

УДК 519.872.4, 519.872.6, 656.025.2, 656.025.4

## О СПОСОБАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ МИКРОЛОГИСТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ



**М.Л. Жарков**

*Сибирское отделение Российской академии наук*  
г. Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: zharkm@mail.ru

**M.L. Zharkov**

*Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*  
Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: zharkm@mail.ru



**А.Л. Казаков**

*Иркутский национальный  
исследовательский технический университет*  
г. Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: kazakov@icc.ru

**A.L. Kazakov**

*Irkutsk National Research Technical University*  
Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: kazakov@icc.ru



**А.А. Лемперт**

*Иркутский национальный  
исследовательский технический университет*  
г. Иркутск, Российская Федерация  
E-mail: lempert@icc.ru

**A.A. Lempert**

*Irkutsk National Research Technical University*  
Irkutsk, Russian Federation  
E-mail: lempert@icc.ru

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу выбора математического аппарата для моделирования работы микрологистических транспортных систем. В работе проведено изучение базовой структуры таких систем и особенностей производимых ими операций. Приведен аналитический обзор научных исследований по построению и изучению математических моделей транспортных систем. В ходе анализа показано, что, во-первых, микрологистические транспортные системы испытывают существенное влияние случайных факторов, во-вторых, входящие материальные (грузовые, пассажирские) потоки обладают сложной структурой, в частности, поступившую транспортную единицу необходимо рассматривать как группу заявок (пассажиров, товаров и др.), которые обслуживаются отдельно друг от друга. В этом случае наиболее адекватными оказываются вероятностные (стохастические) модели, в частности, на основе многофазных систем массового обслуживания с групповыми потоками.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, теория массового обслуживания, многофазные системы массового обслуживания, микрологистическая транспортная система.

**Информация о статье.** Дата поступления: 8 августа 2019 г.

## ABOUT METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF WORK OF MICROLOGISTIC TRANSPORT SYSTEMS

**Abstract.** The article studies the mathematical apparatus for modeling the operation of micrologistic transport systems. In the study, we analyzed the basic structure of such systems and the features of their operations. An analytical review of scientific research on the construction and study of mathematical models of transport systems is given. The analysis showed that, firstly, micro-logistics transport systems are significantly affected by random factors, and secondly, incoming material (freight, passenger) flows have a complex structure, in particular, the incoming transport unit must be considered as a group of applications (passengers, goods, etc.), which are served separately from each other. In this case, the most adequate are probabilistic (stochastic) models, in particular, based on multiphase queuing systems with group flows.

**Keywords:** mathematical modeling, queuing theory, multiphase queuing systems, micrologistic transport system

**Article info.** Received 8 August, 2019.

---

### 1. Введение

Под микрологистическими транспортными системами (микро-ЛТС) понимаются подсистемы, структурные составляющие логистических систем, охватывающие работу отдельного предприятия. В сферу деятельности таких систем входит внутрипроизводственная логистика какого-либо объекта, т.е. подготовка и планирование производства, сбыта, снабжения, транспортно-складские и погрузочно-разгрузочные работы [1; 2].

К микро-ЛТС относят порты, где осуществляется перегрузка товаров с морского транспорта на сухопутный и обратно, аэропорты, железнодорожные терминалы (вокзал, сортировочная станция) и т.д. Примером грузовой микро-ЛТС является итальянский морской порт Джоя Тауро (итал. Gioia Tauro), расположенный на юге Италии. Данный терминал занимает первое место в Италии по грузообороту [3]. Примером пассажирской микро-ЛТС является транспортно-пересадочный узел «Шинагава» (Shinagawa), расположенный в одном из центральных районов Токио — Тиёда (Chiyoda). Данный ТПУ является одним из крупнейших в мире [4].

Таким образом, микро-ЛТС являются важными элементами транспортно-логистических систем мезо- и макроуровней.

Поэтому исследование процессов работы и совершенствование их структуры является актуальными задачами в сфере транспорта и экономики.

## 2. Постановка задачи

Особенности функционирования микро-ЛТС напрямую зависят от двух составляющих: входящего и внутренних материальных (транспортных, пассажирских) потоков и структурной схемы работы самой системы.

