



2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПАРКИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТА В КРУПНЫХ ГОРОДАХ

Белокуров Сергей Владимирович,
д.т.н., профессор кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Кононов Михаил Сергеевич,
студент Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва.

Белокуров Владимир Петрович,
д.т.н., профессор кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Кораблев Руслан Александрович,
к.с.-х.н., доцент кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

Голев Александр Дмитриевич,
к.т.н., доцент кафедры «Производство, ремонт и эксплуатация машин», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

Сподарев Руслан Александрович,
старший преподаватель кафедры «Организация перевозок и безопасность движения», Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж.

SIMULATION OF QUEUING PROCESSES IN PARKING CONDITIONS FOR MOTOR VEHICLES IN LARGE CITIES

Belokurov Sergey Vladimirovich,
doctor of technical sciences, professor of the department of applied mathematics and mechanics, Voronezh state technical university, Voronezh.

Kononov Mikhail Sergeevich,
student, Russian Presidential academy of national economy and public administration, Moscow.

Belokurov Vladimir Petrovich,
doctor of technical sciences, professor department of transport organization and traffic safety, Professor, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Korablev Ruslan Aleksandrovich,
candidate of agricultural sciences, associate professor department of transport organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh, e-mail: korablevra@vglta.vrn.ru

Golev Aleksandr Dmitrievich,
candidate of technical sciences, associate professor department of machine production, repair, and operation, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Spodarev Ruslan Aleksandrovich,
senior lecturer department of transport organization and traffic safety, Voronezh state forestry university named after G.F. Morozov, Voronezh.

Аннотация. Рассматривается использование математического моделирования процессов массового обслуживания с ожиданием в условиях паркования автотранспорта в городах. Процессы паркования автотранспорта рассмотрены на основании систем массового обслуживания теории вероятности.

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПАРКИРОВАНИЕ, СТОЯНКИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ.

¹ Автор для ведения переписки

Annotation. The use of mathematical modeling of queuing systems with waiting is considered for the conditions of motor vehicle parking in cities. Vehicle parking processes are analyzed based on queuing theory from probability theory.

Keywords: MODELLING, PARKING, VEHICLE PARKING FACILITIES, QUEUING SYSTEMS.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Интенсивный рост уровня автомобилизации в крупных городских агломерациях приводит к обострению целого ряда транспортных проблем. Одной из наиболее значимых является дефицит мест для паркования автотранспорта. Нехватка организованных парковочных пространств, их нерациональное распределение и неэффективное управление ими порождают хаотичную парковку, что, в свою очередь, усугубляет заторы, повышает аварийность, ухудшает экологическую обстановку и снижает общее качество городской среды. Традиционные градостроительные и организационные подходы к решению данной проблемы зачастую оказываются недостаточно эффективными, ресурсоемкими и не позволяют прогнозировать последствия принимаемых решений. В этой связи разработка и применение адекватных математических инструментов для анализа и оптимизации парковочных систем представляется чрезвычайно актуальной задачей.

Для ее решения предлагается новая разработанная комплексная имитационная модель процессов паркования автотранспорта, основанная на аппарате теории массового обслуживания (ТМО) с учетом специфики функционирования парковочного пространства крупного города. В отличие от существующих подходов, предлагаемая модель:

- 1) Рассматривает улично-дорожную сеть и парковочные зоны как единую стохастическую сеть массового обслуживания с отказами и ожиданием.
- 2) Учитывает нестационарный (зависящий от времени суток) характер входящего потока заявок (автомобилей, ищущих место для парковки).
- 3) Включает в себя параметры, описывающие поведенческие аспекты водителей (например, готовность к отказу от парковки или выбору альтернативного места в зависимости от времени поиска).
- 4) Позволяет оценивать ключевые показатели эффективности работы парковочной системы, такие как среднее время поиска парковочного места, вероятность отказа, коэффициент загрузки парковочных зон и уровень индуцированного трафика, порожденного автомобилями, находящимися в поиске.

Целью работы является повышение эффективности управления парковочным пространством крупного города за счет внедрения инструмента математического моделирования, позволяющего проводить оценку и прогнозирование последствий реализации различных организационных и инвестиционных решений.

В настоящее время центры крупных городов России и их отдельные районы имеют возросшие значения мест притяжения (торгово-развлекательных, культурно-бытовых и др.) наряду с существенно выросшим количеством легкового автотранспорта. Уровень автомобилизации в России за последние 30-40 лет увеличился в 4-5 раз. И хотя его значения пока в 2-

2,5 раза ниже показателей Европы и США, в центрах крупных городов России возникают остройшие дефициты мест паркования автотранспорта.

