть, метеорологические условия, гололед, прогнозирование, гололедоопасный период, продолжительность, модель-классификатор, дерево принятия решений

Abstract

The article presents the conditions and factors that directly affect the formation of ice and frost deposits on contact suspension wires, notes the negative impact of ice on the operation of current collectors and substantiates the need for its timely removal, considers forecasting the duration of the icy period (the average number of days with ice formation), taken into account in the methodology for calculating the number of vibrating pantographs, pneumatic drums on railway rolling stock and devices for mechanical cleaning of ice in contact network areas depending on the zoning of railway sections. The possibility of using a classifier model based on a decision tree in case of insufficient meteorological observation data is shown. The proposed probabilistic model for forecasting the duration of the icy period allows predicting the average number of days with ice formation on contact suspension wires with an acceptable error relative to the actual data, taking into account several input variables.

Keywords: contact network, meteorological conditions, ice, forecasting, ice-hazardous period, duration, classifier model, decision tree

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-106-112

Одним из тяжелых режимов работы устройств системы тягового электроснабжения и токосъемных устройств является режим гололеда с ветром, при котором происходит увеличение нагрузок на провода и опорно-поддерживающие конструкции контактной сети, а также ухудшение условий токосъема (отрывы токоприемника от контактного провода, возникновение дуговых и искровых разрядов, автоколебания проводов контактной подвески и др.). Все это приводит к повышенному износу контактных элементов токосъемных устройств, пережогам и обрывам контактных проводов, повреждению токоприемников и, как следствие, к значительным экономическим потерям, вызванным задержками движения поездов и затратами на устранение повреждений.

Гололедно-изморозевые отложения образуются на проводах контактной подвески в холодное время года за счет оседания (конденсации) на них влаги (водяного пара), содержащейся в воздухе в виде тумана, изморози, дождя, или налипания на провода мокрого снега (переохлажденного дождя) [1, 2]. При этом образование гололеда может происходить в течение значительного периода времени, в связи с чем решение вопросов по его обнаружению и удалению с проводов контактной подвески в настоящее время остается актуальным.

При исследовании метеорологических условий образования гололеда в пределах Западной Сибири [3] определены необходимые факторы, к которым относятся: переохлажденный дождь, морось, туман или низкая слоистая облачность; инверсия в пограничном слое атмосферы; сочетание температуры воздуха у земли (от 0,5 до –3 °С) и на уровне АТ-850 (от –5 до +5 °С); температура воздуха на нижней границе первого слоя инверсии от –0,5 до –8 °С; суммарный дефицит точки росы в слое Земли 850 гПа ≤ 3–5 °С; очаг теплого воздуха на АТ-850 гПа. Однако в большинстве случаев регистрация указанных факторов затруднена и ограничивается техническим оснащением метеостанций.

На процесс образования гололедно-изморозевых отложений на проводах контактной подвески, кроме перечисленных выше факторов, влияет ряд дополнительных (рис. 1) [4],

обусловленных режимом работы и конструкцией устройств контактной сети или вероятностным характером возникновения.

В ОАО «Российские железные дороги» внедрены нормативные документы, направленные на обеспечение устойчивой работы устройств электроснабжения в зимних условиях [5, 6], к которым относится разработанная в Омском государственном университете путей сообщения совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта методика расчета необходимого количества вибропантографов, пневмобарабанов и устройств для механической очистки гололеда [7], введенная в действие в 2021 г. Она позволяет оценить достаточность оснащения структурных подразделений Трансэнерго и Дирекции тяги существующими средствами для удаления гололеда и эффективность их использования для предотвращения отказов устройств электроснабжения.

Одним из параметров, принимаемых в качестве исходных для расчета в указанной методике, является продолжительность гололедоопасного периода, которая определяется на основе статистических данных метеостанций и метеодатчиков Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [8] (рис. 2). Данные метеостанций содержат более 25 параметров, включающих информацию о температуре окружающей среды, атмосферном давлении, влажности воздуха, ветре, облачности, величине снежного покрова и др. Однако не на всех метеостанциях и не всегда ведется подробный и точный учет образования гололедно-изморозевых отложений, что затрудняет определение продолжительности гололедоопасного периода.

Из рис. 2 видно, что в границах некоторых подразделений Трансэнерго метеостанции отсутствуют — вместо них используются метеодатчики, которые фиксируют значительно меньшее количество параметров окружающей среды и не позволяют отследить наличие гололедно-изморозевых отложений. Кроме того, сами метеостанции достаточно удалены друг от друга и не все из них находятся в непосредственной близости от железной дороги.

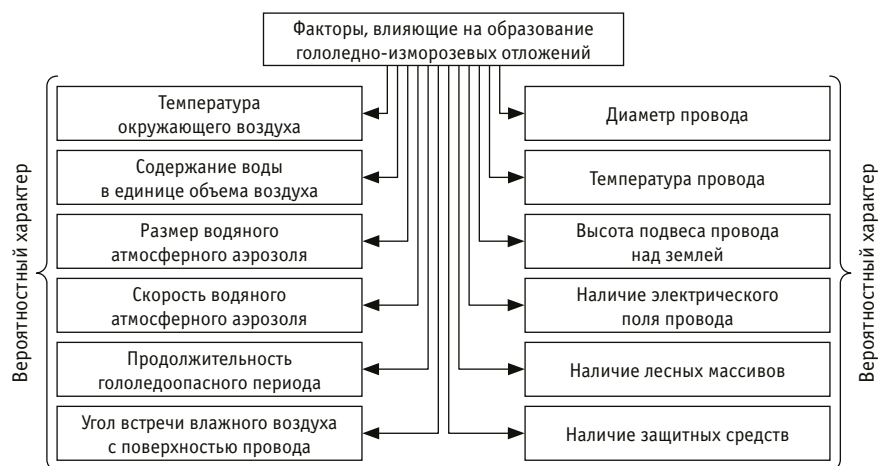


Рис. 1. Факторы, оказывающие влияние на образование гололеда на проводах контактной подвески

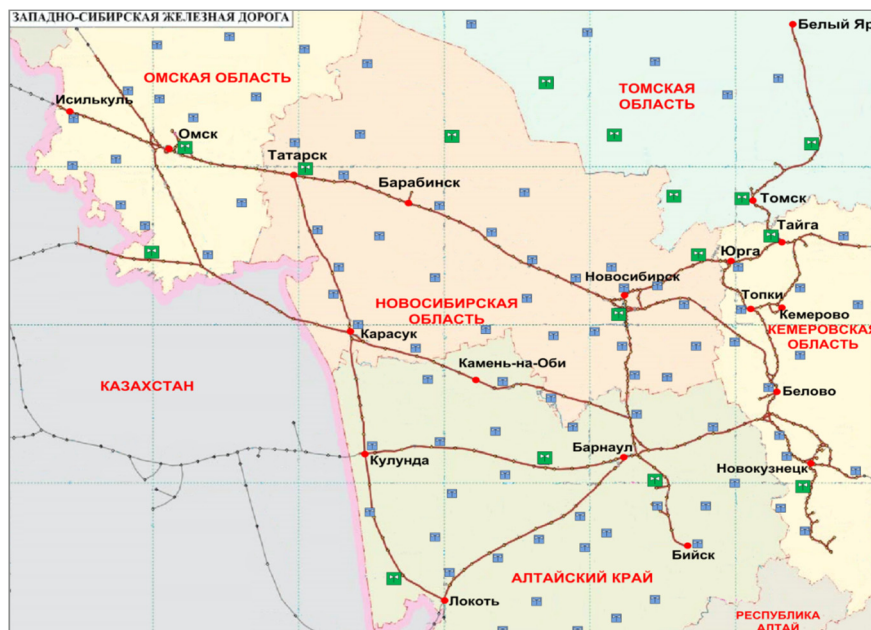


Рис. 2. Расположение метеостанций и метеодатчиков в границах Западно-Сибирской железной дороги

С учетом вышесказанного для определения продолжительности гололедоопасного периода (среднего количества дней с образованием гололеда) в случае недостаточности метеорологических данных наблюдений предлагается использовать модель-классификатор на основе дерева принятия решений (decision tree), дерева классификации, или регрессионного дерева, представляющего собой средство поддержки принятия решений, которое применяется в машинном обучении и анализе статистических данных [9, 10].