Рассмотрим входящий транспортный поток. На движение транспортных единиц влияют различные непредвиденные факторы, в частности, дорожная обстановка, погодные условия, поломки и т.п., поэтому моменты времени поступления транспорта в систему в большинстве случаев являются случайными величинами. При этом обычно транспорт перевозит товары партиями (пассажиров группами) размер которых заранее предугадать не всегда возможно. Следовательно, при изучении входящего транспортного (материального, пассажирского) потока в микро-ЛТС необходимо учитывать их случайную природу. Отметим, что в систему могут поступать несколько независимых транспортных потоков, различных видов [5].

Внутренние и исходящие потоки наследуют случайный характер входящего транспортного потока и, кроме того, напрямую зависят от структуры микро-ЛТС.

Микро-ЛТС сочетают в себе различные виды оборудования, сооружений, транспорта и схем коммуникаций, т.е. их можно считать сложными системами. Так, в микро-ЛТС можно выделить самостоятельные подсистемы, в которых производятся различные технические операции (сортировка, обслуживание и отправка) над поступающим материальным потоком [6; 7]. Подсистемы расположены последовательно и связаны между собой линиями, по которым передаются материальные потоки. Также в структуре имеются обратными связями, которые определяют выбор поведения системы при перегрузках и сбоях. Обратная связь является основой развития и саморегулирования систем, приспособления их к изменяющимся условиям внешней среды, т.е. адаптивность [8].

Отметим, что максимальное число заявок в микро-ЛТС конечно (площади ограничены) и принимает только целые положительные значения.

В микро-ЛТС регулярно повторяются однотипные действия: принятие транспортной единицы, ожидание перед отправкой и т.д. Они, как правило, определяются плановыми показателями, в частности, обслуживанием определенного числа транспортных единиц за смену. Однако помимо случайной природы поступающих транспортных потоков на работу

микро-ЛТС оказывает воздействие большое число второстепенных факторов, в частности, техногенные: сбой в работе техники, человеческий фактор и др. [6; 7]. Все это приводит к появлению неопределенности поведения системы в целом, т.е. процесс функционирования микро-ЛТС является случайным процессом.

Далее рассмотрим методы, применяемые при моделировании различных транспортных систем. Отметим, что функционирование микро-ЛТС, обладающих указанными выше свойствами, можно представить в виде случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем, т.е. для построения моделей их работы возможно использование аппарата теории массового обслуживания.

### **3. Выбор математического аппарата для моделирования работы микрологистических транспортных систем**

При исследовании любых объектов и систем методами моделирования ключевым вопросом является выбор математического аппарата. Не являются исключением и различные транспортно-логистические системы. В настоящее время можно выделить три основных подхода к построению математических моделей, применяемых для изучения микро-ЛТС.

1) Аналитический детерминированный — использование детерминированных оптимизационных моделей, что для инженера-практика обычно предполагает вычисление потребных характеристик системы, например, числа путей на станциях, пропускной способности устройств и т.п., по аналитическим формулам [2]. Данный подход является наиболее простым, однако ошибки при вычислении могут быть значительными.

Основным недостатком детерминированного метода является сложность учета возмущений и искажений, связанных с наличием случайных второстепенных факторов. Например, определение необходимого числа обслуживающих устройств исходит из их загрузки технологическими операциями, т.е. полезного использования. Однако оно может существенно варьироваться, в частности, под воздействием суточного цикла. Подобные неравномерности обычно учитывают в модели при помощи соответствующих коэффициентов, однако такой подход является очень грубым и часто порождает ошибки.

2) Аналитический вероятностный — построение моделей с использованием аппарата теории вероятностей, теории случайных процессов, теории массового обслуживания [4; 9]. Этот подход позволяет получить характеристики изучаемой системы в явной аналитической форме с детальным анализом протекающих в системе процессов. При этом точное поведение последних неизвестно и зачастую имеет широкий диапазон вариаций.

Использование такого подхода, как правило, не требует больших затрат времени для получения точных результатов, позволяет учитывать наличие случайных факторов, а в некоторых моделях можно отразить структуру выбранной системы, что дает возможность определения «узких мест» в планировке микро-ЛТС. Однако построенная математическая модель может оказаться слишком сложной для изучения аналитическими методами.

3)Графический — построение суточного плана-графика работы системы, описание структуры системы с помощью теории графов [2; 10]. Основными достоинствами является возможность детального отображения внутренней структуры и высокая точность определения «узких мест» изучаемой системы. Недостатками данного метода является сложность учета случайных возмущений, плохое отображение управления и невозможность проведения эксперимента.