В тоже время большинство российских городов имеют плотную исторически сложившуюся застройку и сеть узких улиц. Отсутствие развития этого фактора на фоне растущей автомобилизации весьма ограничивает возможности для паркования автомобилей.

2 Материалы и методы

Методологической основой данного исследования выступил аппарат теории массового обслуживания (ТМО). В рамках работы система паркования автотранспорта в крупном городе была formalизована в виде многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием.

Для анализа основных характеристик процесса обеспечения паркования на стоянках были использованы элементы теории вероятностей. Это позволило описать ключевые параметры системы стохастическими методами и оценить ее показатели эффективности:

- 1) средняя длина очереди автомобилей, ожидающих свободного места на стоянке;
- 2) среднее время ожидания в очереди;
- 3) коэффициент загрузки парковочных мест (каналов обслуживания);
- 4) вероятность возникновения очереди.

Такой подход обеспечил рассмотрение нестационарных потоков заявок (автомобилей) и времени обслуживания (занятости парковочного места) с учетом их вероятностной природы, что позволило построить адекватную модель функционирования системы паркования в условиях неопределенности.

Методами исследования являлись элементы теории массового обслуживания, которые обеспечили рассмотрение системы массового обслуживания с ожиданием при исследовании основных характеристик по обеспечиванию паркования автотранспорта на стоянках. При исследовании системы паркования с ожиданием использовались элементы теории вероятностей.

3 Результаты исследований

Паркование автомобилей в больших городах характеризуется случайными процессами в СМО. При этом рассматриваются марковские случайные процессы потоков событий при использовании управления Колмогорова и определяется система массового обслуживания с отказами (одноканальные и многоканальные). В качестве «каналов» обслуживания рассматриваются места паркования автомобилей [1, 2].

Система массового обслуживания обеспечивает обслуживание (выполнения) какого-то потока заявок на паркование автомобилей в случайные моменты времени. Обслуживание поступившей заявки удовлетворяется в случае свободного места на паркование. Случайный характер потока заявок приводит к тому, что в какие-то промежутки времени на входе СМО будут появляться излишне заявки. Они будут образовывать очередь автомобилей, поступивших для паркования, что может приводить к покиданию СМО необслуженными автомобилями из очереди. В другие же периоды СМО будет работать с недогрузкой или простаивать [3, 4].

Система массового обслуживания при исследовании паркования автомобилей в зависимости от характера потока заявок на их паркование определяет пропускную способность, которая будет обеспечивать успешное удовлетворение поступившего потока на паркование [5-7].

Рассмотрим одноканальную ($n = 1$) СМО с ожиданием, в которую поступает поток заявок на паркование с интенсивностью (λ) , интенсивностью обслуживания (μ) и количеством обслуженных при этом заявок $(\rho = \frac{\lambda}{\mu})$. Заявка на паркование автомобиля, поступающего в момент, когда канал (парковочное место) занят, становится в очередь и ожидает обслуживания, когда освободится хотя бы одно парковочное место. При этом обслуживание может быть упорядоченным (в порядке очереди), хаотичным (кто сумеет вперед выйти к каналу обслуживания и приоритетным (обслуживание минует очередь).

Предположим, что количество автомобилей в очереди ограничено числом (m), то есть автомобиль прибыл для паркования в момент, когда в очереди уже стоят (m) автомобилей (заявок). Автотранспорт в этом случае покидает систему парковки необслуженной [8].

Состояние СМО может быть пронумеровано по числу заявок на паркование автотранспорта, которые могут находиться как в состоянии обслуживания, так и в состоянии ожидающих обслуживания в некоторой системе (S) [9-11]:

S_0 – канал свободен, то есть места для паркования автотранспорта имеются;

S_1 – канал занят, то есть все места для паркования автотранспорта заняты, но очереди нет;

S_2 – канал занят, но одно место для паркования автотранспорта стоит в очереди (то есть имеется);

S_k – канал занят, ($k-1$) заявок стоит в очереди;

S_{m+1} – канал занят, (m) заявок стоят в очереди.

При анализе случайных процессов с дискретными состояниями, которые имеют место в результате паркования автотранспорта, удобно пользоваться так называемым графом состояний системы (S) и переходов (ГСП).

Граф состояний и переходов (ГСП) в местах организации паркования автотранспорта представлен на рис. 1 [12].