Структура дерева представляет собой совокупность следующих элементов: ветви, где записаны признаки, от которых зависит целевая функция; листья, на которых записаны значения целевой функции; остальные узлы, на которых записаны признаки, по которым различаются случаи. Таким образом, построенная на основании дерева принятия решений модель позволяет предсказывать значение целевой переменной на основе нескольких переменных на входе.

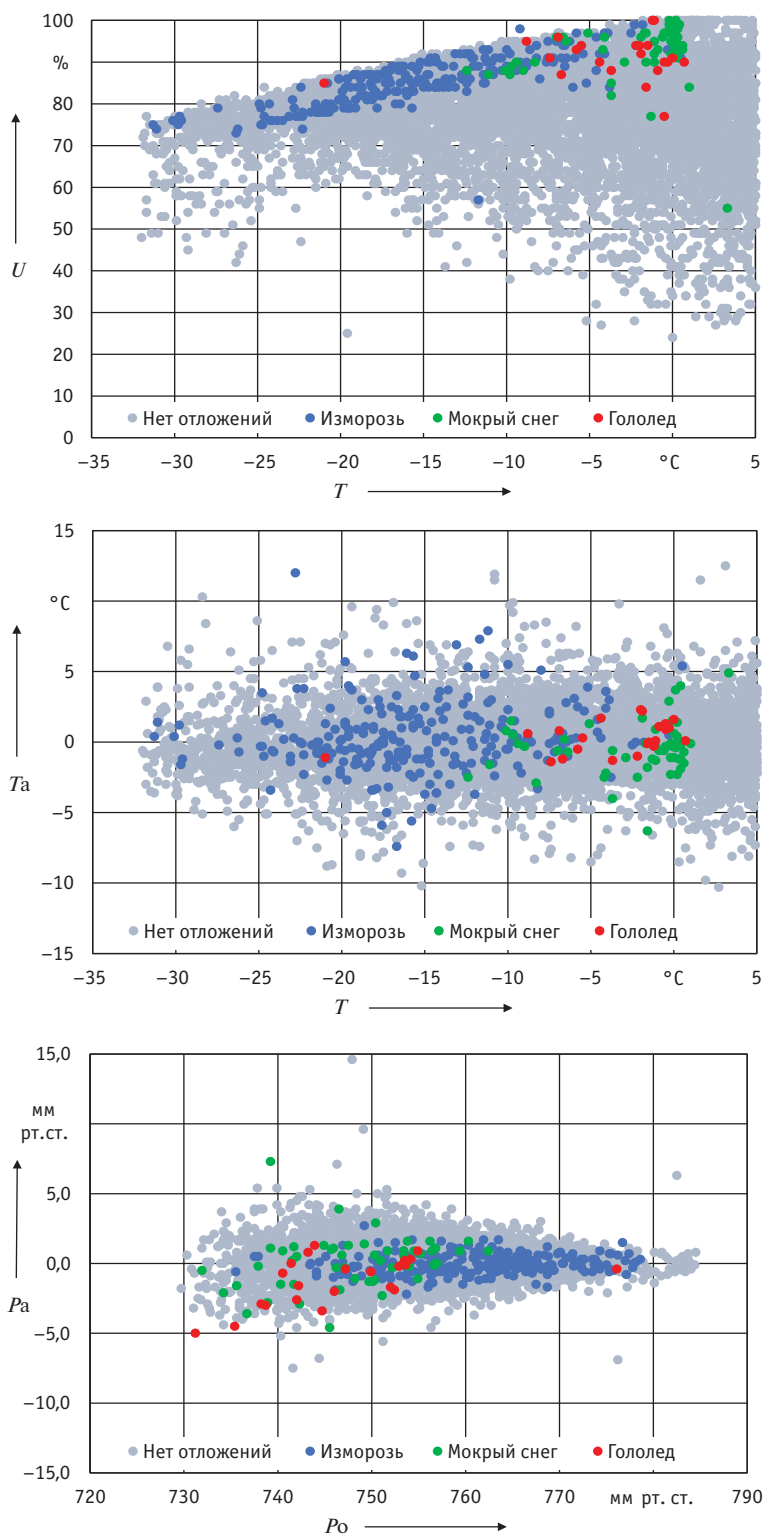


Рис. 3. Зависимости, построенные по наблюдениям с учетом гололедно-изморозевых отложений:

U — относительная влажность, %; T — температура воздуха, °C;
 T_a — изменение температуры воздуха за последние три часа, °C;
 P_o — атмосферное давление на уровне станции, мм рт. ст.; P_a — барическая тенденция, т. е. изменение атмосферного давления за последние 3 ч, мм рт. ст.

При интеллектуальном анализе статистических данных дерево принятия решений может использоваться в качестве математических и вычислительных методов, позволяющих классифицировать и обобщить данные, которые могут быть записаны следующим образом:

$$(x, Y) = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, Y). \quad (1)$$

В выражении (1) переменная Y представляет собой целевую переменную, которую необходимо проанализировать, классифицировать и обобщить с учетом входных переменных x_i , составляющих вектор x .

Проведенный анализ взаимосвязи факторов, влияющих на образование гололедно-изморозевых отложений, позволил определить основные параметры для расчета продолжительности гололедоопасного периода:

T_{\min} — минимальная температура воздуха, °C;

T_{\max} — максимальная температура воздуха, °C;

T_{mean} — средняя температура воздуха, °C;

P_{mean} — среднее атмосферное давление (мм рт. ст.);

U_{\min} — минимальная относительная влажность, %;

U_{\max} — максимальная относительная влажность, %;

U_{mean} — средняя относительная влажность, %;

Ff_{\max} — максимальная скорость ветра, м/с;

Ff_{mean} — средняя скорость ветра, м/с;

RRR_{sum} — количество выпавших осадков, мм.

В качестве примера на рис. 3 показано влияние различных факторов окружающей среды на образование гололедно-изморозевых отложений в границах Омской дистанции электроснабжения по данным метеорологических наблюдений по метеостанции г. Омск (номер 28698) за период с 01.01.2017 г. по 01.01.2022 г. [8].

Разработанное дерево принятия решений для определения продолжительности гололедоопасного периода представлено на рис. 4. Генерация дерева выполнялась при помощи рекурсивного бинарного разделения данных с оптимизацией индекса Джини (Gini index) [10].

На вход модели-классификатора подается информация о температуре воздуха, атмосферном давлении, относительной влажности, скорости ветра и количестве выпавших осадков, полученная по истории метеорологических наблюдений за несколько лет, а на выходе модели получается информация о наличии гололедно-изморозевых отложений (WW_{sum}).

