

Математическое и компьютерное моделирование

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 656.1

DOI: 10.30987/2658-6436-2022-4-46-53

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Анатолий Николаевич Архангельский

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

139aan@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9791-8798>

Аннотация. Целью исследования является разработка более совершенной микромодели движения автомобиля в транспортном потоке, позволяющей учесть при моделировании влияние полного набора факторов, влияющих на параметры этого процесса. В статье выполнен дополнительный анализ известной модели «разумного водителя» для моделирования движения автомобиля в транспортном потоке и предложено использовать разработанную автором алгоритмическую модель. Предлагаемая модель физически адекватно описывает движение автомобиля при трогании его с места, разгоне, езде с постоянной («желаемой») скоростью и при торможении вплоть до полной остановки в режиме следования за «лидером». Основным принципом взаимодействия с «лидером» является обеспечение минимальной, но безопасной дистанции между ними при всех возможных режимах движения. Приведена структура предлагаемой модели и состав исходных данных, необходимых для её работы. Также показаны возможности предлагаемой модели для прогнозирования процесса движения автомобиля в транспортном потоке с учётом конкретных дорожных условий и параметров автомобиля.

Ключевые слова: автомобиль, ускорение, замедление, скорость, транспортный поток, микромодель, алгоритмическая модель

Для цитирования: Архангельский А.Н. Алгоритмическая модель движения транспортного потока // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №4 (18). С. 46-53. doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-46-53.

Original article

Open Access Article

ALGORITHMIC MODEL OF TRAFFIC STREAM

Anatoly N. Arkhangelsky

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

139aan@mail.ru

Abstract. The aim of the paper is to develop a more advanced micromodel of a car motion in a traffic stream, which makes it possible to consider the factors influencing the process parameters when modelling. In the article, an additional analysis of the well-known «reasonable driver» model for simulating a car motion in a traffic stream is carried out and it is proposed to use the algorithmic model developed by the author. The offered model physically adequately describes the car motion when starting it off, accelerating, driving at a constant («desired») speed and braking up to a complete stop in the mode of following the «leader». The main principle of the interaction with the «leader» is to ensure a minimum but safe distance between them in all possible motion modes. The structure of the proposed model and the composition of the initial data necessary for its operation are given. The possibilities of the proposed model for predicting the car motion process in a traffic stream are also shown, taking into account specific road conditions and the car parameters.

Keywords: car, acceleration, deceleration, speed, traffic flow, micromodel, algorithmic model

For citation: Arkhangelsky A.N. Algorithmic model of traffic stream. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 4 (18). pp. 46-53. doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-46-53.

Введение

Разработка эффективной системы управления движением транспортных и пешеходных потоков в условиях больших городов с каждым годом становится все более актуальной задачей. К сожалению, отечественная нормативная и справочная литература, созданная в 50 – 70-х годах прошлого столетия, совершенно не соответствует современным реалиям автомобильного транспорта. В качестве примера можно привести «новейший» документ ОДМ 218.6.003-2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах» (Дата актуализации: 01.02.2020), содержащий устаревшие положения. Зарубежные исследователи несомненно имеют более существенные достижения (Similar to the US Highway Capacity Manual [1, 2] и German Highway Capacity Manual (HBS 2015) [3]. В российских источниках информацию об основных положениях этих документов можно найти в трудах Власова А.А. [4] и Левашова А.Г. [5].

В настоящее время для решения различных задач управления транспортными потоками применяется моделирование движения на микроуровне с использованием интегрированных коммерческих программных продуктов, таких как: AIMSUN, VISSIM, PARAMICS, CORSIM, TRANSYT, AVENUE [6]. Основой всех этих коммерческих программных продуктов являются различные типы моделей: макромодели, модели транспортного спроса, мезомодели, модели следования за лидером в совокупности с моделями смены полосы движения.

Среди отечественных разработок следует выделить агентную модель COS.SIM, использующую микромодель «разумного водителя» Трайбера для описания движения автомобиля [7, 8].

Основная идея этих разработок – это применение новых формул для расчёта основных параметров путём введения коэффициентов для учёта влияния дополнительных факторов. По мнению автора, такой подход при описании работы стохастических систем является бесперспективным.

