



ТРАНСПОРТНЫЕ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Оригинальная статья

УДК 656.222:519.872

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>

EDN: <https://elibrary.ru/omugju>



Оценка пропускной способности однопутного участка БАМа с использованием теории массового обслуживания

М. Л. Жарков¹✉, А. Л. Казаков^{1,2}, А. В. Супруновский²

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН), Иркутск, Российская Федерация,

² Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС), Иркутск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Целью исследования является оценка пропускной способности Северомуйского участка Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Выбранный участок является типовым для БАМа и состоит в основном из однопутных перегонов. Одна из станций является участковой (на ней осуществляется смена вида локомотивной тяги), на участке проложены пути через горный перевал и тоннель, что влечет за собой возможность организации нескольких маршрутов движения поездов. На отдельных пунктах, как правило, выполняются однотипные операции, в частности пропуск с остановкой и без остановки, технический осмотр, смена бригад, а на перегонах — пропуск. При этом на их продолжительность влияют внешние воздействия, которые возникают случайным образом, в частности погода, поломки, человеческий фактор.

Материалы и методы. Используются методы математического и компьютерного моделирования. Для построения математической модели движения поездов по участку применены положения теории массового обслуживания. В ней изучаются объекты, в которых регулярно выполняются однотипные операции, а их продолжительность не детерминирована. К таким объектам и относятся железнодорожные системы. Для анализа получаемых моделей использовано имитационное моделирование.

Результаты. Построена математическая модель движения поездов по Северомуйскому участку в виде сети массового обслуживания с двумя входящими потоками заявок. С ее помощью проведено несколько вычислительных экспериментов. На основе их результатов определены узкие места в инфраструктуре участка и оценена эффективность введения частично пакетного графика движения поездов на нем.

Обсуждение и заключение. Установлено, что на данный момент Северомуйский участок имеет запас пропускной способности, и поездопоток на нем может быть увеличен с текущих 23 до 27 пар поездов в сутки. Показано, что введение частично пакетного графика приводит к снижению задержек поездов на участке, но требует модернизации некоторых станций и не позволяет увеличить поездопоток выше обозначенного уровня. Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение частично пакетного графика на данном участке нецелесообразно, и для существенного (в разы) повышения его пропускной и провозной способности необходимо создание двухпутного сообщения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный полигон, железнодорожный участок, поездопоток, математическое моделирование, теория массового обслуживания, имитационное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В. Оценка пропускной способности однопутного участка БАМа с использованием теории массового обслуживания // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 4. С. 370–384. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>.

✉ zharkm@mail.ru (М. Л. Жарков)

© Жарков М. Л., Казаков А. Л., Супруновский А. В., 2023



TRANSPORT AND TRANSPORT TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Original article

UDK 656.222:519.872

DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>

EDN: <https://elibrary.ru/omugju>



Estimation of line capacity of single-track section of Baikal-Amur Mainline using mass service theory

Maxim L. Zharkov¹✉, Alexander L. Kazakov^{1,2}, Anton V. Suprunovsky²

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The research is intended to assess the line capacity of the Severomuisky Section of the Baikal-Amur Mainline (BAM). The selected section is typical for the BAM and consists mainly of single-track sections. One of the stations is a sectional station (where the type of locomotive traction is changed), the section has tracks through a mountain pass and a tunnel, which enables several train traffic routes. Separate stations generally perform uniform operations, such as stop and non-stop make way, technical inspection, change of crews, as well as make way on sections. At the same time, their duration is affected by random external influences, such as weather, breakdowns, and human factor.

Materials and methods. The authors use methods of mathematical and computer modelling and apply the mass service theory to build a mathematical model of traffic working along the section. It studies objects where uniform operations are regularly performed and their duration is not deterministic. Such objects include railway systems. Simulation modelling was used to analyse the resulting models.

Results. The researchers built a mathematical model of train traffic along the Severomuisky section in the form of a mass service network with two request inflows. It is used to conduct a number of computational experiments. Their results identified bottlenecks in the section infrastructure and assessed the effectiveness of the partial batch train time-table on the section.

Discussion and conclusion. The authors found that the Severomuisky Section now has a line capacity reserve, and its train traffic may be increased from the current 23 to 27 pairs of trains per day. The studies show that partial batch time-table reduces train delays on the section but requires upgrades to some stations and does not allow for an increase in train traffic above the designated level. Thus, it is concluded that partial batch time-table on this section is inexpedient, and a significant (by times) increase in its line and traffic-carrying capacity requires the creation of a double-track service.

KEYWORDS: Eastern Polygon, railway section, train traffic, mathematical modelling, mass service theory, simulation modelling

FOR CITATION: Zharkov M. L., Kazakov A. L., Suprunovsky A. V. Estimation of line capacity of single-track section of Baikal-Amur Mainline using mass service theory. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(4):370-384. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-4-370-384>.

Введение. Санкционная политика Европейского союза повлекла за собой разворот грузопотоков в России с Запада на Восток, в частности в порты Дальнего Востока и далее — в страны Азиатско-Тихоокеанского региона. Важные маршруты на российской территории, по которым перевозятся большие объемы грузов, проходят через Восточный полигон [1] по Транссибирской и Байкало-Амурской магистралям (Транссиб и БАМ).

В настоящее время загрузка Восточного полигона в направлении Тихого океана приблизилась к критической, что вызывает необходимость развития его инфраструктуры [2]. Особое внимание при этом уделяется БАМу. Так, по нему проходит наиболее короткий железнодорожный маршрут из центральных регионов РФ к портам Тихоокеанского побережья. В зоне БАМа находятся крупные залежи полезных ископаемых. Его модернизация обеспечит (по разным оценкам) до 60% прироста объемов перевозимых грузов на всем Восточном полигоне [3].

В 2021 г. Правительство РФ утвердило паспорт инвестиционного проекта по увеличению к 2025 г. провозной способности Транссиба и БАМа в полтора раза — до 180 млн т в год¹. Согласно данному паспорту, на пяти из десяти участков БАМа планируется увеличить провозную способность практически в два раза (с 22–23 пар поездов до 43–44 пар), а на четырех — более чем в полтора (от 27 до 40 пар поездов в сутки). Для реализации таких масштабных планов необходима комплексная оценка текущего состояния участков и эффективности возможных мер по реконструкции, получить которую практически невозможно без применения методов математического и компьютерного моделирования.

Для решения подобных задач со второй половины XX в. на железнодорожном транспорте эффективным инструментом были признаны детерминированные модели. Они имеют огромное число конкретных видов и модификаций, которые, как правило, строятся на основе методов математического программирования и теории графов и позволяют найти оптимальные значения показателей работы железнодорожных объектов² [3]. Сейчас такой подход остается актуальным и применяется, в частности, для оптимизации маршрутов [4] и движения поездов [5], для расчета необходимого парка вагонов [6]. Однако с помощью подобных моделей можно получить содержательные результаты только тогда, когда работа исследуемого объекта не

подвержена значительному влиянию случайных факторов. В противном случае приходится применять стохастические (вероятностные) модели [7], в том числе и имитационные [8–11].

В настоящее время для решения задач по управлению железнодорожной инфраструктурой и ее развитию наиболее часто применяется имитационное моделирование, в основе которого используются динамические [5, 8, 9] и агентные [10, 11] модели. Такой подход, наряду с известными преимуществами [9, 10], обладает существенным недостатком — высокой сложностью разработки, что требует значительного времени как на изучение инструментария [10], так и на создание моделей конкретного объекта. При этом далеко не всегда имеющиеся модели возможно применить для другого объекта исследования и тогда приходится строить новую модель, нередко с «нуля».

Одним из широко известных альтернативных подходов для моделирования (в том числе и имитационного) объектов на железнодорожном транспорте является использование систем массового обслуживания (СМО) и их общего случая — сетей массового обслуживания (СеМО), которые представляют собой набор взаимосвязанных СМО (далее — узлов) [12, 13]. Этот математический аппарат позволяет значительно снизить сложность разработки моделей, он эффективен и достаточно универсален для описания объектов различного уровня. Так, в [14, 15] он применяется для представления и анализа работы отдельных элементов инфраструктуры железнодорожной станции. В [16] на основе СМО моделируется работа однопутного лимитирующего перегона, на который поезда поступают с двухпутного участка. В работах [17–19] СеМО используются для моделирования транспортных коридоров (участков) и оценки их пропускной способности при изменении объемов поездопотоков.

В исследованиях авторов СеМО также применялись для описания работы различных железнодорожных объектов. Были построены и исследованы модели грузовых и сортировочных железнодорожных станций (как российских, так и зарубежных) [20, 21], причем для описания транспортных потоков впервые была использована ВМАР-модель (Batch Markovian Arrival Process) [13].