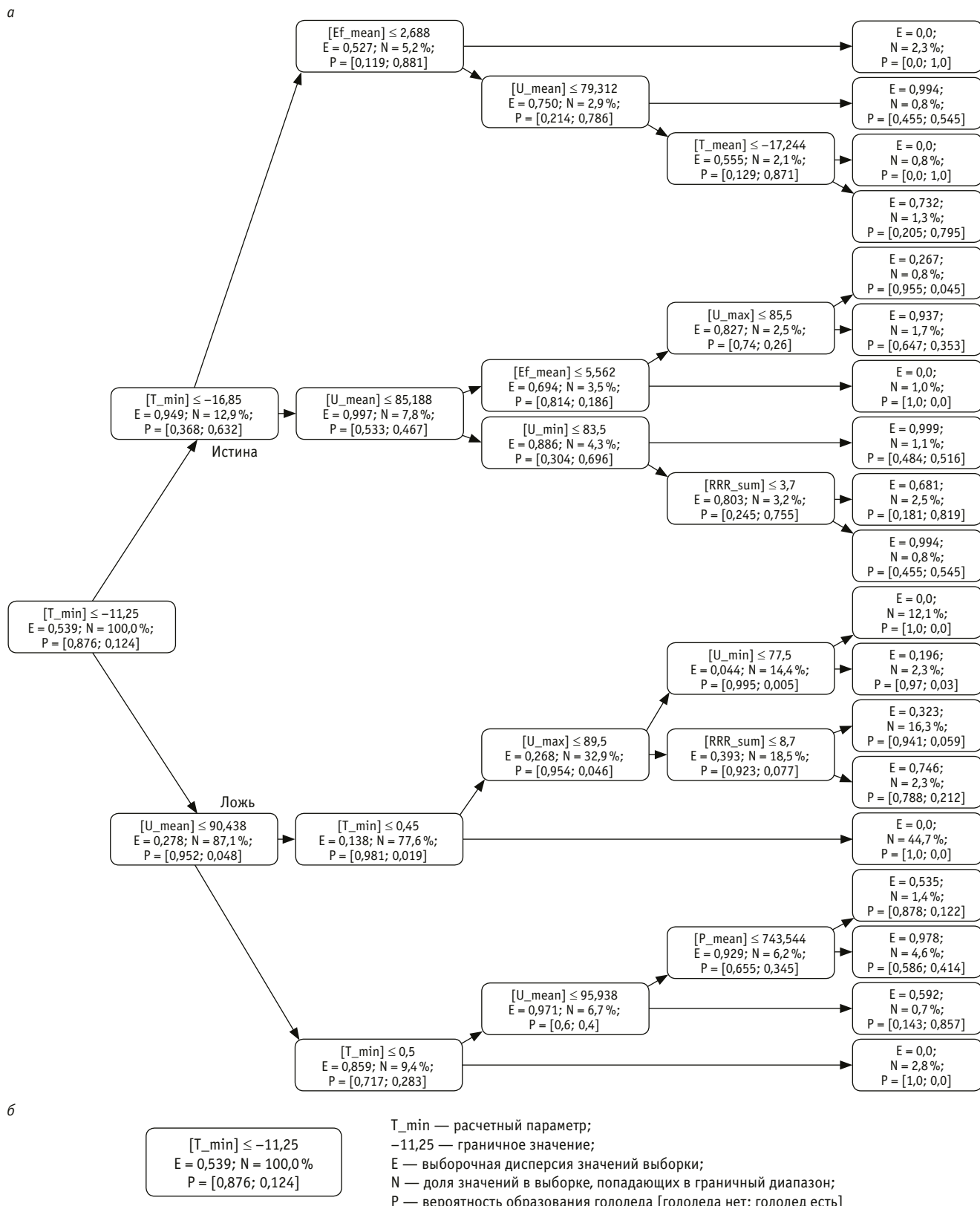


Рис. 4. Дерево принятия решений для определения продолжительности гололедоопасного периода:
 а — общий вид; б — принятые обозначения

Расчетное выражение для определения наличия гололедно-изморозевых отложений с помощью разработанного дерева принятия решений выглядит следующим образом:

$WW_sum = IF(T_min \leq -11,25; IF(T_min \leq -16,85;$
 $IF(Ff_mean \leq 2,69; \text{«Гололед»}; IF(U_mean \leq 79,31;$
 $IF(T_min \leq -26,95; \text{«Гололед»}; \text{«Нет гололеда»});$
 $IF(T_mean \leq -17,24; \text{«Гололед»}; \text{«Гололед»}));$
 $IF(U_mean \leq 85,19; IF(Ff_mean \leq 5,56;$
 $IF(U_max \leq 84,5; \text{«Нет гололеда»}; \text{«Нет гололеда»});$
 $\text{«Нет гололеда»}); IF(U_min \leq 83,5; IF(T_min \leq -14,35;$
 $\text{«Гололед»}; \text{«Нет гололеда»}); IF(RRR_sum \leq 4,1;$
 $\text{«Гололед»}; \text{«Нет гололеда»})); IF(U_mean \leq 90,44;$
 $IF(T_min \leq 0,45; IF(U_max \leq 89,5; IF(U_min \leq 77,5;$
 $\text{«Нет гололеда»}; \text{«Нет гололеда»}); IF(RRR_sum \leq 8,7;$
 $\text{«Нет гололеда»}; \text{«Нет гололеда»}));$
 $\text{«Нет гололеда»}; IF(U_min \leq 0,5; IF(U_min \leq 94,5;$
 $IF(P_mean \leq 740,74; \text{«Нет гололеда»};$
 $\text{«Нет гололеда»}); \text{«Гололед»}; \text{«Нет гололеда»})).$

С использованием разработанной вероятностной модели можно спрогнозировать продолжительность гололедоопасного периода для любых структурных подразделений Трансэнерго в случае недостаточности данных о наличии гололедно-изморозевых отложений.

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты расчетов применительно к дирекции по энергообеспечению Западно-Сибирской железной дороги.

В результате проведенного комплексного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Наличие гололедно-изморозевых отложений на проводах контактной подвески отрицательно влияет на ее параметры, а также на процесс токосяема, что может привести к повреждению и выходу из строя токоприемников электроподвижного состава или элементов контактной сети.

2. Важно оперативно выполнять мониторинг образования гололеда и его удаление различными способами. На железнодорожных участках, особенно при отсутствии возможности осуществления плавки гололеда с проводов контактной подвески или их профилактического подогрева, широко применяется механический способ, предусматривающий использование вибропантографов, пневмобарабанов и устройств для механической очистки гололеда.

3. Сравнение фактической продолжительности гололедоопасного периода за анализируемый период, проведенное для исследуемых дистанций электроснабжения, с результатами расчета по предложенной вероятностной модели показало их высокую сходимость (расхождение не превышает 10 %), что подтверждает возможность практического применения модели.

Таблица 1

Результаты расчета продолжительности гололедоопасного периода для дистанций электроснабжения Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению

Дистанция электроснабжения		Гололедный район	Индекс метеостанции	Учет отложений на метеостанции	Продолжительность гололедоопасного периода, дней	
					Данные наблюдений	Расчетные данные
Входная (ЭЧ-1)		II	28698	Имеется	27,2	29,5
Омск (ЭЧ-2)		II	28698	Имеется	27,2	29,5
Барабинск (ЭЧ-5)		III	29612	Не имеется	–	23,2
Новосибирск (ЭЧ-6)		II	29634	Не имеется	–	21,0
Тайга (ЭЧ-7)	Тайга — Томск	III	29430	Не имеется	–	32,4
	Остальные участки	II				
Инская (ЭЧ-8)	Черепаново — Евсино	III	29634	Не имеется	–	21,0
	Остальные участки	II				
Алтайская (ЭЧ-9)		III	29827	Не имеется	–	24,4
Камень-на-Оби (ЭЧ-13)	Световская — Краснозерская	II	29827	Не имеется	–	24,4
	Остальные участки	III				
Карасук (ЭЧ-14)	Купино — Табулга	III	29814	Имеется	7,0	7,4
	Остальные участки	II				
Кемерово (ЭЧ-16)		II	29645	Не имеется	–	31,2
Белово (ЭЧ-17)	Мереть — Полысаево	II	29645	Не имеется	–	31,2
	Остальные участки	III				
Новокузнецк (ЭЧ-18)		III	29842	Не имеется	–	11,2

4. Разработанная и апробированная вероятностная модель прогнозирования продолжительности гололедоопасного периода в границах дистанции электроснабжения может быть использована в целях определения продолжительности гололедоопасного периода при расчете требуемого в структурных подразделениях Трансэнерго и Дирекции тяги количества вибропантографов, пневмобараба-

нов и устройств механической очистки гололеда при недостаточности метеорологических данных наблюдений.

5. Предлагаемая модель может служить для управления профилактическим подогревом проводов контактной подвески на основании предиктивного анализа метеорологических данных.

6. Для повышения точности выдаваемого результата разработанная модель

прогнозирования продолжительности гололедоопасного периода может быть модифицирована в зависимости от количества входных параметров.

7. Полученные закономерности позволяют снизить потребность в метеостанциях с полным комплектом оборудования — достаточно будет некоторого их количества в зависимости от числа климатических зон.

