CC BY 4.0

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья
УДК 656.22
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169
EDN: https://elibrary.ru/rdalya

ОЦЕНКА БАЛАНСА ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛИГОНОВ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

А. Ф. Бородин[1,2] ✉, В. В. Панин[1,2], М. А. Агеева[1], А. Ю. Соколов[1], С. Ю. Кириллова[1], Е. О. Дмитриев[1,2], А. А. Кравченко[1,2]

[1] Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ), Москва, Российская Федерация
[2] Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Пропускные и провозные способности железнодорожных полигонов и транспортные потоки в течение года не постоянны. Допустимые уровни использования пропускной способности определяются из условия беспрепятственного приема поездов станциями. Необходимо рассчитывать баланс провозной способности, позволяющий совместить растущие перевозки с высокими темпами развития инфраструктуры и ремонтных работ. Цель исследования — разработка методических решений для оценки баланса перевозочной мощности железных дорог и обоснования порядка реализации инфраструктурных мероприятий в условиях нарастающей динамики предъявления грузов к перевозке и жестких сроков проведения работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры.
Материалы и методы. Разработанные решения базируются на данных информационных систем ОАО «РЖД», автоматизированном прогнозе инфраструктурных и перевозочных ресурсов железнодорожной сети и гибридных математических моделях.
Результаты. Представлены результаты обоснования нормативных ограничений суточного бюджета времени для пропуска поездов в зависимости от классификации и специализации железнодорожных линий. Определен порядок расчета пропускной способности участков при автоматической локомотивной сигнализации как самостоятельном средстве интервального регулирования движения поездов с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков. Определены характеристики наличной, расчетной, планируемой и потребной пропускной и провозной способностей с разграничением мероприятий по развитию пропускных и провозных способностей и программам инфраструктурных хозяйств. Предложена задача компромиссного управления по обеспечению предъявляемых объемов грузовых и пассажирских перевозок, заданного объема реконструктивных работ по развитию инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности. Представлена классификация реконструктивных, технологических, организационно-технических и комплексных мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях исчерпания инфраструктурных и графиковых ресурсов.
Обсуждение и заключение. Разработанные решения позволяют повысить обоснованность и эффективность комплексных проектов по развитию пропускных и провозных способностей и мероприятий по совершенствованию эксплуатационной работы полигонов железнодорожной сети.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: баланс провозной способности, перевозочная мощность, инфраструктурные мероприятия, бюджет времени, интервальное регулирование, организация движения, компромиссное управление, неравномерность транспортных процессов, прогноз ресурсов сети, гибридные математические модели

Для цитирования: Бородин А. Ф., Панин В. В., Агеева М. А., Соколов А. Ю., Кириллова С. Ю., Дмитриев Е. О., Кравченко А. А. Оценка баланса провозной способности полигонов сети железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2022. Т. 81, № 2. С. 158–169. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169.

✉ borodinaf@mail.ru (А. Ф. Бородин)

© Бородин А. Ф., Панин В. В., Агеева М. А., Соколов А. Ю., Кириллова С. Ю., Дмитриев Е. О., Кравченко А. А., 2022

CC BY 4.0

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 656.22
DOI: 10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169
EDN: https://elibrary.ru/rdalya

ASSESSMENT OF TRANSPORTATION CAPACITY BALANCE OF RAILWAY NETWORK POLYGONS

Andrey F. Borodin[1,2] ✉, Vitaliy V. Panin[1,2], Marina A. Ageeva[1], Andrey Yu. Sokolov[1], Svetlana Yu. Kirillova[1], Egor O. Dmitriev[1,2], Artem A. Kravchenko[1,2]

[1]Institute of Economics and Development of Transport, Moscow, Russian Federation
[2]Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Traffic and transportation capacities of railway polygons and traffic flows are not constant throughout the year. Permissible capacity levels are determined by the condition of unhindered reception of trains by stations. It is necessary to calculate the balance of transportation capacity, making it possible to combine growing traffic with high rates with infrastructure development and repair works. The purpose of the study is to develop methodological solutions for assessing the balance of the railway transportation capacity and substantiating the procedure for implementing infrastructure measures in the context of the growing dynamics of the originating traffic and the tight deadlines for repairing and reconstructing the infrastructure.
Materials and methods. The developed solutions are based on the data of the Russian Railways information systems, automated forecasting of the infrastructure and transportation resources of the railway network, and hybrid mathematical models.
Results. The article presented the results of the substantiation of the normative restrictions on the daily time budget for the passage of trains, depending on the classification and specialisation of railway lines. The procedure for calculating the traffic capacity of sections with automatic locomotive signalling is determined as an independent means of interval control of train traffic with movable boundaries of block sections that change depending on the speed and mass of the train. The characteristics of the available, estimated, planned and required traffic and transportation capacities were determined with a distinction between measures for the development of traffic and transportation capacities and programs for improvement of infrastructure facilities. The authors put forward the problem of compromise management to ensure the required volumes of freight and passenger traffic, a given volume of reconstruction work on the development of infrastructure and repair work to maintain the required degree of its readiness. A classification of reconstructive, technological, organisational, technical and complex measures of influence on the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources was presented.
Discussion and conclusion. The developed solutions enable to increase the feasibility and efficiency of complex projects for the development of traffic and transportation capacities and measures to improve the operation of railway network polygons.

KEYWORDS: carrying capacity balance, transportation capacity, infrastructure measures, time budget, interval control, traffic organisation, compromise management, uneven transport processes, network resource forecast, hybrid mathematical models

For citation: Borodin A. F., Panin V. V., Ageeva M. A., Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu., Dmitriev E. O., Kravchenko A. A. Assessment of transportation capacity balance of railway network polygons. *Russian Railway Science Journal*. 2022;81(2):158-169. (In Russ.). https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-2-158-169.

✉ borodinaf@mail.ru (A. F. Borodin)

© Borodin A. F., Panin V. V., Ageeva M. A., Sokolov A. Yu., Kirillova S. Yu., Dmitriev E. O., Kravchenko A. A., 2022

Введение. В докладе [1] опубликованы результаты исследований параметров организации работы полигонов железнодорожной сети, включающих в себя грузонапряженные направления и крупные узлы с высокой интенсивностью пассажирского дальнего и пригородно-городского движения, в современных условиях, когда требуется совместить растущие перевозки с высокими темпами реконструкции инфраструктуры и ремонтных работ, а также результаты разработки методики для расчетов этих параметров.

Перевозочная мощность железнодорожной сети и ее элементов в течение года не остается постоянной. Потоковая нагрузка характеризуется не только неравномерностью отправления пассажиров, неравномерным предъявлением к перевозке грузов и порожних вагонов, не принадлежащих перевозчику [2, 3], но и зависимостью от технологии организации и продвижения транспортных единиц.