В дальнейшем данный подход применялся для моделирования участков Транссиба [22] и Улан-Баторской железной дороги (УБЖД) [23]. Отметим, что УБЖД и БАМ имеют много сходных черт. Обе

¹ Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства РФ от 28.04.2021 № 1100-р. URL: <http://government.ru/docs/all/134155/> (дата обращения: 16.09.2023).

² Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД» [Электронный ресурс]: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2022 № 545/р (с изм. от 14.02.2023). URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

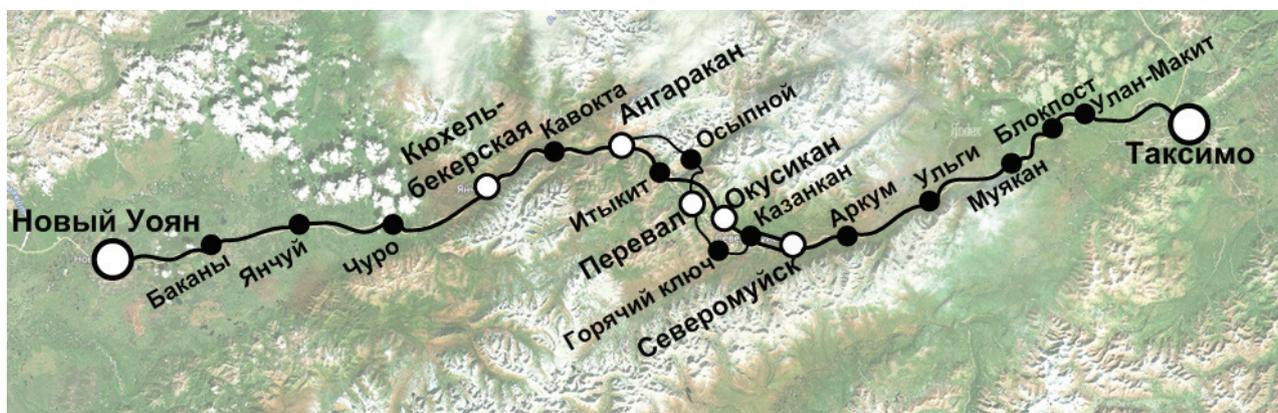


Рис. 1. Карта-схема Северомуйского участка

Fig. 1. Severomuyskiy Section diagram

дороги в основном состоят из однопутных перегонов и не электрифицированы. В частности, на БАМе электрифицирован только участок от Тайшета до станции Таксимо (34 % магистрали). УБЖД и БАМ обеспечивают транзитные перевозки, вследствие чего основную долю в структуре их поездопотоков занимают грузовые поезда (в среднем 80 % на УБЖД и 84 % на БАМе).

Тем не менее между этими дорогами имеются и существенные различия. На некоторых участках БАМа расположены обходные пути с параллельным движением поездов. Перегоны на нем в среднем длиннее, поэтому могут включать до пяти разъездов (на УБЖД, как правило, по одному). При этом на УБЖД поезда следуют по частично пакетному графику, а на БАМе он не применяется.

Целью данного исследования является разработка математического и алгоритмического аппарата для анализа текущей загрузки и максимальной допустимой пропускной способности участков БАМа, а также оценки эффективности введения частично пакетного графика движения на них. Для ее достижения ранее предложенная авторами методика математического моделирования [23] была усовершенствована, в частности учтено возможное наличие нескольких разъездов на одном перегоне и параллельных маршрутов на участке. В качестве объекта исследования выбран Северомуйский участок, так как он характеризуется всеми основными особенностями БАМа и, как отмечают исследователи [24], является одним из наиболее проблемных.

В последующих разделах представлены характеристика объекта исследования, краткое описание используемой методики и построенная на ее основе математическая модель движения поездов по участку. Затем приведены результаты ее численного исследования, на основе которых сделаны выводы о текущем состоянии объекта и перспективах его развития, выработаны рекомендации по улучшению работы.

Северомуйский участок БАМа. Рассмотрим железнодорожный участок БАМа [24] от станции Новьй Уоян до станции Таксимо (далее — Северомуйский участок) протяженностью 291 км. Он имеет следующие особенности. Во-первых, на станции Таксимо происходит смена вида тяги — электровозы заменяются на тепловозы при следовании на восток (четное направление) и обратно при следовании на запад (нечетное направление). Во-вторых, присутствует сложный горно-перевальный участок, затрудняющий движение. В конце 2003 г. был открыт Северомуйский тоннель, благодаря которому появилось параллельное движение поездов. На главном ходу, через тоннель, расположены 6 станций и 11 разъездов, а на обходном пути (обход тоннеля) — одна станция и два разъезда. Схема участка представлена на рис. 1, где белыми кругами отмечены станции, черными — разъезды.

Сначала опишем станции и разъезды на рассматриваемом участке, а также параметры перегонов, затем рассмотрим объемы и структуру поездопотоков.

Станция Таксимо — участковая, наиболее важная точка магистрали. На ней производится смена локомотивов, формирование и расформирование грузовых поездов, стоянка пассажирских поездов, смена локомотивных бригад, коммерческий и технический осмотры. На станции имеются приемо-отправочный парк (далее — ПО) на 14 путей, три из которых отводятся для пассажирских поездов, грузовой двор, включающий 7 погрузочно-разгрузочных путей, а также пути различного назначения (далее — технические): ходовой путь, вытяжные и соединительные пути, пути для отстоя и для ремонта вагонов, выставочный путь, предохранительные тупики.

Станция Новьй Уоян по характеру работы является участковой и выполняет следующие операции: прием, стоянка и отправление всех категорий поездов, смена локомотивных бригад, коммерческий и

Таблица 1
Время хода поезда по перегонам

Table 1

Train section time

Участок	Длина, км	$T_{гр}$, мин	$T_{пасс}$, мин
Новый Уоян — Баканы	17	21	18
Баканы — Янчуй	18	17	15
Янчуй — Чуро	19	20	18
Чуро — Кюхельбекерская	19	17	16
Кюхельбекерская — Кавокта	15	17	15
Кавокта — Ангаракан	13	17	14
Ангаракан — Итыкит	9	11	11
Итыкит — Окусикан	17	23	18
Окусикан — Казанкан	4	5	4
Казанкан — Северомуйск	12	14	13
Северомуйск — Аркум	12	12	11
Аркум — Ульги	17	16	14
Ульги — Муякан	18	17	15
Муякан — Блокпост	9	9	9
Блокпост — Улан-Макит	6	6	6
Улан-Макит — Таксимо	22	25	23
Обход Северомуйского тоннеля			
Ангаракан — Осыпной	12	16	14
Осыпной — Перевал	16	26	19
Перевал — Горячий ключ	22	33	25
Горячий ключ — Казанкан	14	20	16

технический осмотра. Она включает один погрузочно-разгрузочный путь и ПО на 10 путей.

Промежуточные станции Кюхельбекерская, Окусикан и Северомуйск имеют по одному ПО с четырьмя путями, Ангаракан и Перевал — с пятью.

Разъезды Кавокта, Казанкан и Аркум имеют по два пути, остальные включают по три пути.

На станции Таксимо, напомним, производится смена локомотивов и изменение длины составов, поэтому стоянка пассажирских поездов, в соответствии с расписанием на 2023 г., составляет 55–65 мин, обработка грузовых поездов — 90–120 мин. На остальных станциях стоянка (проследование) пассажирских поездов занимает 2–5 мин, грузовых — 3–10 мин. На станции Новый Уоян возможна смена локомотивных бригад, в этом случае время стоянки грузовых поездов увеличивается до 15–25 мин. Время прохождения разъезда без остановки прием равным двум минутам во всех случаях. Данные параметры были получены на основе анализа регламента работы станций³.

Северомуйский участок в основном состоит из однопутных перегонов. Только между станциями Казанкан (разъезд) и Северомуйск имеется двухпутное сообщение. Протяженность перегонов и скорости движения поездов на них отличаются. Эти данные представлены в табл. 1, где $T_{гр}$ и $T_{пасс}$ — среднее время хода грузовых и пассажирских поездов с учетом времени на разгон и торможение. Время хода и скорость движения поезда по перегонам были получены на основе анализа графика движения поездов Восточно-Сибирской железной дороги на 2021–2022 гг., а протяженность перегонов определена по анализу спутниковых снимков⁴.