Постановка задачи исследования

Для оценки качества микромоделей, описывающих процессы движения автомобилей и взаимодействия между ними в транспортном потоке, необходимо иметь полный доступ ко всем используемым в них параметрам. Перечисленные выше коммерческие программные комплексы такой возможности не представляют, что, в свою очередь, затрудняет их содержательный анализ.

В настоящее время, с учётом широкой доступности вычислительной техники, является целесообразным переориентироваться на программно-моделирующие продукты скорее аналитического, чем чисто имитационного типа, с набором требуемых функций и учитываемых параметров, необходимых для решения практических задач проектирования и управления.

Важнейшим объектом уличной дорожной сети является регулируемое пересечение. Проектирование системы управления движением транспортных и пешеходных потоков, обеспечивающей многокритериальную оптимизацию, является актуальной задачей для большинства пересечений. Многие показатели процессов взаимодействия по методам расчёта не только устарели, но и абсурдны по способам расчёта. В качестве примера можно назвать такие величины, как поток насыщения при движении прямо, направо или налево, потерянное время в цикле и, наконец, длительность светофорного цикла.

Современный подход для решения задач определения, как отдельных параметров пересечения, так и задач его оптимизации, может базироваться только на моделировании на ЭВМ с использованием микромоделей.

В работе автора [9] уже предпринималась попытка построения усовершенствованной модели на использованной в виде основы модели «разумного водителя» Трайбера (Intelligent Driver Model (IDM)) [10].

Расчётная зависимость этой модели представлены ниже.

$$a(t) = a_{авт} \left[1 - \left(\frac{V_a(t)}{V_{жс}} \right)^\delta - \left(\frac{d_{\min} + t_p \cdot V_a(t) - \frac{V_a(t)(V_L(t) - V_a(t))}{2\sqrt{a_{авт}b_{авт}}}}{X_L(t) - X_a(t)} \right)^2 \right];$$

где $a(t)$ – ускорение автомобиля в момент времени t , м/с^2 ; a_{aem} – постоянное «комфортное» ускорение, м/с^2 ; $V_a(t)$ – скорость автомобиля в момент времени t , м/с ; $V_{жс}$ – желаемая (комфортная) скорость автомобиля; δ – показатель динамичности разгона («агрессивность» вождения); d_{\min} – минимальное расстояние между автомобилями в заторе, м ; t_p – время реакции водителя, с ; b_{aem} – величина «комфортного» замедления при торможении автомобиля, м/с^2 ; $X_a(t)$ – линейная координата положения автомобиля в момент времени t , м ; $X_{л}(t)$ – линейная координата положения лидера в момент времени t , м .

В модифицированной модели автора предлагалось ввести зависимость величины возможного ускорения автомобиля от скорости его движения. Для описания этой зависимости использовались результаты расчётов величины ускорения конкретного автомобиля в определённых дорожных и климатических условиях. Для оценки динамики движения автомобиля была использована его одномассовая модель, описываемая уравнением [11]:

$$m_a \cdot \delta_{вп(i)} \frac{dV}{dt} = A(i) \cdot V^2 + B(i) \cdot V + C(i).$$

Откуда

$$a(i) = \frac{A(i) \cdot V^2 + B(i) \cdot V + C(i)}{m_a \cdot \delta_{вп(i)}}. \quad (1)$$

Как показали результаты сопоставления экспериментальных наблюдений и расчётов движения различных автомобилей по этой модели, модель улучшила описание реальных процессов, но не устранила все недостатки исходной модели.