Сравнительная характеристика представленных подходов изучения сложных систем показала, что аналитический вероятностный подход является наиболее подходящим инструментом для моделирования микро-ЛТС, в которых, как отмечено в п. 2, процесс функционирования является случайным.

Однако из-за сложности структуры микро-ЛТС необходимо использовать особые типы моделей и математические методы, способные учитывать наиболее важные характеристики протекающих в системе процессов, многие из которых имеют случайный характер.

#### **4. Построение модели для описания движения материальных потоков внутри микрологистических транспортных систем**

В настоящее время известно несколько типов моделей, которые могут быть применены для описания процессов движения заявок (грузов, пассажиров) внутри микро-ЛТС. Рассмотрим наиболее часто используемые.

1)Модели на основе физических сил. Здесь заявки представлены в виде простых частиц, которые подчиняются основным физическим законам. Например, газо-кинетическая модель, в ней заявки представлены в виде молекул газа, скорость и положение которых заменяются статическим распределением частиц по уравнению Больцмана. Преимущества этих моделей заключаются в простоте среды перемещения и быстрой скорости расчетов. С другой стороны, отсутствуют возможности для выбора маршрута и определения параметров заявки как обособленной единицы [11].

2)Модели на основе теории клеточных автоматов. Система представляется в виде сетки, ячейки которой вмещают

не более одной заявки. Перемещение между ячейками строго подчиняется определенному алгоритму, т.е. варианты движения заявки в составе потока ограничены и исключают реакцию на резкое изменение параметров среды передвижения [12]. Также недостатком данных моделей является зависимость от структуры изучаемой системы, т.е. для каждой системы требуется «своя сетка».

3) Модели на основе ньютоновской механики, известны как «модели социальных сил» Д. Хелбинга. В данном случае на поведение заявок в системе оказывают воздействие физические силы, описываемые системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Учитываются особенности индивидуального поведения: выбор кратчайшего пути следования, скорости передвижения, дистанции в зависимости от плотности потока. Таким образом, данный тип моделей позволяет получить необходимые сведения как об отдельной заявке в потоке, так и для всей системы [13]. Однако, как и в предыдущем случае, для каждой изучаемой системы приходится создавать свою особую модель. При этом каждая новая модель создается с «нуля» по причине уникальности структуры объектов исследования и поведения заявок в них.

4) Модели на основе СМО. Функционирование изучаемой системы представляется в виде случайного процесса, который принимает положительные целочисленные значения (состояния). Состояние этого процесса показывает число заявок, которые находятся в системе. В зависимости от номера состояния заявки могут отсутствовать в системе, обслуживаться в канале или находиться в очереди (при наличии). Для такого случайного процесса вероятности пребывания в каждом состоянии описываются с помощью систем обыкновенных дифференциальных или линейных алгебраических уравнений. Наглядным способом описания этого случайного процесса является граф состояний (переходов), где вершины графа обозначают состояния, ребра же отображают возможные переходы между ними [14–16]. В подобных моделях поток заявок представляется совокупностью элементов с общим направлением движения. Однако возможен учет индивидуального поведения заявок.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что для построения модели функционирования микро-ЛТС подходит аналитический вероятностный подход, а для ее реализации — модели на основе СМО.

## 5. Применение СМО для моделирования микро-ЛТС

Как уже отмечалось в п. 2, характерной особенностью функционирования микро-ЛТС является циклический характер их работы. В большинстве случаев в микро-ЛТС выполняются



однотипные действия: принятие груженого транспортного средства, разгрузка, распределение товара по партиям, отправка и так далее. Поведение микро-ЛТС представляет собой случайный процесс, потому как число заявок (грузовых единиц, пассажиров) в системе в фиксированный момент времени зависит от множества различных, в том числе стохастических, факторов, т.е. является случайной величиной. При этом максимальное число заявок в системе конечно и принимает только целые положительные значения. Тогда процесс функционирования микро-ЛТС представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. Подобные процессы изучаются в рамках специального раздела теории вероятностей, который называется «теории массового обслуживания» (ТМО), в англоязычной литературе «queueing theory» — т.е. «теория очередей» [16].

Под системой массового обслуживания (СМО) понимают систему, которая предназначена для обслуживания каких-либо заявок одного или нескольких типов, поступающих в нее в случайный момент времени [15].

Опишем функционирование микро-ЛТС с помощью аппарата теории массового обслуживания.