Согласно графику движения поездов на 2021–2022 гг., в сутки в четном направлении (на восток) следует два грузовых местных, 18 грузовых транзитных и 4 пассажирских поезда, в нечетном (на запад) — один грузовой местный, 16 грузовых транзитных и 3 пассажирских поезда. Также со станции Таксимо один местный грузовой поезд отправляется в нечетном направлении. Следовательно, по Северомуйскому участку проследует 45 поездов в сутки. Из них по главному ходу проходит 40 поездов, остальные следуют через горно-перевальный участок в обход тоннеля.

На участке не используется пакетное движение поездов, так как пропускной способности достаточно для выполнения текущего объема работы. Тем не менее техническая возможность для введения такого графика имеется.

Методика моделирования работы однопутного железнодорожного участка

Предметное описание. Пропускная и провозная способности железнодорожных участков определяются множеством факторов, в частности числом и размером поступающих поездов, количеством станций и их путевым развитием, длиной перегонов, графиком движения поездов, надежностью инфраструктуры, применяемыми устройствами сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), эффективностью системы электроснабжения, продолжительностью ремонтных работ (окон).

В рамках одной модели учесть все перечисленные факторы не представляется возможным, поэтому в соответствии с целью исследования выделяются следующие элементы и характеристики железнодорожного участка, от которых непосредственно зависит его пропускная способность. Во-первых, число поступающих на участок поездов и их категорий, так как они определяют технические операции, проводимые с поездами на станциях, соотношение пар поездов в грузовом и пассажирском сообщениях, их маршруты

³ Там же. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

⁴ Использованы открытые данные.

следования. Во-вторых, инфраструктура железнодорожной сети: число станций и перегонов, а также количество разъездов и приемо-отправочных путей на них. В-третьих, продолжительность выполнения однотипных технических операций на станциях, в частности стоянки поезда, его осмотра и переформирования (далее — время обслуживания), а на разъездах и перегонах — время следования по ним (время хода). В-четвертых, вынужденные остановки поездов из-за занятости путей по маршруту их следования.

Следующие структурные элементы участка учитываются в модели опосредованно. Персонал станций влияет на продолжительность технических операций с поездами. От вида тяги локомотивов зависит время следования поезда по перегонам; от применяемой системы СЦБ — число поездов, которые могут одновременно следовать по перегону в одном направлении, длительность межпоездного интервала и количество вынужденных остановок из-за запрещающего сигнала светофора; от системы электроснабжения — число пакетов и их размеры при использовании частично пакетного графика движения поездов.

Методика математического моделирования движения поездов по железнодорожному участку. Ниже представлено краткое описание, более подробное можно найти в [22].

На железнодорожной станции, разъезде или перегоне регулярно выполняются однотипные операции с поездами. Их продолжительность регламентирована⁵ [3], однако подвержена влиянию множества различных, как правило, недетерминированных факторов, поэтому считается случайной величиной [7, 23]. Количество поездов ограничено и может принимать только целые положительные значения. Тогда работу станции (разъезда, перегона) можно описать случайным процессом с непрерывным временем и с дискретным числом состояний.

Для моделирования набора систем с такими свойствами, примером которого и является железнодорожный участок, применяется СеМО. Математическое описание выбранного объекта строится следующим образом. Входящий поездопоток с одного направления моделируется отдельным ВМАР-поток [13], с помощью которого возможно описать пакетное прибытие и опосредованно учесть различия в скоростях поездов разных категорий. Заявкой считается один поезд, группа заявок — пакет. Для моделирования процессов обработки поездов на станциях и разъездах применяются многоканальные СМО (узлы), количество

каналов в которых определяется числом путей в них, для перегонов — одноканальные СМО. Промежутки времени между поступлениями поездов на участок и продолжительность обслуживания поезда в системе являются случайными величинами, законы распределения которых подбираются по результатам анализа статистических данных с выбранного объекта, а в случае их отсутствия — на основе доступной информации и нормативных документов.

Полученные ВМАР-потоки и СМО образуют СеМО. В ней различные маршруты поездов по железнодорожному участку учитываются с помощью нескольких типов заявок, а вынужденная остановка поезда (пакета) — с помощью временной блокировки каналов предыдущего узла до тех пор, пока в следующем не освободится достаточное количество мест. Далее для полученной СеМО определяются показатели эффективности, которые зависят от целей исследования. Наконец, на их основе делается вывод об эффективности работы и пропускной способности изучаемого участка.

Математическая модель работы Северомуйского участка. Построим математическую модель движения поездов по Северомуйскому участку на основе предложенной методики. Необходимая информация об участке принята по данным из раздела «Северомуйский участок Байкало-Амурской магистрали»⁶. На данном этапе пакетное движение поездов не учитывается.

Математическое описание входящего поездопотока. Для описания поступления поездов применяется ВМАР-поток. Он задается управляющей цепью Маркова v , с непрерывным временем и конечным пространством состояний $\{1, \dots, W\}$. Время пребывания цепи в состоянии v имеет экспоненциальное распределение с параметром λ_v . После того как время пребывания цепи в состоянии v закончится, она с заданной вероятностью $p(v, v')$ переходит в другое состояние v' , и с вероятностью $f_v(k)$ генерируется группа заявок размера $k \geq 0$. Иначе говоря, ВМАР-поток включает W подпотоков, каждый из которых имеет свою интенсивность поступления λ_v , $v = \overline{1, W}$ и свое распределение размеров групп заявок $f_v(k)$. Всю эту информацию удобно хранить в матрицах D_k , которые задаются по формулам

$$\begin{aligned} (D_0)_{v,v'} &= -\lambda_v; (D_0)_{v,v'} = \lambda_v p(v, v') f_v(0); \\ (D_k)_{v,v'} &= \lambda_v p(v, v') f_v(k), v, v' = \overline{1, W}, k \geq 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Поезда на рассматриваемый железнодорожный участок поступают с двух направлений, каждое из

⁵ Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД». URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

⁶ Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)». URL: <http://government.ru/docs/all/134155/> (дата обращения: 16.09.2023).

которых описывается отдельным ВМАР-поток: ВМАР-1 — нечетное направление, 20 поездов/сут (17 грузовых и 3 пассажирских), или $\lambda_1 = 0,83$ заявки в час; ВМАР-2 — четное направление, 24 поезда/сут (20 грузовых и 4 пассажирских), или $\lambda_2 = 1$ заявка в час. Каждый ВМАР-поток будет иметь по два подпотока, которые описывают поступление грузовых и пассажирских поездов. В среднем пассажирские поезда движутся на 14% быстрее грузовых (см. табл. 1). Это различие учитывается опосредованно за счет разной интенсивности поступления заявок в подпотоках: для ВМАР-1 $\lambda_{1,1} = \lambda_1 = 0,83$ (груз.), $\lambda_{1,2} = 1,14\lambda_1 = 0,95$ (пасс.); для ВМАР-2 $\lambda_{2,1} = \lambda_2 = 1$ (груз.), $\lambda_{2,2} = 1,14\lambda_2 = 1,14$ (пасс.). Вероятности поступления поезда определенной категории получены как относительные частоты: для ВМАР-1 $p_{1,1} = 0,85$ (груз.), $p_{1,2} = 0,15$ (пасс.); для ВМАР-2 $p_{2,1} = 0,83$ (груз.), $p_{2,2} = 0,17$ (пасс.). Тогда матрицы D_k для ВМАР-потоков по формулам (1) будут иметь следующий вид:

$$D_{1,0} = \begin{pmatrix} -0,83 & 0 \\ 0 & -0,95 \end{pmatrix}, D_{1,1} = \begin{pmatrix} 0,706 & 0,124 \\ 0,807 & 0,143 \end{pmatrix};$$

$$D_{2,0} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1,14 \end{pmatrix}, D_{2,1} = \begin{pmatrix} 0,83 & 0,17 \\ 0,946 & 0,194 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Средняя интенсивность поступления заявок в матрицах (2) будет на 2% больше, чем значения λ_1 и λ_2 [13]. Подобная погрешность для целей моделирования не существенна, ей можно пренебречь.

Математическое описание работы станций. Каждая станция моделируется с помощью одной или более многоканальных СМО без очереди, которые, напомним, являются узлами СеМО. Количество каналов в них равно числу путей в соответствующем ПО. Грузовой двор не учитывается при моделировании, так как основная задача станций данного участка — организация транзита поездов, и грузовые функции на нее практически не влияют. Также в модели не учитываются технические пути. Тогда станция Новый Уоян описывается СМО с десятью каналами (узел 1), станции Кюхельбекерская, Окусикан и Северомуйск (узлы 7, 13 и 17) — четырехканальными СМО, Ангаракан и Перевал (узлы 10 и 30) — пятиканальными СМО. В ПО Таксимо операции по обработке пассажирских и грузовых поездов существенно отличаются, поэтому моделируем его работу двумя СМО: обслуживание пассажирских поездов (узел 26) — трехканальная СМО; обслуживание грузовых поездов (узел 27) — СМО с 11 каналами.