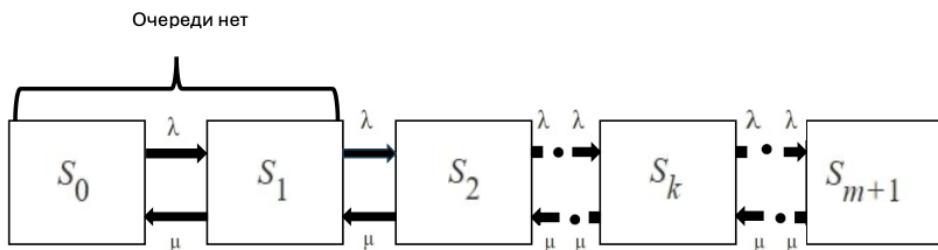


Рисунок 1 – Одноканальная система массового обслуживания с ожиданием

Из рис. 1 следует, что все интенсивности потоков событий перехода системы (S) по стрелкам слева направо, равны (λ), а справа налево – (μ). То есть по стрелкам слева направо систему переводит поток заявок (как только приходит новая заявка, система переходит в следующее состояние). В случае же направления справа налево имеем поток «освобождения» мест паркования автотранспорта, имеющий интенсивность (μ). В этом случае, как только будет обслужена очередная заявка, паркируемое место автотранспорта освободится, что приведет к уменьшению заявок в очереди [13-15].

Процесс, происходящий в системе (рис.1), можно представить как последовательную цепочку случайных событий, которая получила название марковской цепи ($S_1^{(0)}, S_2^{(1)}, S_3^{(2)}, S_4^{(3)} \dots$). При этом для каждого шага вероятность перехода (P) из любого состояния (S_i) в любое состояние S_j не зависит от того, когда и как система перешла в состояние (S_i).

Вероятности этих событий (P) для k -го шага, называются вероятностями состояний и имеют вид:

$$P_1(k) = P(S_1^k), P_2(k) = P(S_2^k), \dots P_i(k) = P(S_i^k). \quad (1)$$

Эти вероятности (1) удовлетворяют дифференциальным уравнениям Колмогорова. Решая эти уравнения, можно вычислить вероятности состояний во времени (t)

$$P(t) = P_1(t), P_2(t), \dots P_n(t), \quad (2)$$

удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \quad (3)$$

В результате решения дифференциальных уравнений Колмогорова для паркования автотранспорта в системе массового обслуживания с ожиданием получены следующие выражения для предельных вероятностей состояний [12]:

$$\begin{cases} P_k = \rho^k P_0; \\ P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, m+1), \quad (4)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ – приведенная интенсивность потока заявок по паркованию автотранспорта; λ – интенсивность потока заявок, авто/ч. (поток автомашин, прибывающих для паркования); μ – интенсивность потока автомобилей, находящихся в парковании, авто/ч.

После преобразования в окончательном виде предельные вероятности, определенные из дифференциальных уравнений Колмогорова, принимают вид:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} P_k \\ P_1 = \rho P_0 \\ P_2 = \rho^2 P_0 \\ \dots \\ P_k = \rho^k P_0; \\ \dots \\ P_{m+1} = \rho^{m+1} P_0 \end{cases} \quad (5)$$

В результате преобразований определены основные характеристики для СМО. Расчет основных характеристик в системе массового обслуживания с ожиданием при парковании автотранспорта проводится в следующей последовательности:

1) Вероятность отказа. Отказ имеет место в том случае, когда все места для паркования автотранспорта заняты и все m мест в очереди тоже:

$$P_{\text{отк}} = P_{m+1} = \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}. \quad (6)$$

2) Относительная пропускная способность:

$$q = 1 - P_{\text{отк}} = 1 - \frac{\rho^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}}. \quad (7)$$

3) Абсолютная пропускная способность:

$$A = \lambda q. \quad (8)$$

4) Средняя длина очереди:

$$\bar{r} = \frac{\rho^2[1 - (m+1-m\rho)\rho^m]}{(1-\rho)(1-\rho^{m+2})}. \quad (9)$$

5) Среднее число заявок, находящихся в системе:

$$\bar{\omega} = \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1 - \rho^{m+2}}. \quad (10)$$

6) Среднее время ожидания в очереди, определяемое как отношение среднего числа заявок в очереди к интенсивности потока заявок:

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{\bar{r}}{\lambda}. \quad (11)$$