Сведения об авторах:

Александр Николаевич Смердин,

доктор технических наук, первый проректор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Александр Владимирович Тарасенко,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Иван Евгеньевич Чертков,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Антон Сергеевич Голубков,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Alexander N. Smerdin,

DSc in Engineering, First Vice-rector, Vice-Rector for Scientific Work, Head of Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Alexander V. Tarasenko,

PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Ivan E. Chertkov,

PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Anton S. Golubkov,

PhD in Engineering, Associate Professor of Electric Power Supply of Railway Transport Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Калиниченко А. Я., Ковалев А. А., Кардаполов А. А. Предотвращение гололедообразования при токосъеме // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 3 (52). С. 176–183. ISSN 1992-3252.
2. Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: A review / F. Madaeni, R. Lhissou, K. Chokmani [et al.] // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.
3. Развить технологии детализированного численного краткосрочного прогноза метеорологических параметров, элементов и явлений погоды, включая опасные, по территории Сибири : отчет о НИР (закл.) / СибНИГМИ ; Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ; рук. М. Я. Здерева. Новосибирск, 2019. 56 с. № ГР АААА-А17-117022250099-8.
4. Titov D. E., Ugarov G. G., Soshinov A. G. Monitoring the Intensity of Ice Formation on Overhead Electric Power Lines and Contact Networks // Power Technology and Engineering. 2015. No. 49. Pp. 78–82.
5. Инструкция по подготовке к работе в зимний период и организации снегоборьбы на железных дорогах, в других филиалах и структурных подразделениях ОАО «РЖД», а также его дочерних и зависимых обществах : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.10.2013 г. № 2243/р (в ред. от 04.09.2018 № 1953/р). Москва : ОАО «РЖД», 2013.

References

1. Kalinichenko A. Ya., Kovalev A. A., Kardapolov A. A. Methods to prevent icing on systems of current collection of urban electric transport. *World of Transport and Transportation*. 2014. Vol. 12. No. 3 (52). Pp. 176–183. ISSN 1992-3252. (In Russian).
2. Madaeni F., Lhissou R., Chokmani K. [et. al.]. Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: A review. *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>.
3. To develop technologies for a detailed numerical short-term forecast of meteorological parameters, elements and weather phenomena, including dangerous ones, over the territory of Siberia : research report (final) ; SibNIGMI ; Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring ; M. Ya. Zdereva. Novosibirsk, 2019. 56 p. No. GR АААА-А17-117022250099-8. (In Russian).
4. Titov D. E., Ugarov G. G., Soshinov A. G. Monitoring the Intensity of Ice Formation on Overhead Electric Power Lines and Contact Networks. *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 49. Pp. 78–82.
5. Instructions for preparing of work in the winter period and organizing snow fighting on railways, in other branches and structural divisions of Russian Railways, as well as its subsidiaries and affiliates : approved by the Order of JSC «RZD» dated 22.10.2013 No. 2243/r (in edition dated 04.09.2018 No. 1953/r). Moscow : JSC «RZD», 2013. (In Russian).

6. Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электроснабжения в зимний период : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2019 г. № 2542/р (в ред. от 08.02.2021 № 220/р). Москва : ОАО «РЖД», 2019.
7. Методика расчета необходимого количества вибропантографов, пневмобарабанов на электровозах и устройств для механической очистки гололеда в районах контактной сети в зависимости от районирования участков железных дорог по толщине стенки гололеда : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 21.07.2021 г. № 1581/р. Москва : ОАО «РЖД», 2021.
8. Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков // Известия Транссиба. 2021. № 2 (46). С. 62–71. ISSN 2220-4245.
9. Breiman L. Classification and Regression Trees. New York : Routledge, 1984. 368 p.
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2009. 746 p.

6. Instructions for preparing of work and ensuring the reliability of power supply devices in winter : approved by the Order of JSC «RZD» dated 14.11.2019 No. 2542/r (in edition dated 08.02.2021 No. 220/r). Moscow : JSC «RZD», 2019. (In Russian).
7. Method for calculating the required number of vibropantographs, pneumatic drums on electric locomotives and devices for mechanical cleaning of ice in areas of the contact network, depending on the zoning of railway sections according to the thickness of the ice wall: approved by the Order of JSC «RZD» dated 21.07.2021 No. 1581/r. Moscow : JSC «RZD», 2021. (In Russian).
8. Smerdin A. N., Tarasenko A. V., Chertkov I. E., Golubkov A. S. Development of a probable failure prediction model in the operation of the current collection system due to ice formation on the wires of the contact network. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2021. No. 2 (46). Pp. 62–71. ISSN 2220-4245. (In Russian).
9. Breiman L. Classification and Regression Trees. New York : Routledge, 1984. 368 p.
10. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2009. 746 p.

Объем статьи 0,78 авторских листа

Научная статья
УДК 621.331

Совершенствование установки по восстановлению изоляционных свойств обмоток тяговых электродвигателей путем внедрения автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов

Антон Александрович Иванов¹, Евгений Александрович Третьяков¹

¹Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия

Improving the installation for restoring the insulating properties of the windings of traction electric motors by introducing automatic regulation of the viscosity of impregnating materials

Anton A. Ivanov¹, Evgeniy A. Tretyakov¹

¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia

Аннотация

В статье рассмотрены факторы, влияющие на изоляционные свойства обмоток тяговых электродвигателей, сделан анализ unplanned repairs, который дает представление о проблематике восстановления изоляционных свойств двигателей.

Приведены результаты имитационного моделирования установки ультразвуковой пропитки тяговых электродвигателей с предлагаемой авторами системой автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов. Показано, что рассмотренная система позволяет поддерживать вязкость в заданных пределах, а следовательно, повышать качество ремонта тяговых электродвигателей.

Ключевые слова: пропитка, модель, ультразвук, тяговый электродвигатель, вязкость

Abstract

The article considers the factors affecting the insulating properties of windings of traction electric motors, analyzes unplanned repairs, which gives an idea of problems of restoring insulating properties of motors.

The results of simulation modeling of the installation of ultrasonic impregnation of traction electric motors with system of automatic control of the viscosity of impregnating materials proposed by the authors are presented. It is shown that the considered system makes it possible to maintain viscosity within specified limits, and therefore improve the quality of repair of traction electric motors.

Keywords: impregnation, model, ultrasound, traction electric motor, viscosity

DOI: 10.20291/1815-9400-2024-4-113-119

Безопасность железнодорожного транспорта остается основным приоритетом стратегического научно-технического развития холдинга «РЖД». Однако в условиях ограничения внешних поставок высокотехнологичных продуктов и возможного возникновения дефицита поставляемых из-за рубежа запасных частей и материалов проведение ремонтных работ и модернизация технических средств и систем, которые ранее назначались по сроку эксплуатации или пропущенному тоннажу, а зачастую без учета проводимых ранее ремонтов и фактического состояния, должно получить научно обоснованную методологию. Это методология выявления приоритетных участков для реновации и реконструкции по фактическому состоянию, с планированием бюджетов для поддержания надежности работы технических средств и систем на заданном уровне [1].

Одним из важнейших элементов инфраструктуры железнодорожного транспорта является локомотивное хозяйство, от организации работы которого в значительной мере зависит устойчивость и надежность эксплуатации дорог и себестоимость перевозок [2].

Для поддержания локомотивов в исправном состоянии на железных дорогах России организована система проведения технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) после определенного пробега или времени их работы [3]. Согласно [4], тяговые двигатели должны периодически в плановом порядке подвергаться текущему ремонту (ТР-3) в депо, среднему (СР) и капитальному (КР) ремонтам на ремонтных заводах.

К основным причинам неисправности тяговых электродвигателей относят прежде всего температурные воздействия на изоляцию, а также ее ускоренное старение, обусловленное выходом параметров работы за допустимый диапазон, увлажненностью и пылью, скопившейся в кузове локомотива.

Как показала практика, система поддержания надежности изоляции по пробегу не является оптимальной. Условия эксплуатации тяговых электродвигателей (ТЭД) неодинаковы,

по-разному происходит и старение изоляции, следовательно, не каждый электродвигатель с пробегом 1400 тыс. км обязательно нуждается в замене обмотки. Иногда оказывается достаточным более дешевый средний ремонт ТЭД, т.е. чистка, пропитка и сушка изоляции обмотки. Таким образом, если оценивать фактическое состояние изоляции, то можно продлить срок ее службы без снижения надежности ее работы. Особенно актуальна такая постановка вопроса для современных условий — в связи с острым дефицитом меди и изоляционных материалов [5].