Продолжительность обслуживания в каналах соответствующей СМО имеет экспоненциальное

распределение для всех станций, кроме Таксимо. Экспоненциальное распределение выбрано, поскольку оно наиболее часто применяется для описания промежутков времени между поступлением транспортных средств на железной дороге [18, 19]. На основе анализа графика движения поездов установлено, что 96% поездов имеют время стоянки или проследования по станциям менее 5 мин. Поэтому параметр экспоненциального распределения подбирается так, чтобы 96% значений этой случайной величины попадало в интервал 0...5 мин.

На Таксимо производится множество различных операций с поездами: прием документов, коммерческий и технический осмотры, смена бригад и локомотивов, изменение длины состава. Они регламентированы, однако время их выполнения подвержено большому числу случайных факторов. При этом количество необходимых операций отличается для каждого поезда. В этой связи, согласно центральной предельной теореме, время обслуживания считается случайной величиной, которая подчиняется нормальному распределению. Его математическое ожидание определяется длительностью среднего числа выполняемых операций, а дисперсия — возможным отклонением от среднего согласно Инструкции по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»⁷.

Математическое описание работы разъездов и перегонов строится по-разному, в зависимости от их свойств и параметров. Между станциями Казанкан (разъезд) и Северомуйск имеется двухпутное сообщение, поэтому каждый путь моделируется одноканальной СМО — узлы 15 и 16. Примыкающий к ним перегон Окусикан — Казанкан описывается одной одноканальной СМО — узел 14. Разъезд (Казанкан) в данном случае не учитывается. Между станциями Кюхельбекерская — Ангаракан, Ангаракан — Перевал, Ангаракан — Окусикан и Перевал — Казанкан имеется по одному разъезду. Такие перегоны считаются стандартными и их работа описывается двумя одноканальными СМО — узлы 8, 9, 11, 12, 28, 29, 31 и 32. На перегоне Новый Уоян — Кюхельбекерская имеется три разъезда, его разделим на два отдельных перегона: Новый Уоян — Янчуй и Янчуй — Кюхельбекерская, которые описываем как стандартные, — узлы 2, 3, 5 и 6, а сам разъезд Янчуй рассматриваем как станцию — узел 4 (трехканальная СМО). Между Северомуйском — Таксимо размещено пять разъездов. Разделим этот участок на три стандартных перегона — узлы 18, 19, 21, 22, 24 и 25, а два оставшихся разъезда между ними (Ульги и Блокпост 2) будем считать

⁷ Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД». URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

станциями и описывать соответствующим образом — узлы 20 и 23. На рассматриваемом участке не применяется пакетный график движения, поэтому все каналы в представленных узлах будут обслуживать заявки по одной за раз.

Время обслуживания в узлах, которые моделируют разьезды, как и при описании станций, подчиняется экспоненциальному распределению. Интенсивность подбирается так, чтобы 95 % значений попадало в интервал 0...2 мин. Время обслуживания в узлах, которые моделируют перегоны, описывается нормальным распределением. Оно было выбрано по аналогии с описанием длительности операций по смене локомотивов. Его параметры подбираются из табл. 1 следующим образом: $a = (T_{гр} + T_{пасс}) / 2$ — математическое ожидание; $\sigma = (a - T_{пасс}) / 3$ — среднее квадратическое отклонение.

Таким образом, модель Северомуйского участка имеет вид СеМО с двумя ВМАР-потоками и 32 узлами, к которым еще нужно добавить два фиктивных узла — источники потока заявок [12, 13]. Формальное описание узлов в терминах теории массового обслуживания (N , символика Кендалла — Башарина) и законы распределения времени обслуживания T в них представлены в табл. 2, где $\exp(\lambda)$ — экспоненциальное распределение, λ — интенсивность; $N(a; \sigma)$ — нормальное распределение, a — математическое ожидание, σ — среднее квадратическое отклонение.

Моделирование разных маршрутов поездов. Для описания движения поездов в разных направлениях применяются несколько типов заявок. Для каждого типа строится своя маршрутная матрица P_z , $z = 1, 2, 3, \dots$, размера $(S + d) \times (S + d)$, где S — число узлов, d — количество источников потока заявок. Элементы матрицы — вероятности перехода заявки между узлами.

На Северомуйском участке поезда следуют в двух направлениях. В модели маршрут нечетного поезда описывается заявками типа 1, четного — типа 2, которые имеют отдельные маршрутные матрицы P_1 и P_2 размером 34×34 . Эти матрицы сильно разрежены и неинформативны, поэтому вероятности переходов представлены на рис. 2 в виде весовых коэффициентов. Заявка может сменить свой тип после обслуживания в узле. За счет этого в модели учитывается изменение маршрута (разворот) поезда. В узле 27 заявка типа 2 с вероятностью 0,05 меняет свой тип.

На рис. 2 квадраты соответствуют станциям, круги — перегонам, а треугольники — разьездам; веса у стрелок, которые направлены в нечетном направлении, задают ненулевые элементы маршрутной матрицы P_1 , а веса у стрелок с четным направлением — ненулевые элементы матрицы P_2 .

Вычислительные эксперименты. Провести анализ построенной СеМО аналитическими методами невозможно, поэтому исследование проводилось

Таблица 2

Описание узлов модели Северомуйского участка

Table 2

Description of nodes of the Severomuisky Section model

Название узла	Номер узла	Параметры узла	
		N	T
Станция Новый Уоян	1	ВМАР-2/М/10/0	$\exp(0,65)$
Новый Уоян — Янчуй, Янчуй — Кюхельбекерская	2, 3, 5, 6	*/G/1/0	$N(35,5; 1,5)$
Разьезд Янчуй	4	*/М/3/0	$\exp(1,5)$
Станция Кюхельбекерская	7	*/М/4/0	$\exp(0,65)$
Кюхельбекерская — Ангаракан, Ангаракан — Окусикан	8, 9, 11, 12	*/G/1/0	$N(31,5; 1,5)$
Станция Ангаракан	10	*/М/5/0	$\exp(0,65)$
Станция Окусикан	13	*/М/4/0	$\exp(0,65)$
Окусикан — Казанкан	14	*/G/1/0	$N(4; 0,33)$
Казанкан — Северомуйск	15, 16	*/G/1/0	$N(12,5; 0,5)$
Станция Северомуйск	17	*/М/4/0	$\exp(0,65)$
Северомуйск — Ульги	18, 19	*/G/1/0	$N(26,5; 1,2)$
Разьезд Ульги	20	*/М/3/0	$\exp(1,5)$
Ульги — Блокпост 2	21, 22	*/G/1/0	$N(25; 1)$
Разьезд Блокпост 2	23	*/М/3/0	$\exp(1,5)$
Блокпост 2 — Таксимо	24, 25	*/G/1/0	$N(30; 1)$
Станция Таксимо (пасс.)	26	ВМАР-1/G/3/0	$N(59; 1)$
Станция Таксимо (груз.)	27	ВМАР-1/G/11/0	$N(105; 5)$
Ангаракан — Перевал	28, 29	*/G/1/0	$N(37,5; 2,2)$
Станция Перевал	30	*/М/5/0	$\exp(0,65)$
Перевал — Казанкан	31, 32	*/G/1/0	$N(47; 2,7)$

с помощью программного комплекса, в котором реализована имитационная модель работы СеМО на языке программирования Object Pascal [21]. Далее представлены результаты трех вычислительных экспериментов: 1) при параметрах входящего потока заявок, соответствующих текущему объему поездопотоков; 2) при увеличении интенсивности входящего потока заявок в СеМО до уровня целевых показателей участка; 3) при групповом поступлении заявок (т. е. при введении частично пакетного графика движения). Длительность каждого эксперимента (модельное время) — 35 виртуальных сут (это минимальное время, за которое имитационная модель позволяет вычислить стационарные характеристики СеМО).