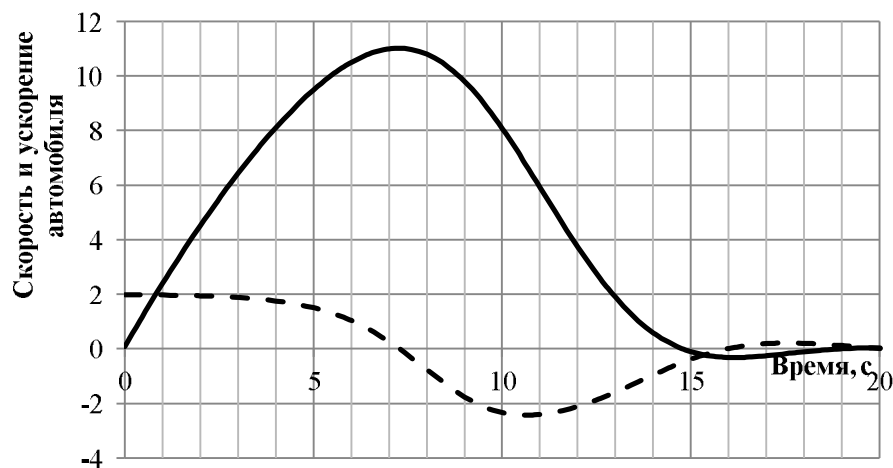


Рис. 1. Графики изменения скорости и ускорения автомобиля с момента старта до момента остановки перед стоящим лидером

Fig. 1. Graphs of the change in speed and acceleration of the car from the moment of start to the moment of stopping in front of the standing leader

Графики, приведённые на рис. 1 наглядно показывают качественные несоответствия модели и реального поведения автомобиля:

- старт автомобиля происходит с ускорениями близкими к нулю, но не с заданным ускорением (в примере 2 м/с^2);
- при остановке скорость модели меняет знак, что соответствует движению автомобиля вперёд и назад;
- характер изменения ускорения абсолютно не соответствует динамике реального автомобиля.

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что модель «разумного водителя» весьма удачный вариант имитационной модели, но из-за присущих ей недостатков требует замены на более совершенную модель.

Описание алгоритмической модели движения автомобиля

По своей сущности разработанную автором модель можно обозначить как модель движения за лидером с обеспечением безопасного интервала во всех возможных условиях. В модели рассматриваются следующие линейные величины: длины всех автотранспортных средств (АТС); интервал между остановившимися АТС; интервал между лидером и ведомым АТС при различных режимах движения. В транспортном потоке принимается, что впереди движущиеся АТС – это лидер, за которым движется ведомое АТС. Для первого АТС транспортного потока использовано название «условный» лидер. Рассмотрим подробно все виды интервалов.

Интервал между остановившимися АТС включает в себя длину АТС и расстояние между стоящими автомобилями.

При старте и разгоне добавляется интервал, равный произведению времени реакции водителя на скорость ведомого АТС. Если расстояние до лидера больше расстояния необходимого для снижения скорости ведомого до скорости лидера, то происходит разгон до скорости, желаемой для ведомого АТС. В противном случае безопасный интервал увеличивается на величину разности квадратов скоростей лидера и ведомого, делённое на удвоенную величину заданного замедления ведомого АТС.

Модель реализована в виде программы для ЭВМ состоящей из 4 блоков. В первом блоке осуществляется ввод набора данных по каждому АТС, входящему в рассматриваемый транспортный поток, также данных по дорожным условиям и температуре воздуха. В блоке выполняются расчёты всех вспомогательных величин, используемых в дальнейшем. Перечень всех данных, необходимых для работы модели, приведён в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Table 1

Basic data

Исходные данные АТС «Лада гранта» (МКПП)				
$N_e = 66$ кВт	$K_p = 0,9$	$\eta_{мин} = 0,9$	$Rk = 0,281$ м	$C = 1,596$
$Rd = 0,269$ м	$C_x = 0,365$	$H_{г} = 1,5$ м	$B_{г} = 1,7$ м	$B = 2,1904$
$G_a = 13\ 000$ Н	$t\ ^\circ\text{C} = 20$	$nN = 5100$	$i_{прод} = 0$	$A = 0,4055$
$U_{гл} = 3,7$	$U_1 = 3,636$	$U_2 = 1,95$	$U_3 = 1,357$	$U_4 = 0,941$
$U_5 = 0,784$	$n_{мин} = 800$	$n_{макс} = 5100$	$f_0 = 0,02$	$K_f = 7E-06$

Справочные данные:

N_e – эффективная мощность двигателя, Квт; C_x – аэродинамический коэффициент продольной аэродинамической силы; $H_{г}$ – габаритная высота АТС, м; $B_{г}$ – габаритная ширина АТС, м; Параметры шины АТС; $U_{гл}$ и $U_1 \dots U_5$ – передаточные числа главной передачи и КПП.