На основании данных о неплановых ремонтах тяговых электродвигателей постоянного тока, проведенных сервисным локомотивным депо в 2023 г., на рис. 1 представлено количество неисправностей по типам ТЭД.

Как следует из рис. 1, основными неисправностями тяговых электродвигателей были пробой и межвитковые замыкания обмоток якорей, главных, добавочных, компенсационных и полюсных обмоток.

Нередко, чтобы ускорить процесс ремонта тяговых двигателей, восстановлением изоляционных свойств обмоток пренебрегают или сокращают до обычной сухой чистки и сушки. Но и пропитка не всегда дает стопроцентный результат из-за сложности работы с пропиточными установками, а также из-за недостаточной автоматизации этого процесса.

Назначение пропитки изоляции ТЭД, согласно [6], состоит в следующем:

значительное замедление процессов теплового старения и увлажнения электроизоляционных материалов, так как уменьшается площадь их соприкосновения с окружающей средой;

снижение превышения температуры обмоток, так как теплопроводность лаков намного выше теплопроводности воздуха;

повышение электрической прочности изоляции вследствие заполнения пор и капилляров обмотки лаками, имеющими более высокую электрическую прочность, чем воздух;

снижение механического износа изоляции за счет цементирования витков обмоток, что обеспечивает монолитность конструкции.

Все эти качественные изменения параметров обмотки после пропитки связаны с физическими свойствами самого

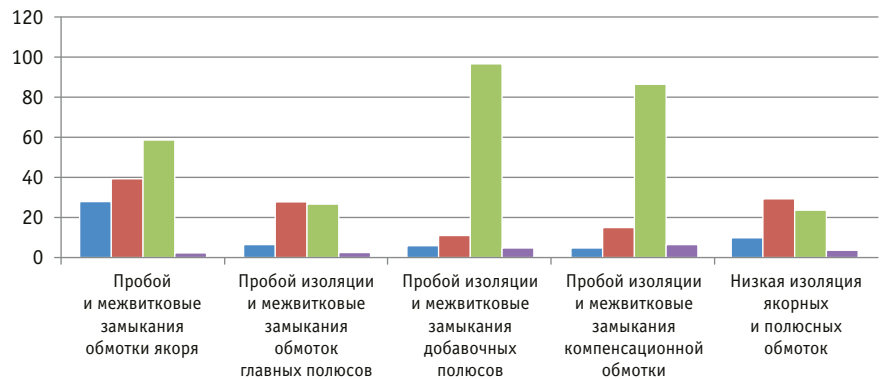


Рис. 1. Количество неисправностей по типам ТЭД за 2023 г.:

■ — СТК-810У1; ■ — ЭДП-810У1; ■ — ЭК-810Ч4; ■ — ДПТ 810-2У1

пропиточного состава, а также с количеством пропиточного состава, проникшего в полости обмотки и оставшегося в них после операции компаундирования (сушки) [7].

Сегодня наиболее востребованными и результативными методами пропитывания изоляции являются ультразвуковой и вакуум-нагнетательный [8]. Как правило, вакуум-нагнетательный метод не пользуется широким спросом в депо-ских условиях. Это объясняется тем, что для его применения необходима сложная установка с автоклавом, насосами и другими элементами, для управления которыми работник пропиточно-сушильного отделения должен владеть специальными знаниями и умениями, кроме того, при использовании данного метода сам процесс пропитывания требует значительных временных затрат. В основе пропитки лежит удаление воздуха из капиллярно-пористой структуры изоляционной конструкции в результате глубокого вакуумирования и последующее ее заполнение пропиточным составом под действием избыточного давления, создаваемого инертными газами [8].

Ультразвуковой метод проще в работе и требует меньше времени на пропитывание изоляции за счет кавитации и вибрации стенок капилляров: ультразвуковые колебания вытесняют воздух из капилляров и одновременно обеспечивают ускоренное продвижение по ним пропитывающего состава [9].

Недостатком существующих подходов [10–12] для достижения полной автоматизации и повышения качества пропитывания изоляции является отсутствие

способов контроля вязкости пропиточных материалов.

Согласно [13, 14], вязкость пропиточного материала должна находиться в строгом диапазоне 50–110 Па·с при температуре 15–35 °С. На сегодняшний день вязкость измеряют перед началом смены в лабораторных условиях при помощи вискозиметра ВЗ-246.

Цель исследования, представленного в статье, заключалась в совершенствовании установки ультразвуковой пропитки тяговых электродвигателей Омского завода транспортной электроники (ОмЗТЭ) за счет внедрения автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов. В качестве основного метода исследования принято имитационное моделирование в системе MATLAB Simulink.

Блок-схема алгоритма работы установки ультразвуковой пропитки представлена на рис. 2. Для реализации предлагаемого подхода к совершенствованию установки блок-схема дополнена контролем и управлением вязкостью (показано зеленым цветом). Установка имеет две емкости — емкость хранения пропиточного материала (ПМ) и емкость пропитки.

Установка контролирует следующие параметры (в скобках указаны их обозначения в имитационной модели):

- уровень ПМ в емкости хранения (hPM);
- уровень воды в тепловой рубашке (hW) — тепловая рубашка требуется для подогрева ПМ в емкости хранения;
- температуру воды в тепловой рубашке (tW), необходимую для поддержания температуры ПМ;
- температуру самого ПМ (tPM);
- вязкость ПМ (vPM).

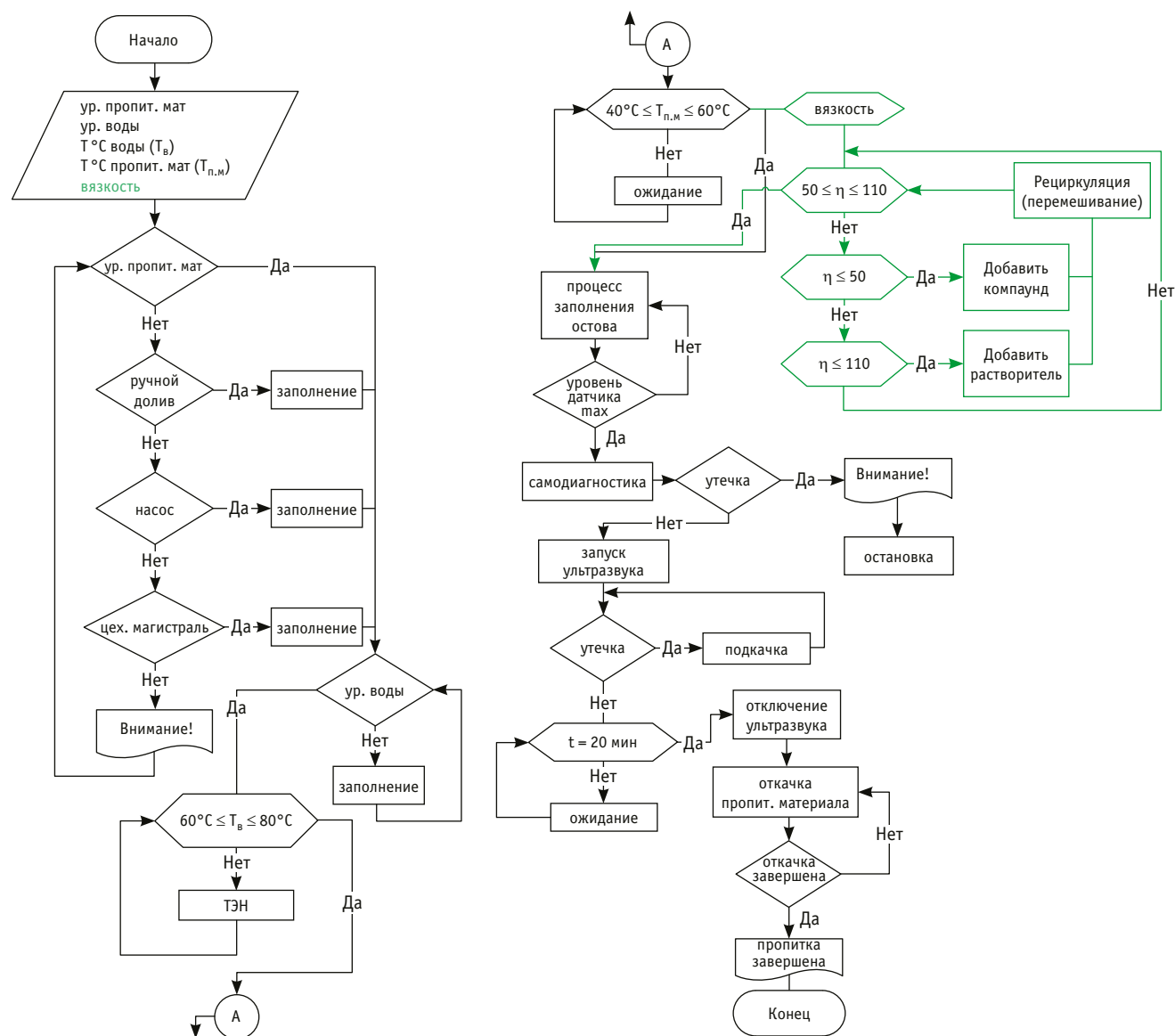


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы установки ультразвуковой пропитки

Имитационное моделирование работы установки выполнено согласно представленному алгоритму с учетом автоматического регулирования вязкости пропиточных материалов в MATLAB Simulink.