Поэтому, как показано в работе [4], необходимо для конкретных календарных периодов вычислять баланс провозной способности железнодорожных полигонов исходя из беспрепятственного продвижения поездопотоков без задержек по неприему станциями, внешними стыковыми пунктами полигона, а также без задержек обмена вагонами с железнодорожными путями необщего пользования.

Указанный баланс провозной способности должен определяться расчетом на математических моделях конкретных полигонов, позволяющих вычислять, с одной стороны, перевозочные мощности и, с другой стороны, реально достижимые уровни их использования при определенной динамике транспортных потоков (рис. 1).

Оценка перевозочной мощности железнодорожной инфраструктуры. Специалистами АО «ИЭРТ» с участием АО «ВНИИЖТ» и АО «НИИАС» подготовлена Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [5], конкретизирующая положения Методики [6] в части, отнесенной к ведению владельца инфраструктуры.

В Инструкции [5] для исключения противоречий в трактовке терминов сформулированы определения потребной (необходимой), планируемой (проектируемой), расчетной, наличной пропускных и провозных способностей.

Потребные провозная и пропускная способности подлежат расчету при решении как задач развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов при перспективном планировании, так и задач использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов в условиях текущей эксплуатации. При их расчете рассматривают структуру и мощность потоков грузов и поездов с учетом годовой и внутримесячной неравномерности пассажирских и грузовых перевозок.

Планируемые (проектируемые) провозная и пропускная способности определяются при обосновании мероприятий по совершенствованию технологии работы и технического оснащения, строительства или развития железнодорожных линий, станций и узлов. Факторы, учитываемые при их расчете, — нормативные значения коэффициентов надежности железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава $\alpha_н$ и суточного (в годовом разрезе) бюджета времени выполнения работ по текущему содержанию и плановых видов ремонта устройств инфраструктуры $t_{тех}$, планируемые реконструктивные, технические, технологические и организационные мероприятия. Сопоставление расчетов потребной и планируемой пропускных способностей обеспечивает проверку достаточности планируемого развития железнодорожной инфраструктуры.

Расчетные провозная и пропускная способности применяются в решении задач планирования мероприятий по развитию пропускных и провозных способностей. Учитываемые здесь факторы — действующее путевое развитие и техническое оснащение, нормативные значения $\alpha_н$ и $t_{тех}$. Сопоставление планируемой и расчетной пропускных способностей обеспечивает проверку необходимости планируемого развития железнодорожной инфраструктуры.

Наличные провозная и пропускная способности подлежат расчету для планирования мероприятий по ремонту и модернизации устройств инфраструктуры. Учитываемые факторы — действующее путевое развитие и техническое оснащение, соотношения размеров движения поездов различных категорий, длительно действующие предупреждения об ограничении скорости; при этом значения $\alpha_н$ и $t_{тех}$ принимаются на основе актуальных данных расчетного периода. Сопоставление расчетной и наличной пропускных способностей определяет потери пропускной способности из-за несоблюдения проектных параметров технических средств и обеспечивает проверку необходимости работ по устранению инфраструктурных ограничений, вызывающих данные потери.

Результирующая пропускная способность расчетного участка, узла или станции применяется в решении задач технологии перевозочного процесса, управления движением и доступа к услугам инфраструктуры в условиях текущей эксплуатации. При этом учитывают емкости путевого развития и длины станционных путей, технически допустимые уровни использования мощности устройств при беспрепятственном приеме поездов.

Результирующая пропускная способность направления (полигона) железнодорожной сети необходима при распределении транспортных потоков, мероприятий и инвестиций по маршрутам следования и при мониторинге целевых показателей развития железнодорожной сети. При этом учитывают влияние смежных участков

(объективные потери из-за несоответствия структуры транспортных потоков и топологии полигонов).

Разграничение мероприятий по развитию пропускной способности и мероприятий по ремонту и модернизации устройств инфраструктуры в зависимости от соотношений значений пропускной способности показано на рис. 2.

В Инструкции [5] регламентирован расчет пропускной способности железнодорожных участков по перегонам в зависимости от специализации железнодорожной линии для преимущественно грузового или пассажирского движения. Для расчета пропускной способности однопутных и однопутно-двухпутных участков с непарностью размеров движения установлены зависимости между числом четных и нечетных поездов. Классифицированы варианты организации работы участков подталкивания с выводом соответствующих расчетных формул. Регламентирован расчет пропускной способности в период проведения ремонтно-строительных работ с закрытием главных путей перегонов на длительный срок.

В раздел «Расчет пропускной способности железнодорожных участков по перегонам» включены также результаты исследования [7], где обоснована необходимость обеспечения непрерывности следования поездов разных категорий между станциями технологических стоянок, взаимного расположения поездов в тактовом графике и на смежных участках при расчете участков с непараллельным графиком движения поездов и участков с интенсивным пригородным и пригородно-городским движением. Впервые регламентирован расчет пропускной способности при тактовом графике движения пассажирских поездов [7]. Сформулированы критерии разделения железнодорожных линий на соответствующие участки (табл. 1). Уточненный порядок определения коэффициентов съема на однопутных и однопутно-двухпутных участках учитывает количество раздельных пунктов, имеющих приемоотправочные пути вместимостью, обеспечивающей прием грузовых поездов с длиной составов, установленной графиком движения поездов.

Значения $\alpha_н$ и $t_{тех}$ определяются с учетом интенсивности и скоростей движения поездов и представлены в табл. 2 в зависимости от специализации и классификации железнодорожных линий. Здесь согласно [8, 9] приняты классы (1–5) железнодорожных линий и их специализация (высокоскоростная В, скоростная С, особо грузонапряженная О, малоинтенсивная М, с тяжеловесным грузовым движением Т, преимущественно пассажирским движением П, преимущественно грузовым движением Г).