Назначаемые и расчётные параметры:

G_a – вес АТС в расчётном состоянии, Н; K_p – коэффициент, учитывающий долю мощности двигателя, используемую на движение АТС; $\eta_{мин}$ – минимальное значение коэффициента полезного действия трансмиссии АТС; $t\ ^\circ\text{C}$ – при расчётной температуре воздуха; A , B , C – параметры типовой скоростной характеристики двигателя АТС; $i_{прод}$ – продольный уклон дороги; f_0 , K_f – параметры определяющие величину сопротивления качению.

По формуле (1) выполняются расчёты по определению ускорения АТС на разных передачах в зависимости от скорости движения АТС. Иллюстрация таких расчётов приведена на рис. 2.

Во втором блоке методом регрессионного анализа рассчитываются параметры зависимости величины ускорения от скорости на двух участках: трогания с места и последующего движения. Пример графиков таких зависимостей приведён на рис. 2.

Третий блок является собственно алгоритмической моделью движения автомобилей в транспортном потоке. При старте моделирующей программы происходит ввод всех парамет-

ров как первого (условного лидера), так и всех следующих за ним АТС рассматриваемого транспортного потока.

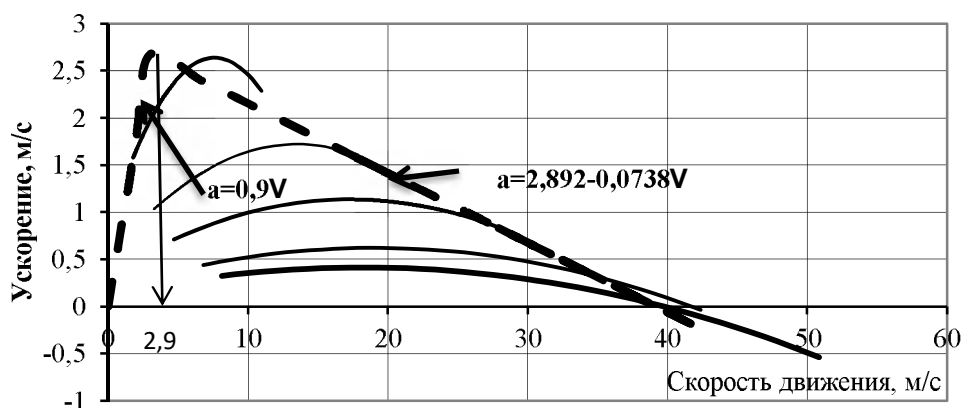


Рис. 2. Графики зависимости ускорения автомобиля «Лада Гранда» от скорости движения и зависимостей для их описания в основной микромодели
Fig. 2. Graphs of the dependence of the acceleration of the car «Lada Granta» on the speed of movement and dependencies for their description in the main micromodel

Во втором блоке методом регрессионного анализа рассчитываются параметры зависимости величины ускорения от скорости на двух участках: трогания с места и последующего движения. Пример графиков таких зависимостей приведён на рис. 2.

Третий блок является собственно алгоритмической моделью движения автомобилей в транспортном потоке. При старте моделирующей программы происходит ввод всех параметров как первого (условного лидера), так и всех следующих за ним АТС рассматриваемого транспортного потока.

К параметрам условного лидера относятся: начальное положение лидера; длина лидера, м; начальная скорость лидера, м/с; ускорение лидера, м/с².

К параметрам автомобилей в очереди относятся: номер автомобиля; начальное положение автомобиля; начальная скорость автомобиля, м/с; длина автомобиля, м; время реакции водителя, с; максимальная величина замедления автомобиля, м/с²; признак вида зависимости ускорения от скорости PSU (1 – экспоненциальная; 0 – линейная); параметры зависимости ускорения от скорости (линейная зависимость – $a_{АТС} = A + BV_{АТС}$; экспоненциальная – $a_{АТС} = A * EXP(BV_{АТС})$; скорость в точке перехода на основную ветвь характеристики $V_{гр}$; угловой коэффициент начальной ветви характеристики $B_{гр}(i)$; желаемая скорость автомобиля, м/с; минимальное расстояние между бамперами автомобилями, м.

Пример экспоненциальной зависимости приведён на рис. 3.