В табл. 3–5 приведены средние характеристики работы СеМО, полученные за 10 пусков программы (одна серия расчетов). В них используются следующие обозначения: V — число заявок, поступивших в систему

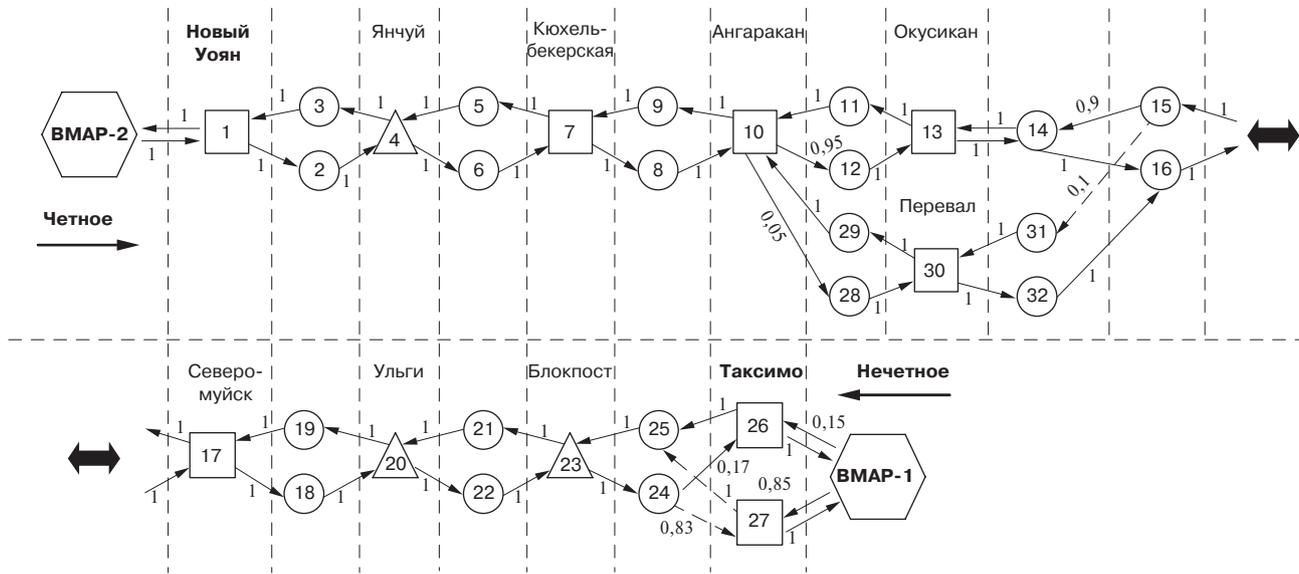


Рис. 2. Схема СеМО Северомуйского участка:
1...32 — номера узлов; 0,05...1 — показатели весовых коэффициентов

Fig. 2. Mass service network diagram of the Severomuyskiy section:
1...32 — node numbers; 0.05...1 — weight coefficients

за 35 сут; P_{loss} — вероятность отказа; $T_{ход}$ и $ST_{ход}$ — математическое ожидание (М) и среднее квадратическое отклонение (СКО) времени прохождения заявок сквозь систему по главному ходу, ч; $T_{обход}$ и $ST_{обход}$ — М и

СКО времени прохождения заявок сквозь систему по обходному пути, ч; $T_{блок}$ и $ST_{блок}$ — М и СКО суммарного времени блокировки одной заявки во всех узлах, т. е. суммарного времени ожидания отправления для отдельного поезда на всем участке, мин; T_{cp} и ST_{cp} — М и СКО времени блокировки узлов, которые описывают станции, мин; K_i — загрузка каналов в узле i ; R_i — среднее число заявок, поступивших в узел i за сутки; $T_{узел\ i}$ и $ST_{узел\ i}$ — М и СКО времени пребывания заявки в узле i , мин; $T_{уб\ i}$ — среднее время пребывания одной заявки в заблокированном канале в узле i (время ожидания отправления), мин.

Таблица 3.1

Результаты эксперимента 1. Общие показатели эффективности СеМО

Table 3.1

Experiment 1 results.
General performance indicators of the mass service network

Наименование характеристики, размерность	Условное обозначение	Значение
М времени блокировки узлов, мин	T_{cp}	5,01
СКО времени ожидания блокировки узлов, мин	ST_{cp}	22,23
Число заявок, поступивших в систему за 35 сут, ед.	V	1547,2
М времени прохождения заявок сквозь систему по главному ходу, ч	$T_{ход}$	8,12
СКО времени прохождения заявок сквозь систему по главному ходу, ч	$ST_{ход}$	0,51
М суммарного времени блокировки одной заявки во всех узлах, мин	$T_{блок}$	45,09
Вероятность отказа	P_{loss}	0
М времени прохождения заявок сквозь систему по обходному пути, ч	$T_{обход}$	8,93
СКО времени прохождения заявок сквозь систему по обходному пути, ч	$ST_{обход}$	0,58
СКО суммарного времени блокировки одной заявки во всех узлах, мин	$ST_{блок}$	13,89

Эксперимент 1. Целью является проверка адекватности построенной модели и оценка текущего состояния объекта исследования. В табл. 3.1 представлены результаты численного исследования полученной СеМО. Входящий поток заявок в нее задается матрицами (2) и соответствует текущему объему поездопотоков (44 поезда в сутки).

Статистических данных о движении поездов по данному участку в открытых источниках не было обнаружено, поэтому адекватность модели была оценена по двум показателям. Первый — число поездов в сутки, которые следуют через отдельную станцию по графику движения поездов на 2021–2022 гг. Это значение для каждой станции сравнивалось с количеством заявок, поступивших в соответствующие узлы (R) из табл. 3.2. В результате среднее относительное отклонение составило 0,27%, а максимальное — 1,26%. Второй показатель — среднее время хода поезда от станции Новый Уоян до Таксимо с учетом стоянки на всех

станциях, кроме самих станций Новый Уоян и Таксимо. Оно рассчитывалось на основе графика движения поездов и анализа технологий работы станций⁸. По главному ходу оно составляет 278 мин, через обходной путь — 326 мин. Время нахождения заявки в соответствующих узлах $T_{\text{ход}} \times 60 - T_{\text{узел 1}} - T_{\text{узел 26}} - T_{\text{узел 27}} = 286,6$; $T_{\text{обход}} \times 60 - T_{\text{узел 1}} - T_{\text{узел 26}} - T_{\text{узел 27}} = 337,3$, следовательно, относительное отклонение составит 3,1 и 3,5 % соответственно.

Выполним интерпретацию результатов расчетов (см. табл. 3.2) для объекта исследования. Можно видеть, что, во-первых, наибольшая загрузка каналов наблюдается в узлах 2, 3, 5 и 6, а наиболее продолжительное время блокировки — в узле 1, следовательно, перегон между станциями Новый Уоян и Кюхельбекерская имеет самую большую загрузку. Это связано с тем, что он протяженнее, чем все прочие перегоны на главном ходу. Во-вторых, для прохождения Северомуйского участка поезд тратит в среднем на $T_{\text{блок}} = 43$ мин, это больше, чем минимальное расчетное время хода (см. табл. 1). При текущем объеме поездопотоков такое значение допустимо. В-третьих, вероятность отказа равна нулю, т. е. поездопоток принимается на участок бесперебойно, что свидетельствует об имеющемся запасе пропускной способности.

Теперь оценим максимальную пропускную способность Северомуйского участка. Главным показателем того, что система справляется с нагрузкой, примем $P_{\text{loss}} < 0,005$. В данном исследовании вероятность отказа отображает число поездов, временно отставленных от движения (брошенные поезда). Ее значение принято на основе оценок специалистов по логистике на железнодорожном транспорте. Для БАМа такое значение P_{loss} означает минимальный риск отставления поезда от движения на станциях соседних участков из-за занятости рассматриваемого участка (нештатная ситуация).

Эксперимент 2. Максимальная теоретическая пропускная способность Северомуйского участка по Инструкции ОАО «РЖД»⁹ оценивается в 64 поезда/сут (32 пары). Это значение принято целевым, и постепенно до него увеличен объем входящего поездопотока. Соотношение пассажирских и грузовых поездов при росте поездопотоков не изменялось. В табл. 4 представлены результаты имитационного моделирования при увеличении значений элементов матриц (2) на 9, 18, 20, 30, 38 и 44 %, что соответствует проследованию по участку 48, 52, 54, 57, 60 и 63 поездов/сут (с учетом разворота).