7) Среднее время пребывания заявки в системе $t_{\text{смо}}$. Время пребывания заявки в СМО в результате паркования автотранспорта будет состоять из среднего времени ожидания в очереди и среднего времени обслуживания (непосредственного паркования автотранспорта $\bar{t}_{\text{обсл}}$):

$$\bar{t}_{\text{обсл}} = \frac{q}{\mu}. \quad (12)$$

Тогда полное время будет равно

$$\bar{t}_{\text{смо}} = \bar{t}_{\text{ож}} + \bar{t}_{\text{обсл}}. \quad (13)$$

На основе полученных выражений теоретически обоснована и разработана методика моделирования процессов массового обслуживания для систем паркования автомобильного транспорта, обслуживающих объекты массового тяготения в городских агломерациях. Для расчета ключевых характеристик системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием применялся аппарат теории вероятностей, в частности, система дифференциальных уравнений Колмогорова.

Использование уравнений Колмогорова позволяет анализировать вероятности перехода парковочной системы из одного состояния (S_i) в другое и на этой основе вычислять основные показатели эффективности СМО с ожиданием. Предложенная методика была апробирована на примере парковки, расположенной у торгового центра «Московский проспект» в г. Воронеже.

Апробация модели на практическом примере

Исследование выполнено для парковки торгового центра «Московский проспект» в г. Воронеже – типичного объекта массового тяготения в крупном городе. Парковочная зона допускала нахождение в очереди не более одного автомобиля ($m = 1$). При занятой очереди прибывающий автомобиль покидал систему, не становясь в очередь.

Приведенная интенсивность потока заявок составила:

$$\mu = \frac{\lambda}{30} = \frac{0,1}{30} = 0,0033; \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,1}{0,0033} = 30,3,$$

где μ – интенсивность обслуживания; ρ – непрерывно занятые места паркования в единицу времени. Если место занято, то автотранспорт становится в очередь и ожидает освободившиеся места.

По формулам (5) получим:

$$P_0 = \frac{1 - 30,3}{1 - 30,3^2} = \frac{-29,3}{1 - 918,1} = 0,032,$$

$$P_1 = \rho \cdot P_0 = 30,3 \cdot 0,032 = 0,968.$$

Вероятность отказа определяется по формуле (6):

$$P_{\text{отк}} = \frac{30,3^{1+2}(1 - 30,3)}{1 - 30,3^{1+2}} = \frac{26900}{27817,1} = 0,967.$$

Относительная пропускная способность СМО с ожиданием по зависимости (7) равна:

$$q = 1 - 0,967 = 0,033.$$

Абсолютная пропускная способность СМО с ожиданием автомашин в минуту по зависимости (8) будет равна:

$$A = 0,1 \cdot 0,033 = 0,0033.$$

Среднее число автомобилей в очереди для паркования по формуле (9) будет равно:

$$\bar{r} = \frac{30,3^2[1 - (1 + 1 - 30,3)30,3]}{(1 - 30,3)(1 - 30,3^{1+2})} = \frac{788180,30}{815041,03} = 0,967.$$

Среднее число автомобилей, находящихся под обслуживанием по формуле (10):

$$\bar{\omega} = \frac{30,3 - 30,3^{1+2}}{1 - 30,3^{1+2}} = \frac{27787,8}{27817,1} = 0,99.$$

Среднее время ожидания автотранспорта в очереди по формуле (11) соответственно равно:

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{0,967}{0,1} = 9,67 \text{ мин.}$$

Среднее время пребывания автотранспорта в СМО с ожиданием $\bar{t}_{\text{смо}}$ определяется из среднего времени ожидания в очереди $\bar{t}_{\text{ож}}$ и среднего времени обслуживания $\bar{t}_{\text{обсл.}}$.

Пробный проведенный расчет основных характеристик СМО с ожиданием является весьма актуальным в местах тяготения больших городов. Так, данный расчет использовался для одного из мест (сооружений) по паркованию автотранспорта в г. Воронеже под торговым центром «Московский проспект». Площадка перед данным сооружением допускала пребывание в очереди на паркование не более одного автотранспорта ($m = 1$). Если в очереди уже находится один автомобиль, очередной автомобиль, прибывший для паркования, в очередь не становится. Поток автомашин, прибывающих для паркования в данном месте, имел интенсивность $\lambda = 0,1$ (поступление автотранспорта в минуту, что соответствовало 6 автомашин в час). Процесс длительности паркования автотранспорта в среднем составлял 30 мин. Проведенный расчет демонстрирует низкую эффективность работы рассматриваемой парко-

вочной системы. Высокая вероятность отказа ($P_{отк} \approx 0,967$) и чрезмерно большое время ожидания в очереди ($P_{ож} \approx 9,67$ мин.) свидетельствуют о значительной перегрузке и необходимости оптимизации организации парковочного пространства. Полученные результаты подтверждают актуальность применения методов теории массового обслуживания для анализа и проектирования систем парковирования в местах массового тяготения крупных городов.