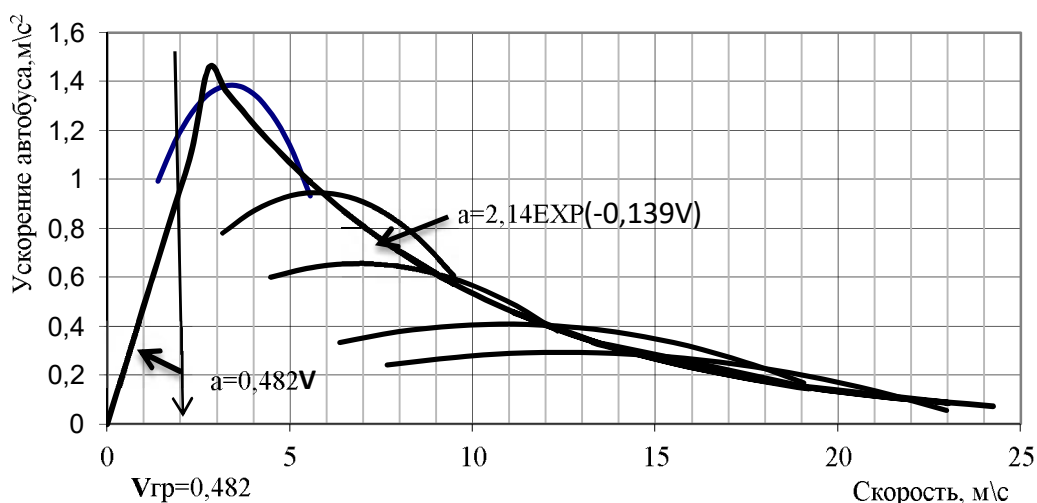


Рис.3. Графики зависимости ускорения автобуса «ЛиАЗ 4292» с загрузкой 5 тонн от скорости движения и зависимостей для их описания в основной микромодели

Fig. 3. Graphs of the dependence of the acceleration of the «LiAZ 4292» bus with a load of 5 tons on the speed of movement and dependencies for their description in the main micromodel

Четвёртый блок – блок визуализации. Сопоставление результатов моделирования с реальными параметрами движения АТС, выполненное методами воздушного и наземного видеонаблюдения, показало их хорошую сходимость. На рис. 4 приведён иллюстративный пример воздушного видеонаблюдения.



Рис. 4. Фрагменты воздушного наблюдения за движением АТС на перекрёстке
 Fig. 4. Fragments of aerial surveillance of the movement of vehicles at the crossroads

Результаты опытной эксплуатации разработанной модели

В качестве иллюстрации работы программного продукта с разработанной микромоделью приводятся результаты моделирования потока из трёх АТС (микроавтобус «Фиат Дука-то» – полная масса 3500 кг). Начальные условия: автомобиль лидер длиной 6 м стоит на расстоянии 162,5 м от стоп-линии рассматриваемого перекрёстка. У стартовой линии стоят два микроавтобуса длиной 6 м каждый. Интервал между ними равен 1,5 м. Уклон дороги равен нулю. Температура воздуха 20 °С. Коэффициент сопротивления качению 0,02. Желаемая скорость движения микроавтобусов 17 м/с. Параметры движения на рассматриваемом участке приведены на рис. 5 – 7.

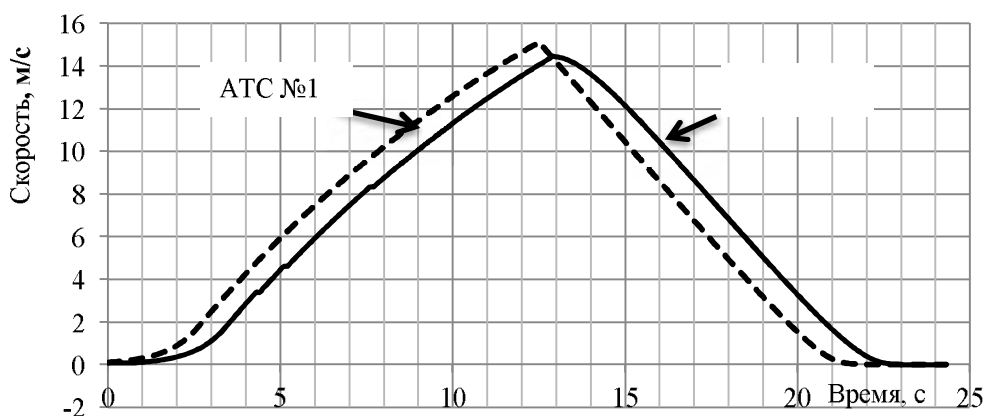


Рис. 5. Графики изменения скорости двух АТС на рассматриваемом участке
 Fig. 5. Graphs of the change in the speed of two vehicles in the section under consideration