Совместно с АО «НИИАС» исследована пропускная способность при внедрении инновационных систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП) [10]. Пропускная способность двухпутного перегона при автоматической локомотивной сигнализации как самостоятельном средстве ИРДП с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков, пар поездов/сут, определяется по формуле

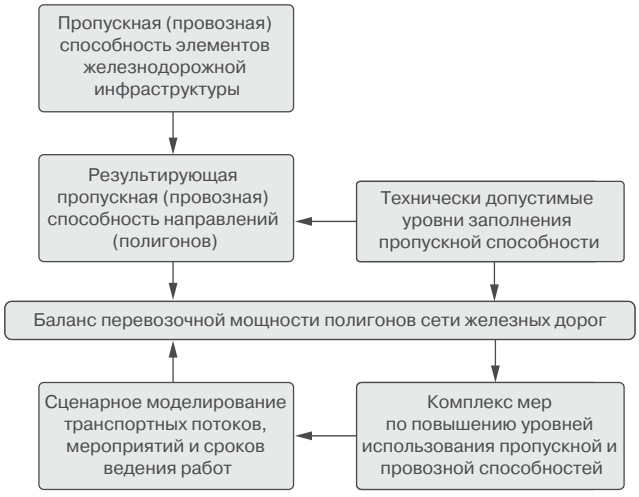

Рис. 1. Схема оценки баланса перевозочной мощности полигонов сети железных дорог

Fig. 1. Diagram for estimating the transportation capacity balance of the railway network polygons

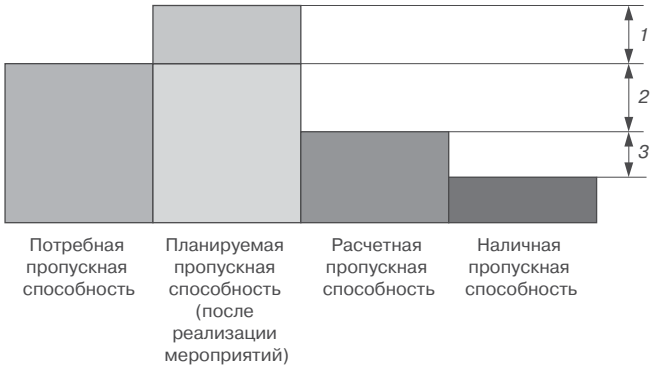

Рис. 2. Сопоставление показателей пропускной способности: *1* — технически необходимая доля пропускной способности (по допустимому уровню использования); *2* — мероприятия по развитию пропускных и провозных способностей; *3* — мероприятия по ремонту и модернизации железнодорожной инфраструктуры (по программам инфраструктурных хозяйств)

Fig. 2. Comparison of traffic capacity indicators: *1* — technically necessary share of traffic capacity (according to the acceptable level of use); *2* — measures to develop traffic and transportation capacities; *3* — measures to repair and modernisation the railway infrastructure (according to programmes of infrastructure facilities)

$$n = (1440 - t_{тех})\alpha_н \left(\frac{\sigma}{I_{и.р}} + \frac{\lambda}{I_{всц}} + \frac{1-\sigma-\lambda}{I_р} \right), \quad (1)$$

где 1440 — суточный лимит времени, мин; $I_{и.р}$ — расчетный межпоездной интервал между поездами

Таблица 1

Классификационные признаки железнодорожных участков

Table 1

Classification features of railway sections

Термин	Определение
Расчетный участок	Часть железнодорожной сети с одинаковыми: количеством главных путей; средствами сигнализации и связи по движению поездов; видом локомотивной тяги и родом тягового тока
Границы расчетных участков	Станции, где предусмотрено выполнение технических операций: расформирование и формирование поездов, смена локомотивов или локомотивных бригад, подготовка составов поездов в рейс, оборот пассажирских поездов дальнего следования и пригородного сообщения; станции или раздельные пункты примыкания одного или нескольких направлений; станции, где изменяются размеры движения грузовых и пассажирских поездов
Участок определения коэффициента съема пропускной способности	Один или несколько последовательно расположенных расчетных участков с одинаковым количеством главных путей, по которым поезда следуют без технических операций

попутного направления при ИРДП с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков, мин; $I_{всц}$ — межпоездной интервал между поездами в режиме движения по технологии «виртуальная сцепка», мин; $I_р$ — расчетный межпоездной интервал при ИРДП с фиксированными границами блок-участков, мин; σ — доля интервалов между грузовыми поездами в общем поездопотоке, следующими с локомотивами, оборудованными автоматической локомотивной сигнализацией как самостоятельным средством ИРДП, с изменяемыми в зависимости от скорости и массы поезда «подвижными» границами блок-участков; λ — доля интервалов между грузовыми поездами в общем поездопотоке, следующими в режиме движения по технологии «виртуальная сцепка».

Порядок расчета пропускной способности железнодорожных станций учитывает неоднородность структуры поступающих, обрабатываемых и отправляемых потоков поездов. Для этого введены коэффициенты съема производительности устройств, аналогичные коэффициентам съема пропускной способности участков по перегонам и впервые предложенные в [11]:

• коэффициенты съема пропускной способности для поездов в расформирование $\varepsilon_р$, поездов своего формирования $\varepsilon_ф$ и транзитных поездов без переработки $\varepsilon_{тр}$ показывают количество одногруппных поездов соответствующей категории и установленной графиковой длины состава, которому эквивалентно занятие элемента станционной инфраструктуры поездом рассматриваемой категории и (или) направления;

• коэффициенты съема перерабатывающей способности сортировочного устройства $\varepsilon_{пер}$ показывают количество составов одногруппных поездов установленной графиковой длины без вагонов, запрещенных к роспуску, которому эквивалентно занятие сортировочного устройства составом рассматриваемой категории и (или) направления;

• коэффициенты съема числа назначений формируемых поездов $\varepsilon_{назн}$ показывают количество назначений одногруппных поездов установленной графиковой длины, которому эквивалентно занятие сортировочных путей поездным назначением рассматриваемой категории и (или) направления.

Таблица 2

Значения $\alpha_н$ и $t_{тех}$ в зависимости от специализации и классификации железнодорожных линий

Table 2

Values $\alpha_н$ и $t_{тех}$ depending on the specialisation and classification of railway lines

Класс линии	$\alpha_н$							$t_{тех}$, мин						
	В	С	О	П	Г	Т	М	В	С	О	П	Г	Т	М
1	0,96	0,95	0,93	0,93	0,93	0,93	–	150	150	150	150	150	150	–
2	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,95	150	150	150	150	150	150	75
3	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	150	90	90	90	90	90	75
4	–	0,95	–	0,96	0,96	0,96	0,95	–	90	–	75	75	75	75
5	–	–	–	0,96	0,96	0,96	0,95	–	–	–	75	75	75	75

Указанные коэффициенты зависят от массы и длины составов, числа сформированных групп вагонов в составах, наличия вагонов, запрещенных к роспуску, режима перевозки и ряда других характеристик.

Оценка целевых показателей комплексных проектов. ОАО «РЖД» утверждена Методика расчета планируемых и фактических показателей провозной и пропускной способностей железнодорожных магистралей и железнодорожных подходов к портам (в направлении портов и пограничных переходов) [12], предназначенная для мониторинга этапности достижения целевых показателей национального проекта «Транспортная часть комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» [13].