4 Обсуждение и заключение

Проведенное исследование было мотивировано необходимостью решения одной из наиболее острых проблем современных городов – дефицита эффективных парковочных пространств. Как показал анализ, работа автостоянок, особенно в местах массового тяготения, должна быть организована таким образом, чтобы максимально удовлетворять существующий спрос. Однако это удовлетворение может быть либо полным (когда стоянка принимает весь входящий поток автотранспорта), либо неполным, что приводит к отказам и формированию очередей. Критически важным фактором, определяющим эту динамику, является не только пропускная способность самой стоянки, но и ее месторасположение в городской структуре.

Настоящая работа демонстрирует, что аппарат теории массового обслуживания предоставляет надёжный математический инструментарий для адекватной оценки реального состояния работы парковочных систем. Предложенная методика позволяет количественно определить ключевые показатели эффективности, такие как абсолютная и относительная пропускная способность, среднее время ожидания в очереди, вероятность немедленного обслуживания и, что наиболее значимо, вероятность отказа. Последний показатель является интегральной характеристикой, наглядно демонстрирующей, насколько стоянка справляется с пиковой нагрузкой.

Работа автостоянок должна быть построена таким образом, чтобы удовлетворять спрос на паркование автомобилей. Однако это удовлетворение может быть либо полным, то есть стоянка может принимать весь поток автотранспорта (например, в местах притяжения в дневное время), либо неполным. Важным фактором при этом является месторасположение стоянки на карте города. Реальное состояние работы стоянок для паркования автотранспорта можно определять используя аппарат теории массового обслуживания, который позволяет оценивать показатели эффективности работы стоянки паркования автотранспорта: абсолютную и относительную пропускную способность, среднее время продолжительности паркования, средний интервал и интенсивности прибытия автотранспорта для паркования и обслуживания автотранспорта на стоянке, вероятность немедленного принятия автотранспорта на обслуживание, вероятность отказа в обслуживании (вероятности занятости системы).

В рамках исследования установлено, что для успешного применения данной методики необходимы три исходных параметра: средний интервал прибытия автотранспорта, средняя продолжительность паркования и количество парковочных мест. Эти показатели, получаемые в ходе натурных наблюдений, являются фундаментом для построения достоверной модели и последующих расчетов.

Рост уровня автомобилизации в условиях ограниченной пропускной способности улично-дорожной сети породил системный кризис паркования в крупных городах, особенно актуальный в зонах массового тяготения. В ответ на эту задачу в статье предложен механизм формализации работы автостоянок как системы массового обслуживания с отказами и ограниченной очередью.

Полученные результаты имеют научную и практическую значимость:

1) В отношении теоретического обоснования представлена и апробирована методика, позволяющая рассматривать парковочную инфраструктуру как стохастическую сеть массового обслуживания, что позволяет применять к ее анализу хорошо разработанный математический аппарат.

2) В отношении систематизации результатов выделены и структурированы ключевые показатели, характеризующие эффективность системы паркования, и предложен четкий порядок их расчета на основе уравнений Колмогорова.

3) В отношении практической аprobации разработанная методика была успешно применена для оценки функционирования реальной стоянки в г. Воронеже. Расчеты наглядно показали низкую эффективность системы (вероятность отказа $\sim 0,69$), что свидетельствует о ее значительной перегрузке и подтверждает необходимость оптимизации – например, за счет увеличения количества мест или внедрения системы управления очередью.

Рост автомобилизации, малая плотность дорожной сети создало проблемы парковования автотранспорта в городах, особенно в местах массового тяготения. В связи с этим в статье предложен механизм работы стоянок автотранспорта как системы массового обслуживания с отказами. Выделены показатели, характеризующие систему паркования автотранспорта и предложен порядок их расчета. Предложена методика оценки функционирования стоянок для паркования автотранспорта, обслуживающих объекты массового тяготения, которое сопровождается конкретным расчетом одной из стоянок в Воронежской области.