На основе полученных результатов (табл. 4) можно сделать следующие выводы о рассматриваемом объекте. Максимальный поездопоток, при котором отсутствует риск нарушения расписания ($P_{\text{loss}} = 0$),

Таблица 3.2

Показатели эффективности отдельных узлов

Table 3.2

Performance of individual nodes

Номер узла	K_i	R_i	$T_{\text{узел } i}$	$ST_{\text{узел } i}$	$T_{\text{уб } i}$
Узел 1	0,07	45,07	22,53	49,37	16,34
Узел 2	0,61	24,01	36,66	0,48	0
Узел 3	0,54	21,07	36,64	0,47	0
Узел 4	0,03	45,07	3,28	2,68	1,05
Узел 5	0,53	21,09	36,23	0,48	0
Узел 6	0,60	24,00	36,23	0,48	0
Узел 7	0,08	45,07	10,74	11,85	3,97
Узел 8	0,54	23,97	32,63	0,48	0
Узел 9	0,48	21,10	32,64	0,50	0
Узел 10	0,07	45,05	10,41	15,61	3,57
Узел 11	0,42	18,58	32,63	0,48	0
Узел 12	0,49	21,42	32,64	0,48	0
Узел 13	0,06	39,98	8,93	8,58	2,13
Узел 14	0,11	39,98	4,12	0,74	0,12
Узел 15	0,20	21,59	13,21	0,83	0,21
Узел 16	0,22	23,91	13,09	0,36	0
Узел 17	0,07	45,05	8,44	8,44	1,67
Узел 18	0,45	23,89	27,23	0,44	0
Узел 19	0,40	21,17	27,23	0,44	0
Узел 20	0,02	45,04	2,38	2,15	0,17
Узел 21	0,38	21,18	25,80	0,36	0
Узел 22	0,43	23,87	25,82	0,37	0
Узел 23	0,03	45,04	3,31	3,18	1,08
Узел 24	0,51	23,85	30,82	0,38	0
Узел 25	0,46	21,19	30,82	0,37	0
Узел 26	0,10	6,97	62,55	8,72	3,19
Узел 27	0,27	36,98	115,58	22,87	7,79
Узел 28	0,07	2,53	38,83	0,31	0
Узел 29	0,07	2,54	38,81	0,36	0
Узел 30	0,00	5,06	6,66	7,12	0,09
Узел 31	0,09	2,54	48,71	0,41	0
Узел 32	0,09	2,53	50,50	3,78	1,76

Примечание. K_i — загрузка каналов в узле i ; R_i — среднее число заявок, поступивших в узел i за сутки; $T_{\text{узел } i}$ и $ST_{\text{узел } i}$ — М и СКО времени пребывания заявки в узле i , мин; $T_{\text{уб } i}$ — среднее время пребывания одной заявки в заблокированном канале в узле i (время ожидания отправления), мин.

Note. K_i — channel load in Node i ; R_i — average number of requests received by Node i per day; $T_{\text{узел } i}$ and $ST_{\text{узел } i}$ — a mathematical expectation and standard deviation of the request dwell time in Node i , min; $T_{\text{уб } i}$ — average dwell time of one request in a blocked channel in Node i (departure waiting time), min.

⁸ Там же. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

⁹ Там же. URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

составляет 52 поезда/сут (26 пар). При поездопотоке в 57 поездов/сут за 35 дней в среднем четыре поезда будут отставлены от расписания на станциях соседних участков. Это свидетельствует о периодичности появления нештатных ситуаций, в данном случае — чуть менее раза в неделю. При движении 63 и более поездов в сутки по Северомуйскому участку среднее число отставленных от расписания поездов превышает допустимое значение ($P_{loss} \geq 0,005$). Таким образом, максимальный объем поездопотоков должен составить 53–54 поезда/сут (27 пар). Тогда отсутствует периодичность появления нештатных ситуаций, а среднее время ожидания отправления T_{cp} отдельного поезда увеличится на 3–4 мин для каждой станции, что не является критическим для железнодорожного участка.

На Северомуйском участке возможно введение частично пакетного графика. Однако это требует существенного изменения расписания и модификации некоторых элементов железнодорожной сети, в частности увеличения количества путей на всех разъездах минимум до трех, что позволит пропустить по одному перегону большее число поездов. Целью следующего эксперимента является оценка эффективности введения частично пакетного графика.

Модификация математической модели Северомуйского участка для учета частично пакетного графика. Во-первых, примем, что четверть грузовых поездов прибывают пакетами (группами). Данное значение рекомендовано экспертами на основе анализа графика движения поездов за 2021–2022 гг. и является максимально возможным при малом числе

путей на разъездах (не больше трех), а также текущей энергоэффективности устройств электроснабжения участка. По этим же причинам максимальный размер пакета примем равным двум составам. Пассажирские поезда в пакеты не включаются. Тогда входящий поездопоток описывается следующими матрицами [13]:

$$\begin{aligned} D_{1,0} &= \begin{pmatrix} -0,83 & 0 \\ 0 & -0,95 \end{pmatrix}; D_{1,1} = \begin{pmatrix} 0,529 & 0,031 \\ 0,807 & 0,143 \end{pmatrix}; \\ D_{1,2} &= \begin{pmatrix} 0,176 & 0,031 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; D_{2,0} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1,14 \end{pmatrix}; \\ D_{2,1} &= \begin{pmatrix} 0,623 & 0,128 \\ 0,946 & 0,194 \end{pmatrix}; D_{2,2} = \begin{pmatrix} 0,208 & 0,043 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

Во-вторых, внесем следующие изменения в модели перегонов и разъездов. В узлы, которые описывают работу перегона с разъездом, введем групповое обслуживание заявок (узлы 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 28, 29, 31 и 32) —*/G^x/1/0. Разъезды Янчуй, Ульги и Блокпост (узлы 4, 20 и 23) будем описывать двухканальной СМО с групповым обслуживанием —*/M^x/2/0. Максимальный размер обслуживаемой группы X равен двум (размер пакета). Время обслуживания в этих узлах будет зависеть от размера обслуживаемой группы: одна заявка — параметры времени обслуживания для соответствующего узла задаются по данным в табл. 2; две заявки — к этому времени добавляется минимальное значение межпоездного интервала, которое для участков с автоблокировкой составляет

Таблица 4

Результаты эксперимента 2

Table 4

Experiment 2 results

Номер варианта	Число заявок, поступивших в систему V	Среднее число поступивших заявок в сутки D	Вероятность отказа P _{loss}	M времени прохождения заявок сквозь систему по главному ходу T _{ход} , ч	M времени прохождения заявок сквозь систему по обходному пути T _{обход} , ч	M суммарного времени блокировки одной заявки во всех узлах T _{блок} , мин	Максимальное время блокировки T _{уб max} , мин	M времени блокировки узлов T _{ср} , мин
1	1655,0	48,0	0	8,02	8,86	49,5	19,4 (узел1)	5,8
2	1795,4	52,2	0	8,17	9,02	58,8	25,6 (узел1)	6,9
3	1841,2	54,0	0,0007	8,35	9,17	69,8	27,2 (узел1)	8,2
4	1973,6	57,0	0,0019	8,52	9,34	80,4	35,2 (узел1)	9,7
5	2086,6	60,3	0,0023	8,73	9,56	92,4	40,6 (узел1)	11,2
6	2183,2	63,2	0,0053	9,08	9,90	112,8	52,4 (узел1)	13,9

Примечание. Здесь и далее D — среднее число поступивших заявок в сутки с учетом разворота, T_{уб max} — максимальное время блокировки среди всех узлов.

Note. Hereinafter, D — average number of incoming requests per day given the turnaround, T_{уб max} — maximum blocking time among all nodes.

Результаты эксперимента 3

Table 5

Experiment 3 results

Номер варианта	Среднее число поступивших групп заявок в сутки C , ед.	Число заявок, поступивших в систему V , ед.	Среднее число поступивших заявок в сутки D , ед.	Вероятность отказа, P_{loss}	М времени прохождения заявок сквозь систему по главному ходу $T_{ход}$, ч	М времени прохождения заявок сквозь систему по обходному пути $T_{обход}$, ч	М суммарного времени блокировки одной заявки во всех узлах $T_{блок}$, мин	Максимальное время блокировки $T_{уб\max}$, мин	М времени блокировки узлов $T_{ср}$, мин
1	44,3	1873,7	54,3	0,0017	8,40	9,23	64,89	13,28 (узел 27)	5,69
2	46,2	1954,4	57,1	0,0022	8,49	9,30	67,43	13,32 (узел 27)	6,10
3	48,7	2065,9	60,2	0,0035	8,57	9,38	72,77	14,14 (узел 27)	6,45
4	50,6	2145,7	62,3	0,0051	8,66	9,48	77,52	15,47 (узел 27)	6,94

8 мин¹⁰. Модели работы станций и маршрутные матрицы не изменились.

Эксперимент 3. В табл. 5 представлены результаты численного исследования модифицированной модели Северомуйского участка при разном объеме входящего потока заявок. В первом случае он задается матрицами (3) и равен поступлению 44 пакетов, или 54 поездов в сут. В остальных случаях значение элементов этих матриц увеличено на 5,6; 11 и 15 %, что соответствует прохождению по участку 57, 60 и 62 поездов/сут (с учетом разворота).