Фактические условия функционирования объектов железнодорожной инфраструктуры, введенных в эксплуатацию, могут существенно отличаться от запроектированных. Это связано с рядом факторов, основные из которых — структура и мощность грузопотоков, структура вагонных парков и система управления их работой, динамичность спроса на пассажирские перевозки, тарифные условия. Поэтому расчет результирующей пропускной способности железнодорожных магистралей и подходов к портам должен производиться в приведенных единицах (к грузовым поездам установленной нормы массы и длины) через коэффициенты съема, чтобы исключить влияние возможных в перспективе изменений потоковой структуры на оценку достигнутых результатов выполненного комплекса инфраструктурных мероприятий.

Решение базируется на стандартной задаче о максимальном потоке в сети [14], но не может быть сведено к ней в силу высокого влияния фактора смежных систем на использование наличной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры.

В работе [7] отмечено явление потерь пропускной способности из-за несинхронности поступления поездов со смежных расчетных участков. Наряду с указанной несинхронностью наиболее распространенными факторами, не позволяющими использовать расчетную пропускную способность участков, являются ограничения по вместимости и количеству приемоотправочных путей на промежуточных и технических станциях, различие времен хода пассажирских и грузовых поездов, порядок пропуска поездов по станциям по условиям продольного профиля пути прилегающих перегонов (наличие затяжных спусков, руководящих и инерционных подъемов). Несовпадение времени нормативных технологических «окон» и пиковые периоды движения пригородных поездов, сходящихся с разных направлений, наиболее критичны для предузловых участков и магистральных внутриузловых ходов.

Возможность прокладки транзитных ниток графика от начальной до конечной станции участка значительно снижается из-за враждебности маршрутов в горловинах узловых станций, отсутствия приемоотправочных путей необходимой вместимости на промежуточных станциях направления, часов пик в пригородном сообщении, режимов работы искусственных сооружений и иных причин.

Отдельно каждый из этих факторов можно оценить аналитически, записав соответствующие формулы. Но на практике возникают неблагоприятные сочетания нескольких одновременно действующих факторов. Как показывают сопоставления аналитических расчетов с построением максимальных графиков движения, это приводит к потерям до 15 % расчетной пропускной способности. В [7] сформулированы рекомендации по расчету данных потерь экспериментально (путем построения насыщенных графиков движения поездов) или с применением имитационного моделирования.

Учет влияния рассматриваемых эксплуатационных факторов при определении пропускной способности характеризует зависимость

$$n^* = n_{\text{н}} - \left(\Delta n_{\text{съема}} + \Delta n_{\text{необх}} + \Delta n_{\text{нер}}\right), \qquad (2)$$

где n^* — технически возможный среднегодовой грузовой поездопоток (размеры движения для результирующих показателей комплексного плана модернизации инфраструктуры), пар поездов/сут; $n_{\text{н}}$ — максимальная (теоретическая) пропускная способность по ограничивающему элементу (параллельный график движения), пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{съема}}$ — съем пропускной способности поездами категорий, отличных от расчетной [7], пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{необх}}$ — снижение пропускной способности по технически допустимому коэффициенту заполнения, формула (7.2) Методики [6], пар поездов/сут; $\Delta n_{\text{нер}}$ — снижение пропускной способности по коэффициенту неравномерности грузового движения, формула (8.4) Методики [6], пар поездов/сут. При этом реализуемая пропускная способность, пар поездов/сут, определяется по формуле

$$n_{\text{р}} = n^* + \Delta n_{\text{нер}}. \qquad (3)$$

Учет влияния эксплуатационных факторов при расчете провозной способности определяет соотношение

$$\Gamma^{**} = \Gamma - \Delta\Gamma, \qquad (4)$$

где Γ^{**} — результирующая провозная способность с учетом ограничений на пути следования транспортного потока, млн т/год; Γ — результирующая провозная способность полигона, млн т/год, определяемая в зависимости от значений n^*; $\Delta\Gamma$ — часть провозной способности, учитывающая влияние смежных участков (объективные потери из-за структуры корреспонденций), млн т/год.

Вариативность стратегий организации движения и проектно-строительных работ. Транспортные системы должны функционировать в течение всех сезонных и оперативных изменений эксплуатационной обстановки и потребностей в перемещении грузов и пассажиров. Как показано в исследовании [4], для этого в мероприятия по развитию инфраструктуры должны закладываться возможности эффективного применения вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети. Это касается унификации массы и длины грузовых поездов на параллельных ходах, размещения и развития сортировочных, пассажирских (в том числе пассажирских технических) станций, транспортно-логистических центров, вагонно-линейного и локомотивного хозяйства, концентрации и (или) дублирования однородных операций в транспортных узлах, организации подготовки порожних вагонов и размещения грузовых вагонов неэксплуатируемого парка.

В условиях текущей эксплуатации это позволит снижать общую ресурсоемкость перевозочного процесса путем перенастройки режимов функционирования за счет перенаправления транзитных вагонопотоков, перераспределения сортировочной работы, дифференциации норм массы и длины составов, использования непарности движения и др. Например, при наличии параллельных двухпутного и однопутного железнодорожных ходов организация пропуска поездов повышенной длины в порожнем направлении на двухпутном ходу позволяет создать непарность движения на однопутном ходу, увеличить за счет этого число поездов в грузовом направлении.

Значение вариантных технологических режимов возрастает в периоды ремонтно-строительных работ, которые необходимо завершать на конкретных объектах к определенным календарным срокам. Потребность в интенсивном ведении этих работ с закрытием путей и перерывами в движении поездов нередко совпадает с потребностью в интенсификации перевозок.

Имеет место задача компромиссного управления по обеспечению, с одной стороны, растущих объемов грузовых и пассажирских перевозок, с другой — необходимого объема реконструктивных работ по развитию инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности.

В каждом сценарии организации перевозок, строительных и ремонтных работ i для каждого месяца (в общем случае — календарного периода) t имеют место планируемые среднесуточные размеры грузового движения $n_{\text{пл}}(t)_i$, поездов/сут, объемы ремонтных и реконструктивных работ $W(t)_i$, км, технически допустимые среднесуточные размеры грузового движения $n_{\text{т}}(t)_i$, поездов/сут, и их снижение из-за закрытия устройств при ведении работ $\Delta n_{\text{т}}(t)_i$, поездов/сут. Величина риска неосвоения объемов перевозок в календарном периоде t составляет

$$\Delta\Gamma(t)_i = \begin{cases} \left[n_{\text{пл}}(t)_i - \left(n_{\text{т}}(t)_i - \Delta n_{\text{т}}(t)_i\right)\right]\varphi Q_{\text{бр}} D(t)_i, \\ \text{если } n_{\text{пл}}(t)_i - \left(n_{\text{т}}(t)_i - \Delta n_{\text{т}}(t)_i\right) > 0; \\ 0, \\ \text{если } n_{\text{пл}}(t)_i - \left(n_{\text{т}}(t)_i - \Delta n_{\text{т}}(t)_i\right) \le 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $Q_{\text{бр}}$ — средневзвешенная масса брутто грузовых поездов, проследующих по участку в грузовом направлении за расчетный период, т; φ — отношение массы состава нетто к массе состава брутто (с учетом порожнего вагонопотока, следующего в грузовых поездах в грузовом направлении); $D(t)_i$ — число суток в календарном периоде t.