Работа установки осуществляется в несколько этапов. Рассмотрим их.

Первый этап — измерение объема ПМ в емкости хранения.

Заполнение происходит по линии SlivPM с задатчиком UtechkaPM размерностью м³/с (рис. 3).

Требуемый объем определяется ограничителем hPMLimit (от 0,3 до 0,5 м³). Если требуемый уровень отсутствует, то установка предлагает три варианта заполнения — ручной долив, насос, цеховую магистраль.

При помощи переключателей Etap 1 и Etap 11 выбирается DolivPM, NasosPM или MagistralPM. Подключаются соот-

ветствующие линии NasosPMM, MagistralPMM от задатчиков PodachaPMN, PodachaPMM с размерностью м³/с.

Результат моделирования отслеживается на осциллографе hPMcontrol.

Второй этап — измерение объема воды в тепловой рубашке.

Заполнение происходит по линии SlivW с задатчиком UtechkaW (размерность м³/с). Требуемый объем определяется ограничителем hWlimit (от 0,045 до 0,05 м³). Если требуемый уровень отсутствует, то установка предлагает три варианта заполнения — ручной долив, насос, цеховую магистраль.

Переключателями Etap 2 и Etap 22 выбирается DolivW, NasosW или MagistralW. Подключаются соответствующие линии NasosPW, MagistralPW от задатчиков PodachaWN и PodachaWM с размерностью м³/с. Система регулирования аналогична рассмотренной в этапе 1.

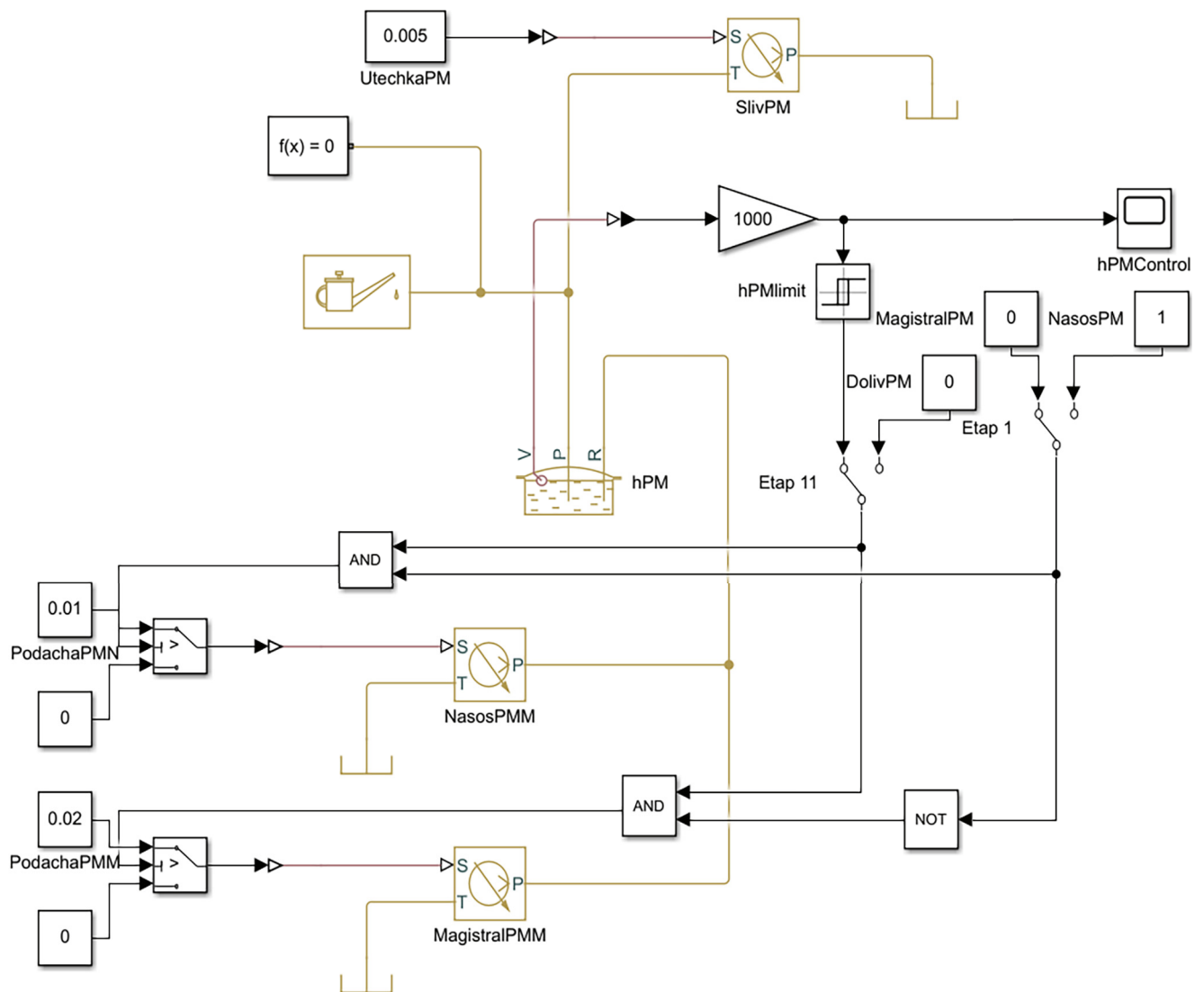


Рис. 3. Общая модель установки

Результат моделирования отслеживается на осциллографе hWcontrol.

Третий этап — нагревание воды и ПМ.

Включается ТЭН подогрева воды с периодическим замером температуры. После этого начинается подогрев ПМ (до диапазона 40–60 °С).

Инерционные свойства ТЭН определяются блоком TENTF с передаточной функцией

$$\frac{1}{2000s^2 + 330s + 1}, \quad (1)$$

замкнутой датчиком обратной связи с передаточной функцией

$$\frac{20}{2s + 1}. \quad (2)$$

Сигнал датчика TemperaturaW (рис. 4) определяет необходимую температуру воды. Переключателем Этап 3 выбирается регулирование температуры в заданном диапазоне с использованием реле Tlimits.

Полученное значение преобразователем ТЕН преобразуется в физическую величину, которая измеряется идеальным термодатчиком и выводится на осциллограф TemperaturaW.

Четвертый этап — измерение вязкости.

Добавление растворителя происходит по линии NasosS с задатчиком PodachaS размерностью м³/с (рис. 5). Требуемый объемом определяется ограничителем vPMLimit (от 0,05 до 0,11 м³). Если требуемой вязкости нет, установка предлагает переключателем Этап 4 подключить долив компаунда по линии NasosC.

Результат моделирования отслеживается на осциллографе vPMcontrol.

Пятый этап — перекачка ПМ из емкости хранения в емкость пропитки.