Формальное описание. Одним из важных этапов использования теории массового обслуживания является формальное описание функционирования изучаемого объекта. Для каждой СМО описываются следующие компоненты: входящий поток заявок (событий, требований); количество и типы обслуживающих каналов; времена обслуживания заявок в канале; длина очереди, в которой заявки пребывают перед обслуживанием; дисциплина обслуживания очереди (определяет порядок обработки заявок из очереди).

На данный момент существует множество классификаций СМО, но только классификация Д. Кендалла, предложенная в 1953 г., является общепринятой. Согласно данной классификации описание системы состоит из четырех символов, разделенных вертикальной либо косой чертой [14; 15].

$$A / B / m / n . \quad (1)$$

Первые две позиции состоят из букв или буквенных комбинаций. Первая отвечает за входящий поток заявок, вторая — за закон распределения времени обслуживания. Приняты следующие обозначения: М — стационарный пуассоновский поток заявок; Е — эрланговский поток (время между поступлениями двух последовательных заявок распределено по закону Эрланга); D — детерминированный поток; G — произвольный стационарный поток, т.е. закон распределения

промежутков времени между поступлением двух последовательных заявок неизвестен; Н — гиперэкспоненциальное распределение промежутков времени между поступлением двух последовательных заявок; HE — гиперэрланговский поток; \* — произвольный нестационарный поток.

В литературе, например, в [17], также встречаются дополнительные обозначения:  $M^X$  — пуассоновский неординарный поток, где X означает групповое поступление заявок; PH — распределение фазового типа; SM — полумарковский поток; ВМАР — групповой марковский входящий поток.

Последние две позиции в (1) — целые числа,  $m$  ( $m \geq 1$ ) означает количество параллельно работающих каналов,  $n$  ( $n \geq 0$ ) — максимальную длину очереди. Каждый канал, в зависимости от модели, может обслуживать одну или несколько заявок одновременно. Они могут быть специализированы на определенные типы заявок, в таком случае канал обрабатывает только заявки «своего» типа, остальные игнорируются. В случае, когда  $n = \infty$ , четвертая позиция при описании СМО может быть опущена.

Если в описании системы первые две позиции занимают символы М, Е, Н, HE, то такие системы называются марковскими СМО. Главная особенность таких систем заключается в том, что они могут быть представлены дискретными марковскими процессами с непрерывным временем. Зачастую для их описания применим процесс гибели и размножения [14; 15]. Подобные системы хорошо исследованы еще в первой половине XX века, когда было решено большинство основных задач ТМО и разработаны математические методы, которые себя хорошо зарекомендовали [14; 15]. В случае, когда в описании первые две позиции занимают другие символы (G, PH, SM, ВМАР и др.), эти СМО называют немарковскими. Для таких систем достаточно сложно или невозможно составить систему уравнений равновесия, которая описывает стационарное распределение вероятностей В реальных системах процесс обслуживания может предполагать обработку одной заявки на нескольких последовательно расположенных обслуживающих устройствах. СМО такого типа получили название многофазные СМО. Эти системы подходят для описания многоуровневых систем, хорошим примером служат транспортно-пересадочные узлы и грузовые железнодорожные станции [6; 7; 18].

В случае, если очередь на какой-либо фазе конечна  $n_k < \infty$ , возникает вопрос о поведении многофазной системы в ситуации, когда данная очередь заполняется, а на вход продолжают поступать заявки. Обычно рассматривают следующие



варианты поведения системы: 1) поступающая заявка теряется; 2) остается в канале, ожидая освобождения места в очереди следующей фазы и временно блокируя работу данного канала (система с блокировками).

Микрологистические транспортные системы, как было показано в п. 2, в своей структуре имеют самостоятельные подсистемы, через которые последовательно проходит материальный поток. Они имеют между собой как прямые, так и обратные связи. Также следует отметить, что из-за специфики входящих потоков в микро-ЛТС поступившую транспортную единицу следует рассматривать как группу заявок (пассажиров, товаров и др.), которые обслуживаются отдельно друг от друга. Таким образом, для математического описания работы микрологистических транспортных систем целесообразно использовать многофазные системы массового обслуживания с блокировками и групповым поступлением заявок.

Представление микро-ЛТС как СМО является эффективным и удобным способом их изучения. Применение такого подхода при достаточно общих предположениях о характеристиках рассматриваемой системы позволяет получить уравнения протекающих в ней процессов и провести весьма общие исследования. На этом пути появляется возможность для развития аналитического аппарата, позволяющего в приемлемом для специалистов-практиков виде проводить технический расчет эффективности сложных систем.