Сравним и проанализируем результаты экспериментов 2 и 3. Можно видеть, что введение частично пакетного графика движения позволяет уменьшить время блокировки. В частности, при $D \approx 54$ значения $T_{блок}$ и $T_{ср}$ в табл. 5 меньше на 7 и 31 %, чем в табл. 4, а при $D \approx 60$ уже на 21 и 42 % соответственно. Аналогичная ситуация происходит и со средним временем прохождения заявок сквозь систему ($T_{ход}$ и $T_{обход}$). Тем не менее вероятность отказа, наоборот, в эксперименте 3 растет быстрее при увеличении D . Это вызвано поступлением заявок группами и недостаточной вместимостью узлов 1, 26 и 27 (недостаточно путей в ПО на станциях Новый Уоян и Таксимо). В результате среднее число отставленных поездов от графика превышает допустимое значение ($P_{loss} \geq 0,005$) уже при 62 поездах/сут. Таким образом, при введении частично пакетного графика максимальный объем

поездотоков составит 53–54 поезда/сут. В этом случае периодичности в появлении нештатных ситуаций не наблюдается.

Общий вывод по результатам вычислительных экспериментов. Введение частично пакетного графика позволяет снизить среднюю задержку в отправлении поездов со станций, поэтому наблюдается уменьшение среднего времени хода по участку. Однако этот положительный эффект нивелируется тем, что, во-первых, средняя скорость движения пакета ниже по сравнению с движением отдельного поезда. Во-вторых, при поездотоке более 52 поездов/сут на станциях, в частности Кюхельбекерская, Окусикан и Северомуйск, может быть недостаточно свободных путей для принятия поступающего пакета. Тогда поезда останавливаются на соседних станциях и перегонах, в результате чего крупные станции Новый Уоян и Таксимо оказываются переполнены. Именно поэтому с ростом объемов поездотоков вероятность появления нештатных ситуаций возрастает быстрее при наличии пакетного движения, чем без него. Таким образом, пропускной способности Северомуйского участка достаточно для пропуска 52 поездов/сут в штатном режиме и до 54 поездов/сут при минимальном допустимом риске появления нештатных ситуаций. Применение на нем частично пакетного графика видится нам нерациональным, что согласуется с Инструкцией по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД»¹¹.

¹⁰ Паспорт инвестиционного проекта «Модернизация железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей (второй этап)». URL: <http://government.ru/docs/all/134155/> (дата обращения: 16.09.2023).

¹¹ Инструкция по расчету пропускной и провозной способностей железных дорог ОАО «РЖД». URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&demo=2&base=EXP&n=798693&dst=100001%2C-1> (дата обращения: 17.09.2023).

Обсуждение и заключение. В настоящее время нагрузка Восточного полигона приблизилась к критической величине. С целью увеличения его пропускной способности Правительством РФ запланирована модернизация инфраструктуры полигона, для осуществления которой необходима комплексная оценка текущего состояния дорог и их участков, а также эффективности возможных мер по их реконструкции. Данное исследование посвящено поиску возможного решения одной из составляющих этой задачи: разработке модельно-алгоритмического инструментария для анализа работы участков БАМа.

Конкретной целью работы явилась оценка пропускной способности Северомуйского участка БАМа и определение эффективности введения частично пакетного графика движения поездов на нем. В качестве инструмента применялись методы математического и компьютерного моделирования. Для построения модели использован аппарат теории массового обслуживания, благодаря чему были учтены инфраструктура выбранного объекта и влияние случайных факторов на движение и обслуживание поездов на станциях.

На основе результатов моделирования установлено, что участок способен пропустить в штатном режиме до 27 пар поездов в сутки. Введение частично пакетного графика позволяет снизить задержки на станциях, но не дает возможности увеличить пропускную способность выше обозначенного уровня. При этом для эффективного использования частично пакетного графика может потребоваться реконструкция некоторых отдельных пунктов, так как количества приемо-отправочных путей в них недостаточно. В первую очередь на разъездах Янчуй, Чуро, Аркум и Ульги необходимо увеличить число путей до 4, на станциях Кюхельбекерская, Окусикан, Северомуйск и Ангаракан до 6 приемо-отправочных путей. Таким образом, применение частично пакетного графика на Северомуйском участке представляется нерациональным.

Согласно паспорту инвестиционного проекта по развитию Восточного полигона, в 2022 г. число поездов, которые проходят по Северомуйскому участку, должно было составить 27 пар, в конце 2023 г. — 33 пары, а к 2025 г. — 43 пары поездов в сутки. График движения поездов на 2021–2022 гг. включал 23 пары поездов в сутки, а максимальный допустимый, как было определено, 27 пар. Таким образом, при текущей инфраструктуре пропускную способность участка можно увеличить примерно на 15–18%, что недостаточно для выполнения целевых показателей даже на 2023 г., не говоря уже про 2025 г. Из-за большой протяженности БАМа нельзя утверждать, что этот участок является лимитирующим, однако однопутное движение на нем не позволяеткратно увеличить пропускную способность магистрали. Это подтверждает

необходимость создания двухпутного сообщения, по крайней мере, на Северомуйском участке.

Предложенный инструментарий имеет ограничения, которые характерны для аппарата теории массового обслуживания. Так, получаемые модели имеют высокий уровень обобщения и не могут заменить подробного описания железнодорожных участков. В частности, в них не учитывается диспетчерское регулирование движения поездов. Тем не менее модели достаточно универсальны и позволяют провести первичный анализ работы железнодорожного участка произвольной структуры (в частности, как однопутного, так и многопутного). Это актуально при проектировании железнодорожной сети, когда влияние диспетчерского управления невозможно спрогнозировать, так как информация о реальных объемах поездопотоков отсутствует. При этом предлагаемые модели не нуждаются в больших объемах статистической информации для параметрической идентификации. Таким образом, они имеют преимущество перед имитационными моделями агентного типа или системной динамикой, которое заключается в меньших трудозатратах при разработке.

Предложенная математическая модель в перспективе может быть использована для исследования других участков БАМа. Здесь интересными являются два направления: первое — моделирование участков, которые стыкуются с морскими портами Дальнего Востока, второе — исследование взаимодействия однопутной дороги и двухпутной, в частности БАМа и Транссиба в местах стыковки. Интересным видится и моделирование всего БАМа для поиска на нем ограничивающих движение участков. Также данный инструментарий может быть применен и для оценки планируемой инфраструктуры Северо-Сибирской железнодорожной магистрали, которая должна соединить железнодорожную сеть Ханты-Мансийского автономного округа — Югры с БАМом.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 121041300065-9.

Funding: the research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of project No 121041300065-9.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бардаль А. Б. Транспортная система Дальневосточного федерального округа: современное состояние и перспективы Восточного полигона железных дорог // Регионалистика. 2021. Т. 8, № 3. С. 21–31