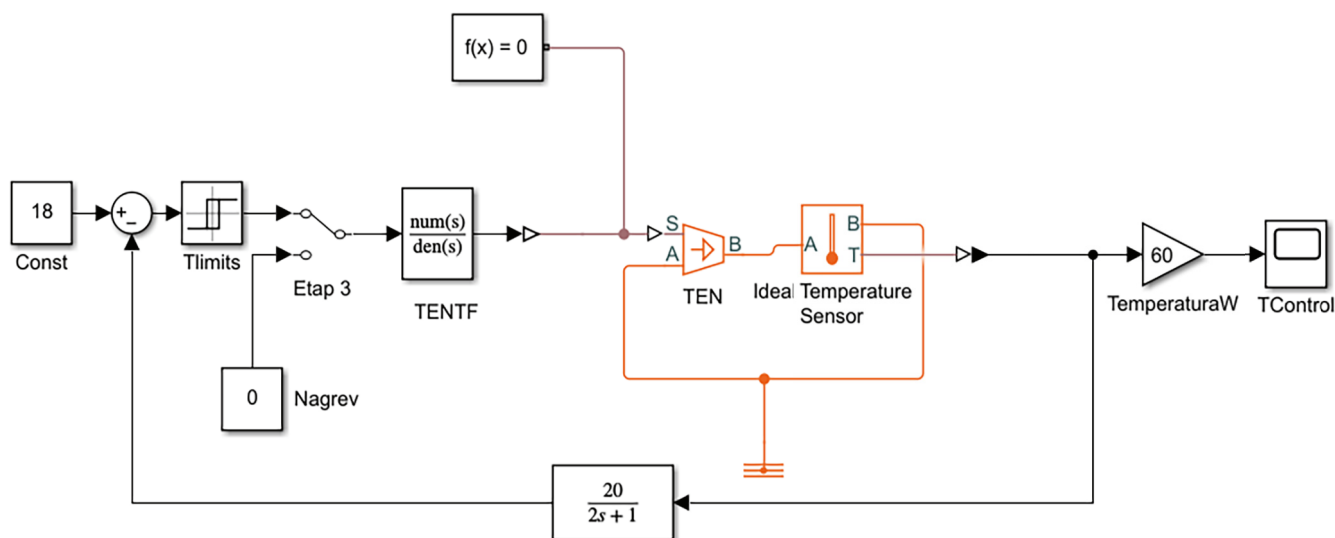


Рис. 4. Алгоритм работы блока подогрева воды в тепловой рубашке и ПМ

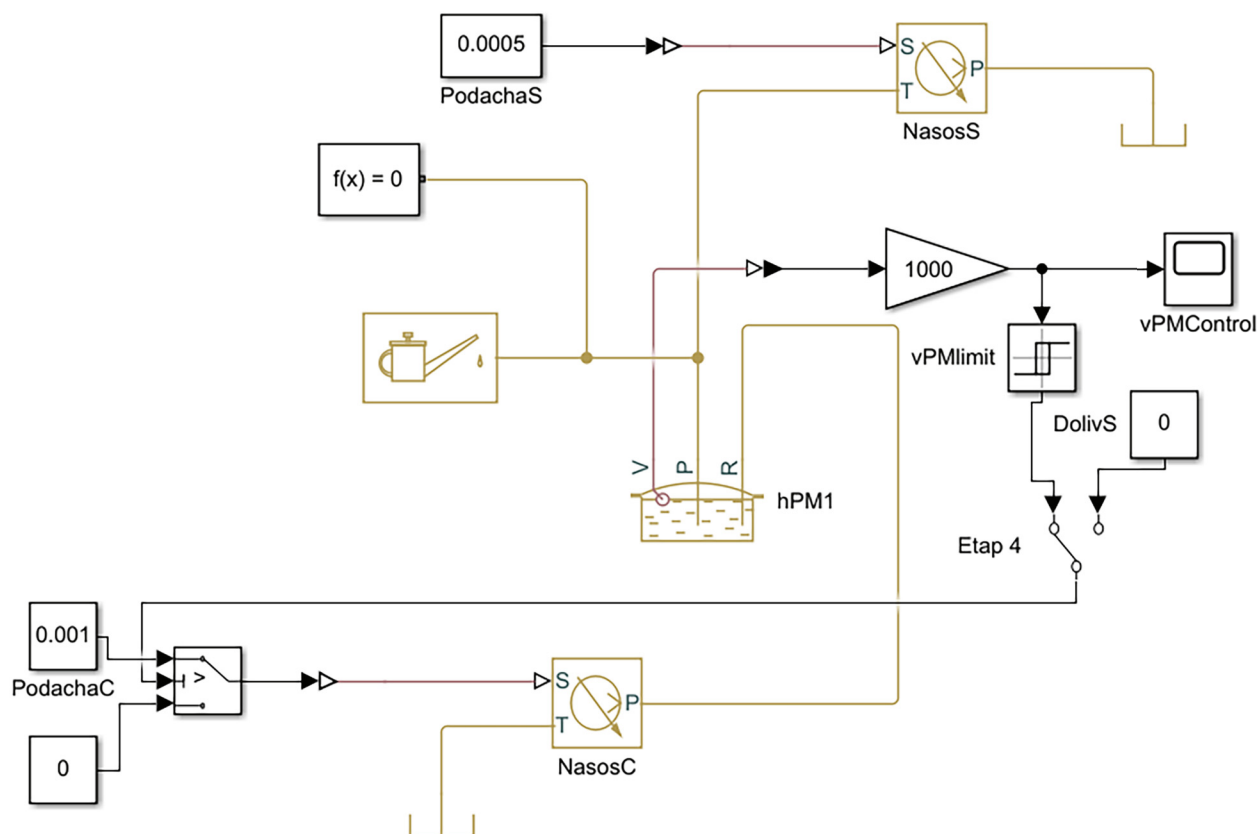


Рис. 5. Алгоритм работы блока замера вязкости ПМ

Перекачка происходит по линии SlivPr с задатчиком UtechkaPr размерностью м³/с. Требуемый объем определяется ограничителем hPrlimit (от 0,03 до 0,04 м³). Если требуемый уровень отсутствует, то переключателем Etap 5 подключается перекачка ПМ из емкости хранения в емкость пропитки по линии NasosPr с задатчиком PodachaPr.

Шестой этап — ультразвуковая пропитка.

Переключателем Etap 6 (блок Sine Wave) включается ультразвук (рис. 6), через 20 мин (блок Clock) переключателем Switch ультразвук отключается.

Седьмой этап — откачка ПМ обратно в емкость хранения.

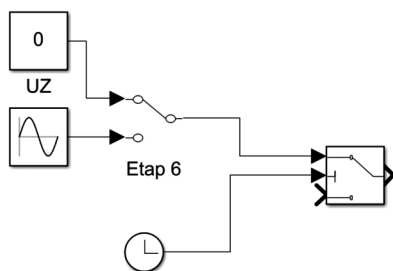


Рис. 6. Алгоритм работы блока ультразвука

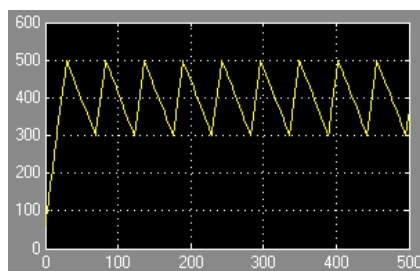


Рис. 7. Изменение объема ПМ в емкости хранения

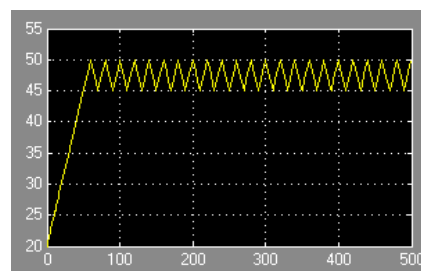


Рис. 8. Изменение объема воды в тепловой рубашке

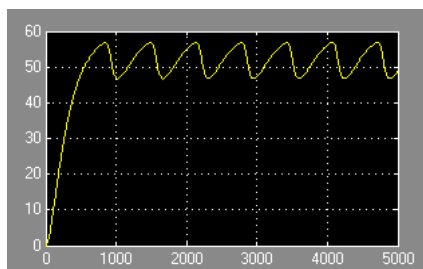


Рис. 9. Изменение нагрева ПМ

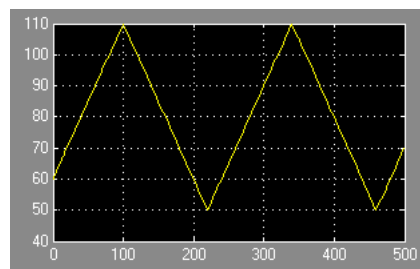


Рис. 10. Изменение вязкости

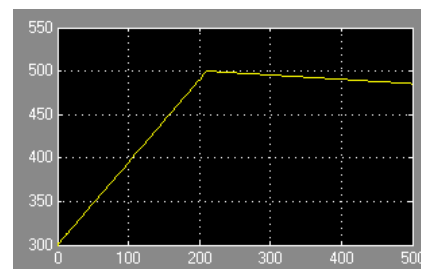


Рис. 11. Откачка ПМ обратно в емкость хранения

Откачка происходит по линии SlivPr с задатчиком UtechkaPr1 размерностью $\text{м}^3/\text{с}$. Требуемый объем определяется ограничителем hPrLimit1 (от 0,3 до 0,5 м^3). Переключателем Etap 7 подключается перекачка ПМ из емкости пропитки в емкость хранения по линии NasosPr1 с задатчиком PodachaPr1.