Например, сценарий 1 с максимальным объемом ремонтных и реконструктивных работ за расчетный период $t = 1, \ldots, T$ генерирует потери объемов перевозок из-за закрытия устройств

$$A_1 = \sum_{t=1}^{T} \Delta\Gamma(t)_1. \quad (6)$$

Сценарий 2 с уменьшенным объемом работ соответственно уменьшает потери $\Delta n_{\text{т}}(t)_2$, но в последующих календарных периодах уменьшаются значения $n_{\text{т}}(t)_2$ из-за более позднего ввода объектов в эксплуатацию и несвоевременного проведения ремонтов. В случаях, когда на рассчитываемых участках не соблюдаются установленные межремонтные сроки, в расчете наличной пропускной способности должно приниматься увеличение перегонных времен хода поездов из-за длительно действующих ограничений скорости, а также снижение коэффициента надежности $\alpha_{\text{н}}$ из-за вероятного увеличения числа и длительности технических отказов. В результате потери объемов перевозок за расчетный период могут составить

$$A_2 = \sum_{t=1}^{T} \Delta\Gamma(t)_2 > A_1. \quad (7)$$

Для снижения рисков неосвоения объемов перевозок необходимы:

1) технология ремонта инфраструктуры, обеспечивающая повышение выработки в «окна» и на закрытых перегонах (по сравнению с фактически достигнутой в настоящее время);

2) проекты организации строительства со снижением необходимого времени закрытия движения;

3) организация движения в периоды ограничения в движении на основе методов форсированного использования пропускной способности;

4) согласованное планирование погрузки и этапности ремонтно-строительных работ.

В терминах [15] задачи (1)–(3) являются задачами самоуправления соответственно в ремонтном

комплексе инфраструктуры, проектно-строительном комплексе и в вертикали управления движением, а задача (4) — задачей координации.

На основе данных о перспективных объемах погрузки на расчетные 10 лет с использованием АС ПРОГРЕСС [16] выполняются вариантные расчеты рисков неосвоения перевозок. Результаты расчетов при двух вариантах ремонта инфраструктуры и реализации строительных мероприятий по одному из сетевых направлений представлены на рис. 3 и 4. Средневзвешенные значения выработки путевых машинных станций (ПМС) по всем видам ремонтов на втором, третьем и четвертом году эксплуатации снижаются относительно первого года в связи с износом существующей техники и незначительной закупкой новой (см. рис. 3). Риски неосвоения перевозок достигают 6 млн т в год и более. В варианте, когда в течение 5–10 лет идет равномерая закупка новых путевых машин и увеличение производительности ПМС при росте объемов перевозок на всем рассматриваемом периоде, уже к пятому году риски неосвоения перевозок снижаются до минимума.

Результирующие показатели передачи поездов по междорожному стыковому пункту приведены на рис. 4, где для вариантов с увеличением выработки ПМС и без него приведена технически допустимая передача для стыкового пункта $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$ в сравнении с планируемой пропускной способностью $n^{**}_{\text{год}}$ и планируемым образованием поездопотока на стыковой пункт $n_{\text{обр}}$.

Процессы проектирования, строительства и реконструкции объектов железнодорожного транспорта в силу своей длительности, капиталоемкости и ресурсоемкости диктуют требования инвариантности реконструктивных мероприятий к изменениям исходных данных. Строительство раздельного пункта, станционного парка, дополнительного перегонного главного пути не может быть назначено или отменено исходя из текущих колебаний потоковой нагрузки, не всегда надежно прогнозируемых. При этом в зависимости от изменений транспортных потоков и технологии перевозочного процесса будут изменяться компоненты технологии организации движения и эксплуатационные показатели. Система расчетов интенсификации перевозок в условиях инфраструктурного развития полигонов сети железных дорог должна обеспечивать минимизацию среднего экономического риска, а также применять робастные алгоритмы, обеспечивающие устойчивость рассчитанных мероприятий к изменениям входных параметров [17]. При этом следует рассчитывать граничные значения эксплуатационных показателей, в пределах которых наборы реконструктивных мероприятий не потребуют перехода к более мощному техническому развитию.

При значительных резервах пропускной способности железнодорожных участков или направлений

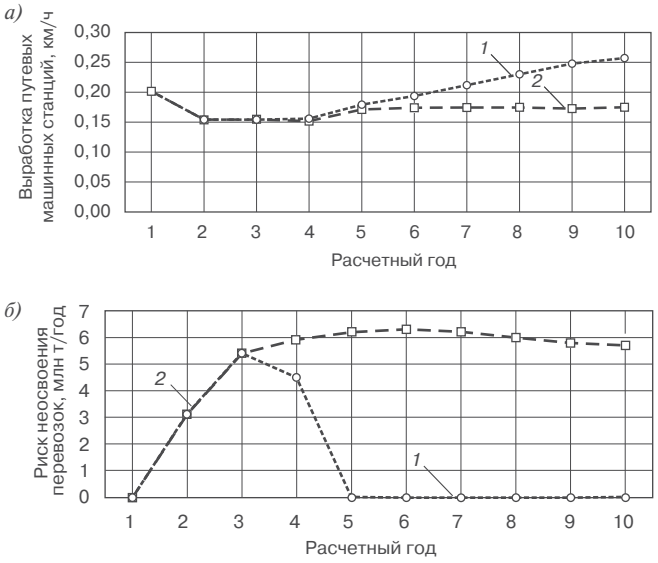

Рис. 3. Выработка путевых машинных станций (*а*) и риски неосвоения перевозок (*б*) на расчетные годы:
1 — с повышением производительности;
2 — без повышения производительности

Fig. 3. Development of track laying machine stations (*a*) and the risks of non-development of transportation (*b*) for the calculation years:
1 — with increased productivity; *2* — no performance improvement