- [Bardal A. B. The Transport System of the Far Eastern Federal District: Current State and Prospects of the Eastern Range of Railways. *Regionalistica*. 2021;8(3):21–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.14530/reg.2021.3.21>.
2. Тураева М. О. Грузовой транспорт России: некоторые итоги 2022 года // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 3. С. 45–63 [Turaeva M. O. Performance of Russian freight transport in 2022: some outcomes. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2023;(3):45–63. (In Russ.). https://doi.org/10.52180/2073-6487_2023_3_45_63.
3. Pyrgidis C. N. *Railway Transportation Systems. Design, Construction and Operation*. Boca Raton: CRC Press; 2016. 511 p. <https://doi.org/10.1201/b19472>.
4. Брусянин Д. А., Казаков А. Л., Маслов А. М. Оптимизация региональной маршрутной сети междугородных и пригородных пассажирских перевозок с использованием логистических принципов // Транспорт Урала. 2012. № 1 (32). С. 106–109 [Brusyanin D. A., Kazakov A. L., Maslov A. M. Optimization of regional route network of intercity and commuter traffic with the use of logistic principles. *Transport of the Ural*. 2012;(1):106–109 (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/owwuab>.
5. Оптимизация условий организации движения соединенных поездов на постоянной основе на Транссибирской магистрали Восточного полигона сети железных дорог / М. И. Мехедов [и др.] // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80, № 1. С. 4–12 [Mekhedov M. I., Sotnikov E. A., Kholodnyak P. S., Kursin D. A., Kornienko N. B. Condition optimization for organizing the operation of connected trains on an ongoing basis on the Trans-Siberian Railway of the Eastern operational range of the railway network. *Russian Railway Science Journal*. 2021;80(1):4–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-4-12>.
6. Milenkovic M., Bojovic N. *Optimization Models for Rail Car Fleet Management*. Elsevier Publ.; 2020. 282 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03011-2>.
7. Kerner B. S. *Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control*. Berlin: Springer Publ.; 2009. 265 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02605-8>.
8. Kozlov P., Osokin O., Timukhina E., Tushin N. Optimization of Fleet Size and Structure While Serving Given Freight Flows. In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds.) *VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Vol. 2*. Cham: Springer Publ.; 2020. p. 1064–1075. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37919-3_104.
9. Об использовании моделей оптимального управления транспортными потоками / П. А. Козлов [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (41). С. 60–69 [Kozlov P. A., Kolokol'nikov V. S., Tushin N. A., Osokin O. V. On using effective management models for transport flows. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2019;(1):60–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2019-1-60-69>.
10. Козлов П. А., Вакуленко С. П., Евреенова Н. Ю. Методы исследования проектов развития объектов транспортной инфраструктуры // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды междунар. науч.-практ. конф., посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 г. М.: РУТ, 2021. С. 174–181 [Kozlov P. A., Vakulenko S. P., Evreenova N. Yu. Methods for researching projects for the development of transport infrastructure facilities. In: *Academician Vladimir Nikolayevich Obratsov, the founder of transport science: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 125th Anniversary of the University, 22 October 2021, Moscow*. Moscow: RUT; 2021. p. 174–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.47581/2022/Obratsov.25>.
11. Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. Имитационная модель обоснования приоритетов развития железнодорожных связей между Уралом и Западной Сибирью // Вестник УрГУПС. 2021. № 4 (52). С. 50–58 [Petrov M. B., Serkov L. A., Kozhov K. B. Simulation model of substantiation of priorities for the development of railway links between the Urals and Western Siberia. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2021;(4):50–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2021-4-50-58>.
12. Назаров А. А., Терпугов А. Ф. Теория массового обслуживания. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. 228 с. [Nazarov A. A., Terpugov A. F. *Queueing Theory*. Tomsk: Publishing House NTL; 2010. 228 p. (In Russ.).
13. Dudin A., Klimenok V., Vishnevsky V. *The Theory of Queueing Systems with Correlated Flows*. Cham: Springer Publ.; 2019. 431 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32072-0>.
14. Marinov M., Viegas J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2009;17(6):1106–1129. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.04.001>.
15. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013;2013:307652. <https://doi.org/10.1155/2013/307652>.
16. Карасев С. В., Калидова А. Д. Моделирование пропуска поездов через однопутный лимитирующий элемент трассы при организации скоростного движения с использованием существующей инфраструктуры // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77, № 1. С. 34–43 [Karasev S. V., Kalidova A. D. Modeling of train flow handling through a limiting single-track section of the route at the organization of high-speed operation using the existing infrastructure. *Russian Railway Science Journal*. 2018;77(1):34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-1-34-43>.
17. Weik N., Nießen N. Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020;15:100203. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100203>.
18. Wilson N., Fourie C. J., Delmistro R. Mathematical and simulation techniques for modelling urban train networks. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2016;27(2):109–119. <http://dx.doi.org/10.7166/xx-x-1364>.
19. Huisman T., Boucherie R. J., Van Dijk N. M. A solvable queueing network model for railway networks and its validation and applications for the Netherlands. *European Journal of Operational Research*. 2002;142(1):30–51. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00269-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00269-7).
20. Бычков И. В., Казаков А. Л., Жарков М. Л. Интеллектуальная технология моделирования железнодорожных станций на основе теории массового обслуживания // Управление товарными потоками и перевозочным процессом на железнодорожном транспорте на основе клиентоориентированности и логистических принципов: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / под ред. Б. М. Лapidуса, А. Т. Осминина. СПб.: ЛЕМА, 2019. С. 185–193 [Bychkov I. V., Kazakov A. L., Zharkov M. L. Smart technology of railway station modelling based on the mass service theory. In: Lapidus B. M., Osminin A. T. *Management of railway commodity flows and carriage processes based on customer orientation and logistic principles: collective monograph of members and research partners of the Joint Scientific Council of the Russian Railways*. St. Petersburg: LEMA Publ.; 2019. p. 185–193 (In Russ.).
21. Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of Railway Stations Based on Queueing Networks. *Applied Sciences*. 2021;11(5):2425. <https://doi.org/10.3390/app11052425>.
22. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. An approach to railway network sections modeling based on queueing networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2023;27:100404. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100404>.
23. Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling a Section of a Single-Track Railway Network Based on Queueing Networks. In: Dudin A., Nazarov A., Moiseev A. (eds.) *Information Technologies and Mathematical Modelling. Queueing Theory and Applications: Proceedings of the 21st International Conference, ITMM 2022, 25–29 October 2022, Karshi, Uzbekistan*. Cham: Springer Publ.; 2023. p. 40–54. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32990-6_4.

24. Федоров Ю. Н. Роль БАМа в современной транспортной сети России // Железнодорожный транспорт. 2019. № 7. С. 5–10 [Fedorov Yu. N. The Role of Baikal-Amur Mainline in Russia's modern transport network. *Zheleznodorozhnyy transport*. 2019;(7):5-10. (In Russ.)]. EDN: <https://elibrary.ru/ejrhre>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Леонидович ЖАРКОВ,

канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134), Author ID: 978394, <https://orcid.org/0000-0003-4981-338X>

Александр Леонидович КАЗАКОВ,

д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134); профессор, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), Author ID: 14911, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ,

старший преподаватель, кафедра управления эксплуатационной работой, Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), Author ID: 852076, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim L. ZHARKOV,

Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (664033, Irkutsk, 134, Lermontova St.), Author ID: 978394, <https://orcid.org/0000-0003-4981-338X>

Alexander L. KAZAKOV,

Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (664033, Irkutsk, 134, Lermontova St.); Professor, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskiy St.), AuthorID: 14911, <https://orcid.org/0000-0002-3047-1650>

Anton V. SUPRUNOVSKY,

Senior Lecturer, Department of Operational Management, Irkutsk State Transport University (664074, Irkutsk, 15, Chernyshevskiy St.), Author ID: 852076, <https://orcid.org/0000-0001-8356-4271>

ВКЛАД АВТОРОВ

Максим Леонидович ЖАРКОВ. Составление алгоритма исследования, построение математической модели, проведение вычислительных экспериментов и формирование выводов по ним, написание текста статьи (40%).

Александр Леонидович КАЗАКОВ. Определение и формирование направления исследования, формулировка цели и постановка задачи, формирование выводов по результатам исследования и рекомендаций по их использованию, редактирование текста статьи (40%).

Антон Викторович СУПРУНОВСКИЙ. Описание объекта, сбор и подготовка данных его работы для вычислительных экспериментов, интерпретация результатов экспериментов для объекта исследования (20%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Maxim L. ZHARKOV. Drawing up a research algorithm, building the mathematical model, implementing computational experiments, drawing conclusions, article writing (40%).

Alexander L. KAZAKOV. Definition and formation of the direction of the research, formulation of the goal and statement of the task, and drawing the conclusions based on the results of the study, article editing (40%).

Anton V. SUPRUNOVSKY. Description of the object, collection and preparation of its operation data for computational experiments, and interpretation of experimental results for the object of study (20%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.09.2023, рецензия от первого рецензента получена 06.10.2023, рецензия от второго рецензента получена 11.10.2023, рецензия от третьего рецензента получена 16.10.2023, принята к публикации 13.11.2023.

The article was submitted 21.09.2023, first review received 06.10.2023, second review received 11.10.2023, third review received 16.10.2023, accepted for publication 13.11.2023.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ СТАТЕЙ ЖУРНАЛА В ОТКРЫТОМ ДОСТУПЕ

На сайте www.elibrary.ru открыт доступ к электронным версиям статей, опубликованных в научно-техническом журнале «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта».

Для работы с фондами библиотеки пользователю необходимо самостоятельно зарегистрироваться, заполнив регистрационную форму на главной странице eLibrary.ru. Доступ возможен по Вашему логину и паролю с любого компьютера, имеющего выход в интернет.

Материалы журнала, размещенные на сайте Научной электронной библиотеки для свободного использования, допускается использовать, копировать, цитировать исключительно в некоммерческих целях с соблюдением соответствующих положений действующего авторского законодательства (Гражданский кодекс РФ от 18.12.2006 № 230-ФЗ, Часть IV; Глава 70 «Авторское право») с обязательным указанием имени автора/ов произведения и источника заимствования.

На сайте журнала www.journal-vniizht.ru контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.