## **6. Выводы**

Микрологистические транспортные системы являются сложными многоуровневыми объектами, подверженными влиянию различных, как внешних, так и внутренних факторов. Автором проведен краткий анализ структуры микро-ЛТС и математических моделей, применяемых для их описания, а также виды и формальное описание систем массового обслуживания. В результате сделаны следующие выводы.

Во-первых, в микро-ЛТС, как правило, выполняются однотипные действия: принятие транспортного средства, его разгрузка, складирование товара, погрузка для дальнейшей отправки и так далее, поэтому для описания поведения таких систем хорошо подходят модели ТМО (СМО).

Во-вторых, из-за сложной структуры микро-ЛТС заявка проходит через несколько подсистем обслуживания, поэтому использование однофазных СМО приведет к сильному обобщению модели объекта, потере точности и адекватности описания внутренних процессов. В этой связи, необходимо использовать многофазные СМО с обратными связями между фазами (блокировками). Применение таких моделей позволит

отразить базовую структуру, определить в ней «узкие места» и описать особенности функционирования изучаемой системы.

В-третьих, поступающую транспортную единицу необходимо рассматривать как группу товаров (пассажиров), которые обслуживаются отдельно друг от друга, поэтому для их описания целесообразно применять неординарные потоки заявок.

Таким образом, авторами обоснована целесообразность использования многофазные системы массового обслуживания с обратными связями и групповым поступлением заявок для моделирования работы различных микрологистических транспортных систем.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канке А.А. Основы логистики: учеб. пособие / А.А. Канке, И.П. Кошевая. — Москва: Кнорус, 2010. — 576 с.
2. Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах / под ред. Л.Б. Миротина. — Москва: Горячая линия-Телеком, 2010. — 704 с.
3. Титов А.В. Особенности построения транспортно-логистических кластеров в Европе / А.В. Титов, И.А. Волынский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технологии. — 2015. — № 4. — С. 103–108.
4. Власов Д.Н. Транспортно-пересадочные узлы крупнейшего города (на примере Москвы) / Д.Н. Власов. — Москва: АСВ, 2009. — 96 с.
5. Lempert A.A. A Stochastic Model of a Transport Hub and Multi-phase Queueing Systems / A.A. Lempert, A.L. Kazakov, M.L. Zharkov // Advances in Intelligent Systems Research. — 2018. — Vol. 158. — P. 117–123.
6. Павидис М.М. Моделирование работы сортировочной станции на основе применения многофазных систем массового обслуживания / М.М. Павидис, М.Л. Жарков // Транспортная инфраструктура сибирского региона. — 2018. — Т. 1. — С. 112–117.
7. Жарков М.Л. Определение критических показателей работы транспортно-пересадочного узла на основе многофазной системы массового обслуживания / М.Л. Жарков, А.Л. Казаков, А.А. Лемперт // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 3 (35). — С. 40–52.
8. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. — Москва: Наука, 1968. — 356 с.
9. Graham C. Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation / C. Graham, D. Talay. — New York: Springer, 2013. — 264 p.
10. Поттгофф Г. Учение о транспортных потоках / Г. Поттгофф; пер. с нем. В.И. Шейко, В.Н. Воскресенского. — Москва: Транспорт, 1975. — 344 с.
11. Якимов М.Р. Основные подходы к моделированию движения транспортных потоков / М.Р. Якимов // Мир транспорта. — 2015. — Т. 13, № 4. — С. 166–173.
12. Якушкин И.М. Пассажирские перевозки на метрополитенах / И.М. Якушкин. — Москва: Транспорт, 1982. — 175 с.
13. Fruin J.J. Pedestrian planning and design / J.J. Fruin. — New York: Metropolitan Association of Urban designers and Environmental Planners, 1971. — 206 p.

14. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В.М. Вишневский. — Москва: Техносфера, 2003. — 512 с.
15. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. — Москва: URSS, 2007. — 400 с.
16. Medhi J. Stochastic Models in Queueing Theory / J. Medhi. — London: Academic press, 2003. — 482 p.
17. Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками / А.Н. Дудин, В.И. Клименок. — Минск: Изд-во БГУ, 2000. — 176 с.
18. Казаков А.Л. Применение имитационного моделирования для синтетического планирования грузовых терминалов железнодорожного транспорта / А.Л. Казаков, А.М. Маслов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2010. — № 6 (46). — С. 146–153.
19. Дудин А.Н. Расчет необходимого числа каналов в современных телекоммуникационных сетях / А.Н. Дудин, В.И. Клименок // Информатизация образования. — 2005. — № 4. — С. 56–68.