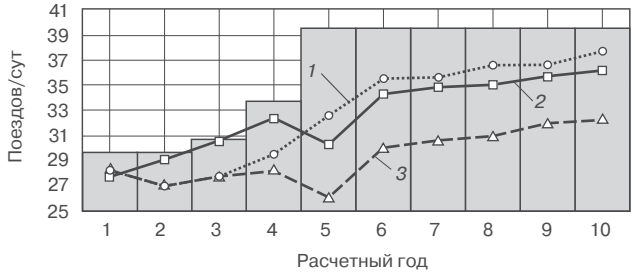

Рис. 4. Изменение технически допустимых размеров передачи по стыковому пункту полигона $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$:
1 — $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$ с увеличением выработки путевых машинных станций; *2* — планируемое образование поездопотока на стыковой пункт $n_{\text{обр}}$; *3* — $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$ без увеличения выработки путевых машинных станций; выделенная зона — планируемая пропускная способность $n^{**}_{\text{год}}$

Fig. 4. Change in the technically permissible dimensions of the transfer at the polygon division point $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$:
1 — $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$ with an increase in the output of track laying machine stations; *2* — planned formation of train traffic to the division point $n_{\text{обр}}$; *3* — $n^{**}_{\text{год}} - \Delta n_{\text{год}}$ without an increase in the output of the track laying machine stations; allocated area — planned traffic capacity $n^{**}_{\text{год}}$

для устойчивой поездной работы в качестве расчетных следует принять среднесуточные размеры грузового движения максимального месяца, увеличенные на полтора среднеквадратичных отклонения [18], но в условиях исчерпания инфраструктурных и графиковых ресурсов, необходимости проведения «окон»

Таблица 3

Классификация мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях исчерпания инфраструктурных и графиковых ресурсов

Table 3

Classification of measures to influence the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources

Меры воздействия	Содержание мер	Влияние на элементы расчета						
		$n_н$	$\Delta n_{съема}$	$\Delta n_{нер}$	n^*	Г	ΔГ	Г**
1. Реконструктивные	1.1. Увеличение наличной пропускной способности перегонов, внутриузловых ходов и соединительных ветвей	↑			↑			↑
	1.2. Реконструкция промежуточных станций, обеспечивающая снижение потерь пропускной способности с пропуском поездов заданных (в том числе гибких) норм массы и длины составов		↓		↑	↑		↑
2. Технологические	2.1. Снижение потерь пропускной способности из-за влияния смежных устройств путем трансформации потоковой структуры и графика движения						↓	↑
	2.2. Освоение пикового поездообразования за счет гибких (в сторону увеличения) норм массы и длины поездов			↓	↑	↑		↑
	2.3. Применение вариантных путей пропуска поездов и непарности движения				↑		↓	↑
	2.4. Технология организации вагонопотоков в поезда на инфраструктурах общего и необщего пользования, обеспечивающая эффективное использование лимитирующих транспортных объектов					↑	↓	↑
3. Организационно-технические	3.1. Согласованное оперативное планирование и заадресовка груженых и порожних вагонов в соответствии с доступными инфраструктурными и графиковыми ресурсами			↓	↑		↓	↑
	3.2. Структура оперативного управления движением, обеспечивающая минимум потерь времени и затрат на координацию решений на стыках управляющих звеньев			↓	↑		↓	↑
4. Комплексные	4.1. Уменьшение коэффициентов съема пропускной способности поездами различных категорий		↓		↑			↑
	4.2. Создание и использование регулирующих емкостей станционных парков на железнодорожных инфраструктурах общего и необщего пользования			↓	↑		↓	↑
	4.3. Технология тягового обслуживания, обеспечивающая реализуемость рассчитываемой системы поездной работы			↓	↑		↓	↑

по ремонту, строительству и реконструкции инфраструктуры требуются решения на базе комплекса мер, классификация которых представлена в табл. 3. Здесь показано влияние этих мер (↑ — увеличение, ↓ — уменьшение) на составляющие формул (2)–(4).

Для технико-экономических расчетов по решению данной задачи разработан и развивается комплекс гибридных математических моделей в составе взаимодействующих прикладных автоматизированных систем [19, 20] с использованием результатов [21, 22, 23].

Заключение и обсуждение. Баланс провозной способности железнодорожных полигонов определяется, с одной стороны, их перевозочной мощностью, с другой — реально достижимыми уровнями ее использования при определенной динамике транспортных потоков, исходя из беспрепятственного продвижения последних.

Разграничение понятий потребной (необходимой), планируемой (проектируемой), расчетной, наличной пропускной и провозной способностей в новой Инструкции по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» обеспечивает оценку необходимости мероприятий по развитию пропускной способности либо по ремонту и модернизации существующей железнодорожной инфраструктуры.

Оценка целевых показателей комплексных инвестиционных проектов предусматривает вычисление результирующей мощности направлений и полигонов железнодорожной сети с применением сетевых оптимизационных моделей с количественной оценкой влияния фактора смежных систем на использование наличной пропускной способности железнодорожной инфраструктуры путем имитационных расчетов.

Координация задач обеспечения предъявляемых объемов грузовых и пассажирских перевозок, необходимого объема реконструктивных работ по развитию железнодорожной инфраструктуры и ремонтных работ по поддержанию необходимого коэффициента ее готовности достигается автоматизированным прогнозом ресурсов сети и методами компромиссного управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новое в расчетах интенсификации перевозок в условиях инфраструктурного развития полигонов сети железных дорог / М. А. Агеева [и др.] // Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сб. докл. I Междунар. науч.-практ. конф. (Щербинка, 26–27 августа 2021 г.). М.: АО «ВНИИЖТ», 2021. С. 4–12.

2. Бодюл В. И. Повышение ритмичности и эффективности транспортного производства на основе снижения внутрисуточной неравномерности грузовых перевозок на железных дорогах: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. М., 2006. 318 с.

3. Шенфельд К. П., Сотников Е. А. Развитие методов управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в современных условиях. М.: Научный мир, 2015. 200 с.

4. Бородин А. Ф. Комплексные решения проблем развития инфраструктуры и перевозочных ресурсов // Мир транспорта. 2017. Т. 15, № 1 (68). С. 6 –17.

5. Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 4 марта 2022 г. № 545/р. 364 с. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

6. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования [Электронный ресурс]: утв. приказом Минтранса России от 18 июля 2018 г. № 266. URL: http://docs.cntd.ru/document/542629643 (дата обращения: 20.12.2021).

7. Кириллова С. Ю., Николаев К. Ю. К определению коэффициентов съема пропускной способности участков железных дорог // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79, № 4. С. 230–238. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238.

8. Методика классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р. URL: https://base.garant.ru/73573702 (дата обращения: 22.12.2021).

9. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

10. Шухина Е. Е., Кисельгоф Г. К., Низовский А. В. Совершенствование систем интервального регулирования // Железнодорожный транспорт. 2021. № 12. С. 11–14.

11. Бородин А. Ф. Рациональное использование мощностей сортировочных комплексов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1993. № 8. С. 12–18.