Таким образом, использование теории массового обслуживания открывает возможности для перехода от интуитивного управления парковочным пространством к научно обоснованному проектированию и оперативному регулированию, что является важным этапом на пути к созданию устойчивой транспортной среды в крупных городских агломерациях.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке оптимизационных моделей, учитывающих неоднородность парковочного спроса в течение суток, поведенческие модели водителей и возможность создания централизованных систем управления парковочным пространством всего города.

Список литературы

- 1 Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль количества / Р. Шторм // пер. с нем. – М.: Мир, 1970. – 368 с.
- 2 Мальцев, Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений / Ю.А. Мальцев. – М.: Центр «Академия», 2010. – 320 с.
- 3 Вентцель, Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1991. – 384 с.
- 4 Голубев, Е.А. Автомобильные стоянки и гаражи в застройке городов / Е.А. Голубев. – Стройиздат, 1988. – 252 с.
- 5 Гольц, Г.А. Автодорожный комплекс в условиях взрывной автомобилизации: тенденции, закономерности, прогноз / Г.А. Гольц // Проблемы прогнозирования. – 2002. – №4. – С. 75-83.
- 6 Киноринг, В.И. Искусство управления / В.И. Киноринг. – М.: БЕК, 1997. – 288 с.
- 7 Лобанов, Е.М. Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов. – М.: Стройиздат, 1990. – 240 с.
- 8 Саати, Л.Т. Элементы теории массового обслуживания и её приближения / Л.Т. Саати. – М.: Советское радио, 1971. – 520 с.
- 9 Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. В 2 т. / В. Феллер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
- 10 Четыркин, Е.М. Статические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин. – М.: Статистика, 1997. – 200 с.
- 11 Арнольд, В.И. Аналитика и прогнозирование: математический аспект / В.И. Арнольд // Научн.-техн. Информация. – 2003. – Сер.1. – №3. – С. 1-11.
- 12 Партика, Т.Л. Математические методы / Т.Л. Партика, И. И. Попов. – М.: ФОРУМ.: ИНФРА-М, 2009. – 464 с.
- 13 Пинегина, М.В. Экономико-математические методы и модели / М.В. Пинегина. – М.: Экзамен, 2002. – 228 с.
- 14 Протасов, И.Д. Теория игр и исследование операций / И.Д. Протасов. – М.: Гелиос АРВ, 2003. – 204 с.
- 15 Карасев, А.И. Математические методы и модели в планировании / А.И. Карасев и др. – М.: Экономика, 1987. – 302 с.

References

- 1 Störmer, R. (1970). Probability theory. Mathematical statistics. Statistical quality control. Moscow: Mir. – P. 368.
- 2 Maltsev, Yu.A. (2010). Economic-mathematical methods for designing transport structures. Moscow: Academy. – P. 320.
- 3 Venttsel, E.S., & Ovcharov, L.A. (1991). Theory of random processes and its engineering applications. Moscow: Nauka. – P. 384.
- 4 Golubev, E.A. (1988). Car parks and garages in urban development. Stroyizdat. – P. 252.
- 5 Golts, G.A. (2002). The road complex in the context of explosive motorization: trends, patterns, forecast. Studies on Russian Economic Development, №4, pp. 75-83.
- 6 Kinoring, V.I. (1997). The art of management. Moscow: BEK. – P. 288.
- 7 Lobanov, E.M. (1990). Transport planning of cities. Moscow: Stroyizdat. – P. 240.
- 8 Saaty, T.L. (1971). Elements of queueing theory and its applications. Moscow: Sovetskoye Radio. – P. 520.
- 9 Feller, W. (1984). An introduction to probability theory and its applications (Vols. 1-2). Moscow: Mir. – P. 528.
- 10 Chetyrkin, E.M. (1997). Statistical forecasting methods. Moscow: Statistika. – P. 200.
- 11 Arnold, V.I. (2003). Analytics and forecasting: mathematical aspect. Scientific and Technical Information, Series, Vol. 1, №3, pp. 1-11.
- 12 Partyka, T.L., & Popov, I.I. (2009). Mathematical methods. Moscow: FORUM: INFRA-M. – P. 464.
- 13 Pinegina, M.V. (2002). Economic-mathematical methods and models. Moscow: Ekzamen. – P. 228.
- 14 Protasov, I.D. (2003). Game theory and operations research. Moscow: Gelios ARV. – P. 204.
- 15 Karasev, A.I., et al. (1987). Mathematical methods and models in planning. Moscow: Ekonomika. – P. 302.

© Белокуров С. В., Кононов М. С., Белокуров В. П.,
Кораблев Р. А., Голев А. Д., Сподарев Р. А., 2025