#### REFERENCES

1. Kanke A.A., Koshevaya I.P. *Osnovy logistiki* [Fundamentals of Logistics]. Moscow, Knorus Publ., 2010. 576 p.
2. Mirotin L.B. (ed.). *Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemakh* [Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах]. [Cargo flow management in transport and logistics systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2010. 704 p.
3. Titov A.V., Volynskiy I.A. Features of Development of Transport and Logistics Clusters in Europe. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologii* = *Vestnik of Astrakhan state technical university*. Series: Marine Engineering and Technologies, 2015, no. 4, pp. 103–108. (In Russian).
4. Vlasov D.N. *Transportno-peresadochnye uzly krupneishego goroda (na primere Moskvy)* [Transport interchange Hubs of the Largest Metropolis (on the Example of Moscow)]. Moscow, ASV Publ., 2009. 96 p.
5. Lempert A.A., Kazakov A.L., Zharkov M.L. A Stochastic Model of a Transport Hub and Multi-phase Queueing Systems. *Advances in Intelligent Systems Research*, 2018, vol. 158, pp. 117–123.
6. Pavidis M.M., Zharkov M.L. Моделирование работы сортировочной станции на основе применения многофазных систем массового обслуживания. Modeling of the sorting station based on the use of multiphase queueing systems. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona* = *The Transport Infrastructure of the Siberian Region*, 2018, vol. 1, pp. 112–117. (In Russian).
7. Zharkov M.L., Kazakov A.L., Lempert A.A. Determination of the Critical parameters of Work Transport Interchange Hub Based on multiphase Queueing System. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* = *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 2017, no. 3 (35), pp. 40–52. (In Russian).
8. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of Complex Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 356 p.
9. Graham C., Talay D. *Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods: Mathematical Foundations of Stochastic Simulation*. New York, Springer, 2013. 264 p.
10. Potthoff G. Verkehrs stromungs lehre. Berlin, 1972. (Russ. ed.: Potthoff G. *Uchenie o transportnykh potokakh*. Moscow, Transport Publ., 1975. 344 p.).
11. Yakimov M.R. General Approach to Modeling of Pedestrian Flows. *Mir transporta* = *World of Transport and Transportation Journal*, 2015, vol. 13, no. 4, pp. 166–173. (In Russian).
12. Yakushkin I.M. Passazhirskie perevozki na metropolitenakh [Passenger Transportation by Subways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 175 p.

13. Fruin J.J. Pedestrian planning and design. New York, *Metropolitan Association of Urban designers and Environmental Planners*, 1971. 206 p.
14. Vishnevskii V.M. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya kompyuternykh setei* [Theoretical Fundamentals of Computer Network Design]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2003. 512 p.
15. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction to Queueing Theory]. Moscow, URSS Publ., 2007. 400 p.
16. Medhi J. *Stochastic Models in Queueing Theory*. London, Academic press, 2003. 482 p.
17. Dudin A.H., Klimenok V.I. *Sistemy massovogo obsluzhivaniya s korrelirovannymi potokami* [Queueing Systems with Correlated Flows]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2000. 176 p.
18. Kazakov A.L., Maslov A.M. Application of Simulation for Synthetic Planning of Railway Transport Cargo Terminals. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 6 (46), pp. 146–153. (In Russian).
19. Dudin A.H., Klimenok V.I. Calculation of Required Number of Canals in modern Telecommunications Networks. *Informatizatsiya obrazovaniya = Informatization of Education*, 2005, no. 4, pp. 56–68. (In Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Жарков Максим Леонидович** — кандидат технических наук, программист, Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: zharkm@mail.ru.

**Казakov Александр Леонидович** — доктор физико-математических наук, профессор РАН, профессор, кафедра «Автоматизированных систем», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: kazakov@icc.ru.

**Лемперт Анна Ананьевна** — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра «Автоматизированных систем», Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: lempert@icc.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Michael L. Zharkov** — candidate of technical sciences, programmer, Institute of Systems Dynamics and Control Theory of V.M. Matrosova SB RAS, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: zharkm@mail.ru.

**Alexander L. Kazakov** — doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Professor, Department of Automated Systems, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: kazakov@icc.ru.

**Anna A. Lempert** — candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Automated Systems, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: lempert@icc.ru.