12. Методика расчета планируемых и фактических показателей провозной и пропускной способностей железнодорожных магистралей и железнодорожных подходов к портам (в направлении портов и пограничных переходов [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 июля 2020 г. № 1511/р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».

13. Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. № 2101-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2018. № 42 (Ч. II). Ст. 6480.

14. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 324 с.

15. Михалевич В. С., Волкович В. Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М.: Наука,1982. 288 с.

16. Бородин А. Ф., Панин В. В. Автоматизированная система прогноза ресурсов сети // Железнодорожный транспорт. 2017. № 4. С. 18–27.

17. Бородин А. Ф. Проблемы разработки генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2017. № 8. С. 34–42.

18. Некрашевич В. И., Бородин А. Ф., Мазанова И. С. Нормирование графиковых размеров движения грузовых поездов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1995. № 6–7–8. С. 8–14.

19. Бородин А. Ф. Автоматизация решения задач развития и использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов в Стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): материалы Восьмой науч.-техн. конф. (Москва, 21 ноября 2019 г.) / под ред. В. Г. Матюхина, В. И. Строгонова. М.: АО «НИИАС», 2019. С. 22–26.

20. Алгоритмические решения задач эффективного использования и развития железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2019. № 3. С. 12–22.

21. Козлов П. А., Колокольников В. С. Структурно-функциональная оптимизация больших полигонов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 3–7.

22. Колокольников В. С., Слободянюк И. Г. Технология макромоделирования полигонов // Транспорт Урала. 2019. № 3 (62). С. 48–51.

23. Колокольников В. С. Структурно-функциональная оптимизация полигонов на сети железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08. Екатеринбург, 2020. 302 с.

REFERENCES

1. Ageeva M. A., Borodin A. F., Dmitriev E. O., et al. Novoe v raschetakh intensifikatsii perevozok v usloviyakh infrastrukturnogo razvitiya poligonov seti zheleznykh dorog [New in calculations of the transportation intensification under the conditions of infrastructural development of railway network polygons]. Nauka 1520 VNIIZhT: Zaglyani za gorizont [Science 1520 VNIIZhT: Look beyond the horizon]. Procs. of I Int. science conf. (Shcherbinka, August 26–27, 2021). Moscow: VNIIZhT Publ.; 2021. P. 4–12. (In Russ.).

2. Bodyul V. I. Povyshenie ritmichnosti i effektivnosti transportnogo proizvodstva na osnove snizheniya vnutrisutochnoy neravnomernosti gruzovykh perevozok na zheleznykh dorogakh [Improving the rhythm and efficiency of transport production based on the reduction of intraday irregularity of freight traffic on railways]. Dr. of Sci thesis: 05.22.08. Moscow; 2006. 318 p. (In Russ.).

3. Shenfel'd K. P., Sotnikov E. A. Razvitie metodov upravleniya perevozochnym protsessom na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh [Development of methods for managing the transportation process in railway transport in modern conditions]. Moscow: Nauchnyy mir Publ.; 2015. 200 p. (In Russ.).

4. Borodin A. F. Kompleksnye resheniya problem razvitiya infrastruktury i perevozochnykh resursov [Complex solutions to the problems of development of infrastructure and transportation resources]. *Mir transporta = World of Transport and Transportation*. 2017;15(1):6-17. (In Russ.).

5. Instruktsiya po raschetu propusknoy i provoznoy sposobnostey zheleznykh dorog OAO "RZhD" [Instructions for calculating the traffic and transportation capacities of the railway lines of Russian Railways]. Approved by the order of Russian Railways Company on

March 4, 2022 No. 545/r. 364 p. Access from the legal reference system ConsultantPlus. (In Russ.).

6. Metodika opredeleniya propusknoy i provoznoy sposobnostey infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta obshchego pol'zovaniya [Methodology for determining the traffic and transportation capacities of the public railway transport infrastructure]. Approved by the order of the Ministry of Transport of Russia on July 18, 2018 No. 266. URL: http://docs.cntd.ru/document/542629643 (access date: 20.12.2021). (In Russ.).

7. Kirillova S. Yu., Nikolaev K. Yu. K opredeleniyu koeffitsientov s"ema propusknoy sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog [To the determination of the capacity descheduling coefficients of railway sections]. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 2020;79(4):230-238. https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-4-230-238. (In Russ.).

8. Metodika klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy OAO "RZhD" [Methodology for the classification and specialization of railway lines of Russian Railways]. Approved by the order of Russian Railways Company on January 13, 2020 No. 28/r. URL: https://base.garant.ru/73573702 (access date: 22.12.2021). (In Russ.).

9. Sharapov S. N., Lyal'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov [Classification and specialization of railway lines — the basis for optimizing operating costs]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2016;(7):50-60. (In Russ.).

10. Shukhina E. E., Kisel'gof G. K., Nizovskiy A. V. Sovershenstvovanie sistem interval'nogo regulirovaniya [Improving the systems of interval control]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2021;(12):11-14. (In Russ.).

11. Borodin A. F. Ratsional'noe ispol'zovanie moshchnostey sortirovochnykh kompleksov [Rational use of capacities of marshalling complexes]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1993;(8):12-18. (In Russ.).

12. Metodika rascheta planiruemykh i fakticheskikh pokazateley provoznoy i propusknoy sposobnostey zheleznodorozhnykh magistraley i zheleznodorozhnykh podkhodov k portam (v napravlenii portov i pogranichnykh perekhodov) [Methodology for calculating the planned and actual indicators of the traffic and transportation capacities of railway lines and railway approaches to ports (in the direction of ports and border crossings)]. Approved by the order of Russian Railways Company on July 14, 2020 No. 1511/r. Access from the legal reference system ConsultantPlus. (In Russ.).

13. Kompleksnyy plan modernizatsii i rasshireniya magistral'noy infrastruktury na period do 2024 goda [Comprehensive plan for the modernization and expansion of the main infrastructure for the period up to 2024]. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation on September 30, 2018 No. 2101-r. *Sobranie zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii = Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2018;42(II):Art.6480. (In Russ.).

14. Maynika E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh [Optimization algorithms for networks and graphs]. Moscow: Mir Publ.; 1981. 324 p. (In Russ.).

15. Mikhalevich V. S., Volkovich V. L. Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh system [Computational methods for research and design of complex systems]. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 288 p. (In Russ.).

16. Borodin A. F., Panin V. V. Avtomatizirovannaya sistema prognoza resursov seti [Automated system for forecasting railway network resources]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2017;(4):18-27. (In Russ.).