На рис. 7–11 в виде осциллограмм представлены результаты работы рассматриваемой установки на каждом этапе.

Таким образом, система автоматического регулирования позволяет поддерживать вязкость пропиточных материалов

в заданных пределах (см. рис. 10). При отсутствии этой системы в конце рабочей смены значение вязкости выходит за заданный диапазон, и эффективность пропитки изоляции ТЭД снижается.

Полученные результаты подтверждают адекватность имитационного моделирования и могут служить основой для модернизации аппаратной части ультразвуковой установки пропитки изоляции ТЭД, что является предметом дальнейших исследований авторов.

Сведения об авторах:

Антон Александрович Иванов, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения

Евгений Александрович Третьяков, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения

Authors information:

Anton A. Ivanov, postgraduate student of Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

Evgeniy A. Tretyakov, DSc in Engineering, Associate Professor, Professor of Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Москва ; Санкт-Петербург, 2018. 128 с.
2. Буйносов А. П. Ремонт подвижного состава и проектирование депо. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2017. 68 с.
3. Тяговый подвижной состав / Т. В. Волчек, В. С. Томилов, В. Н. Иванов, О. В. Мельниченко. Иркутск : ИрГУПС, 2021. 72 с.
4. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава. Москва : Транспорт, 1992. 295 с.

References

1. Strategy of scientific and technological development of the Russian Railways holding for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Book). Moscow ; St. Petersburg, 2018. 128 p. (In Russian).
2. Buynosov A. P. Repair of rolling stock and depot design. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2017. 68 p. (In Russian).
3. Volchek T. V., Tomilov V. S., Ivanov V. N., Melnichenko O. V. Traction rolling stock. Irkutsk : Irkutsk State Transport University, 2021. 72 p. (In Russian).
4. Rules for the repair of electric vehicles of electric rolling stock. Moscow : Transport, 1992. 295 p. (In Russian).

5. Серебряков А. С. Техническая диагностика подвижного состава. Контроль главной изоляции тяговых электродвигателей. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 292 с.
6. Тимина Н. В. Технология производства электрических машин. Киров : ВятГУ, 2022. Ч. 2. 112 с.
7. Смирнов Г. В. Моделирование и оптимизация объектов и процессов. Томск : ТУСУР, 2016. 216 с.
8. Сравнительная оценка качества пропитки изоляции обмоток электрических машин ультразвуковым и вакуум-нагнетательным способами / Н. И. Березинец, В. И. Коротков, Л. В. Родова, Б. Е. Рыбалко // Электротехника. 2009. № 3. С. 40–43. ISSN 0013-5860.
9. Ванчиков В. Ц. Электрическая изоляция обмоток тяговых двигателей локомотивов // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 2. С. 41–43. ISSN 2223-9731.
10. Ультразвуковая установка для мойки и пропитки якорей электродвигателей / С. П. Демянишин, Н. Г. Макаренко : патент на полезную модель 114883 Российская Федерация. № 2011145641/05; заявл. 09.11.2011; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11.
11. Способ пропитки обмоток электротехнических изделий / Г. В. Смирнов, Д. Г. Смирнов : патент 2490771 Российская Федерация. № 2012123080/07; заявл. 04.06.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23.
12. Способ пропитки обмоток электродвигателя / В. Г. Власов, В. Л. Иванов : патент 2192702 Российская Федерация. № 2001100241/09; заявл. 03.01.2001; опубл. 10.11.2002, Бюл. № 31.
13. Пропитка изоляции обмоток тяговых и вспомогательных электрических машин локомотивов и электропоездов в депо в условиях. ПКБ ЦТ.25.0090. Москва : ОАО «РЖД», 2011. 68 с.
14. Иванов А. А. Установка ультразвуковой пропитки и способ ее усовершенствования // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : материалы X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Омск, 5–6 декабря 2023 г. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2023. С. 221–227.
5. Serebryakov A. S. Technical diagnostics of rolling stock. Control of main insulation of traction electric motors. St. Petersburg : Lan', 2023. 292 p. (In Russian).
6. Timina N. V. Technology of production of electric machines. Kirov : Publishing House of Vyatka State University, 2022. Part 2. 112 p. (In Russian).
7. Smirnov G. V. Modeling and optimization of objects and processes. Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016. 216 p. (In Russian).
8. Berезinets N. I., Korotkov V. I., Rodova L. V., Rybalko B. E. Comparative assessment of the quality of impregnation for insulation of windings of electric machines by ultrasonic and vacuum injection methods. *Russian Electrical Engineering*. 2009. No. 3. Pp. 40–43. ISSN 0013-5860. (In Russian).
9. Vanchikov B. C. Electrical insulation of windings of traction engines of locomotives. *Russian Railway Science Journal*. 2006. No. 2. Pp. 41–43. ISSN 2223-9731. (In Russian).
10. Demyanishin S. P., Makarenko N. G. Ultrasonic installation for washing and impregnation of electric motor anchors : patent for utility model 114883 Russian Federation. No. 2011145641/05; filed 09.11.2011; publ. 20.04.2012, Bulletin No. 11. (In Russian).
11. Smirnov G. V., Smirnov D. G. Method of impregnation for windings of electrical products : patent 2490771 Russian Federation. No. 2012123080/07; filed 04.06.2012; publ. 20.08.2013, Bulletin No. 23. (In Russian).
12. Vlasov V. G., Ivanov V. L. Method of impregnation of electric motor windings : patent 2192702 Russian Federation. № 2001100241/09; filed 03.01.2001; publ. 10.11.2002, Bulletin No. 31. (In Russian).
13. Impregnation of insulation of windings of traction and auxiliary electric machines of locomotives and electric trains in depot conditions. PKB TsT.25.0090. Moscow : JSC «RZD», 2011. 68 p. (In Russian).
14. Ivanov A. A. Installation of ultrasonic impregnation and method of its improvement. *Improving the efficiency of operation of electromechanical energy converters in industry and transport* : proceedings of the 10th All-Russian scientific and technical conference with international participation, Omsk, December 5–6, 2023. Omsk : Publishing House of OSTU, 2023. Pp. 221–227. (In Russian).

Объем статьи 0,82 авторских листа

Подписка на 2025 год.
Периодичность — 4 номера в год.

✂

ф. СП-1

АБОНЕМЕНТ

на

газету

 журнал

46463

(индекс издания)

Транспорт Урала

(наименование издания)

Количество комплектов:

на 2025 год по месяцам:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

			на <div>газету</div> журнал	46463	(индекс издания)								
ПВ	место	литер											
Транспорт Урала													
(наименование издания)													
Стои- мость	подписки	руб. ____ коп.		Количество комплектов:									
	переадресовки	руб. ____ коп.											
на 2025 год по месяцам:													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Куда													
			(почтовый индекс)									(адрес)	
Кому													
(фамилия, инициалы)													

Научно-технический журнал «Транспорт Урала»

DOI:10.20291/1815-9400

№ 4 (83), 2024 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 4 раза в год

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Тел. (343) 221-23-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-23-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 26.12.2024

Выход в свет 28.12.2024

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–60)

Формат 60×90/8

Цена 682,58 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 53

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2024