17. Borodin A. F. Problemy razrabotki general'noy skhemy razvitiya seti zheleznykh dorog OAO "RZhD" [Problems of creation of the general scheme for the development of the railway network of Russian Railways]. *Zheleznodorozhnyy transport = Railway Transport*. 2017;(8):34-42. (In Russ.).

18. Nekrashevich V. I., Borodin A. F., Mazanova I. S. Normirovanie grafikovykh razmerov dvizheniya gruzovykh poezdov [Rationing of the schedule dimensions of the movement of freight trains]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta (Vestnik VNIIZhT) = Russian Railway Science Journal*. 1995;(6-7-8):8-14. (In Russ.).

19. Borodin A. F. Avtomatizatsiya resheniya zadach razvitiya i ispol'zovaniya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozochnykh resursov v Strategii tsifrovoy transformatsii OAO "RZhD" [Automation of solving problems of development and use of railway infrastructure and transportation resources in the Digital Transformation Strategy of Russian Railways]. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019) [Intelligent Control Systems for Railway Transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019)]. Materials of the VIII scientific and technical conf. (Moscow, November 21, 2019). Moscow: NIIAS Publ.; 2019. P. 22–26. (In Russ.).

20. Borodin A. F., Panin V. V., Prokof'eva E. S., Saybatalov R. F. Algoritmicheskie resheniya zadach effektivnogo ispol'zovaniya i razvitiya zheleznodorozhnoy infrastruktury i perevozochnykh resursov [Algorithmic solutions for the problems of efficient use and development of railway infrastructure and transportation resources]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD" = Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2019;(3):12-22. (In Russ.).

21. Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S. Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya bol'shikh poligonov zheleznodorozhnogo transporta [Structural and functional optimization of large polygons of railway transport]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2018;3(58):3-7. (In Russ.).

22. Kolokol'nikov V. S., Slobodyanyuk I. G. Tekhnologiya makromodelirovaniya poligonov [Technology of macro-modeling of polygons]. *Transport Urala = Transport of the Urals*. 2019;3(62):48-51. (In Russ.).

23. Kolokol'nikov V. S. Strukturno-funktsional'naya optimizatsiya poligonov na seti zheleznykh dorog [Structural and functional optimization of polygons on the railway network]. Dr. of Sci. thesis: 05.22.08. Ekaterinburg; 2020. 302 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Федорович БОРОДИН,
д-р техн. наук, профессор, начальник отдела технологического обеспечения автоматизированных систем, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 279058, https://orcid.org/0000-0002-3466-6818

Виталий Владимирович ПАНИН,
канд. техн. наук, доцент, заместитель генерального директора, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); доцент, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 403717, https://orcid.org/0000-0002-3568-0961

Марина Андреевна АГЕЕВА,
старший научный сотрудник, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24), Author ID: 1154606, https://orcid.org/0000-0002-7412-5661

Андрей Юрьевич СОКОЛОВ,
заместитель заведующего отделением эксплуатации железных дорог и взаимодействия транспортных систем, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24), Author ID: 976205, https://orcid.org/0000-0003-3498-5015

Светлана Юрьевна КИРИЛЛОВА,
ведущий инженер, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24),
Author ID: 900481, https://orcid.org/0000-0002-2747-4463

Егор Олегович ДМИТРИЕВ,
инженер 1 категории, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 1052780, https://orcid.org/0000-0002-3972-604X

Артем Андреевич КРАВЧЕНКО,
инженер, Институт экономики и развития транспорта (ИЭРТ, 105066, г. Москва, ул. Новорязанская, д. 24); аспирант, Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), 127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1154605, https://orcid.org/0000-0002-9130-0716

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN,
Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Technological Support of Automated Systems, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Head of the Department of Management of operational work and safety in transport, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 279058, https://orcid.org/0000-0002-3466-6818

Vitaliy V. PANIN,
Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy General Director, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Associate Professor, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 403717, https://orcid.org/0000-0002-3568-0961

Marina A. AGEEVA,
Senior Researcher, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.),
Author ID: 1154606, https://orcid.org/0000-0002-7412-5661

Andrey Yu. SOKOLOV,
Deputy Head of the Department of Railway Operation and Interaction of Transport Systems, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.), Author ID: 976205, https://orcid.org/0000-0003-3498-5015

Svetlana Yu. KIRILLOVA,
Leading Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.),
Author ID: 900481, https://orcid.org/0000-0002-2747-4463

Egor O. DMITRIEV,
1st Category Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1052780, https://orcid.org/0000-0002-3972 -604X

Artem A. KRAVCHENKO,
Engineer, Institute of Economics and Development of Transport (105066, Moscow, 24, Novoryazanskaya St.); Postgraduate, Russian University of Transport (127994, Russia, Moscow, 9, bldg. 9, Obraztsova St.), Author ID: 1154605, https://orcid.org/0000-0002-9130-0716

ВКЛАД АВТОРОВ

Андрей Федорович БОРОДИН. Постановка цели, выбор структуры и методологии исследования (15%).

Виталий Владимирович ПАНИН. Обоснование применения методов компромиссного управления (15%).

Марина Андреевна АГЕЕВА. Создание алгоритма расчета целевых показателей комплексных инвестиционных проектов (10%).

Андрей Юрьевич СОКОЛОВ. Исследование пропускной способности участков и результирующей перевозочной мощности полигонов сети (15%).

Светлана Юрьевна КИРИЛЛОВА. Исследование съема пропускной способности поездами различных категорий (15%).

Егор Олегович ДМИТРИЕВ. Исследование вариантных технологических режимов и сценарное моделирование освоения перевозок (15%).

Артем Андреевич КРАВЧЕНКО. Исследование мер воздействия на неравномерность транспортных процессов в условиях исчерпания инфраструктурных и графиковых ресурсов (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Andrey F. BORODIN. Goal statement, choosing the structure and methodology of the study (15%).

Vitaliy V. PANIN. Substantiation of the application of compromise management methods (15%).

Marina A. AGEEVA. Creation of an algorithm for calculating the target indicators of complex investment projects (10%).

Andrey Yu. SOKOLOV. Study of the traffic capacity of the sections and the resulting transportation capacity of the network polygons (15%).

Svetlana Yu. KIRILLOVA. Study of capacity removal by trains of various categories (15%).

Egor O. DMITRIEV. Study of variant technological modes and scenario modelling of transportation development (15%).

Artem A. KRAVCHENKO. Study of measures to influence the unevenness of transport processes in the conditions of depletion of infrastructure and scheduling resources (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials and methods. There is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.01.2022, первая рецензия получена 29.01.2022, вторая рецензия получена 03.03.2022, принята к публикации 25.05.2022.
The article was submitted 27.01.2022, first review received 29.01.2022, second review received 03.03.2022, accepted for publication 25.05.2022.