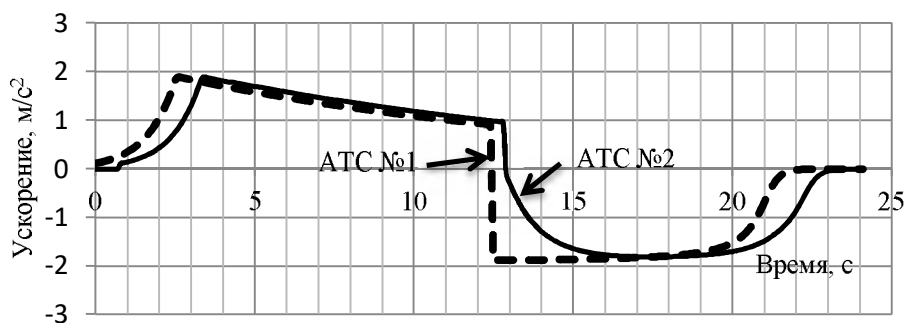


Рис. 6. Графики величины ускорения двух АТС на рассматриваемом участке
Fig. 6. Graphs of the magnitude of the acceleration of two vehicles in the section under consideration

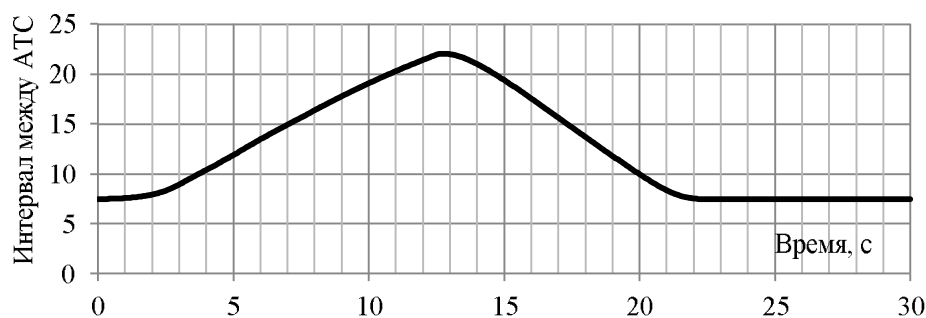


Рис. 7. Графики изменения интервала между двух АТС на рассматриваемом участке
Fig. 7. Graphs of the change in the interval between two vehicles on the section under consideration

Полученные при моделировании данные позволяют сделать вывод о хорошем качественном и количественном совпадении результатов моделирования и процессов движения на улице.

В заключении следует отметить, что разработанная модель имеет неоспоримые преимущества по сравнению как с моделью Трайбера [10], так и с модифицированной автором моделью Трайбера [9]. Разработанная модель позволяет учесть при моделировании транспортных потоков динамические характеристики конкретного автомобиля, его загрузку, дорожные и климатические условия эксплуатации, а также более реалистично моделировать процессы разгона, торможения и остановки автотранспортного средства.

Предлагаемая модель является основой разработки модели «интеллектуального агента» с широкими возможностями моделирования движения транспортных потоков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

References

1. Highway Capacity Manual // Transportation Research Board, Washington, D.C. 2000. ISBN 0-309-06681-6.
2. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2010. ISBN 978-0-309-16077-3.
3. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2015, German Highway Capacity Manual), to be published by FGSV Verlag GmbH.
4. Власов А.А. Теория транспортных потоков: моногр. Пенза: ПГУАС. 2014. 124 с.
5. Левашов А.Г. Михайлов А.Ю. Головин И.М. Проектирование регулируемых пересечений. Учеб. Пособие. Иркутск: Изд. ИрГТУ. 2007. 208 с.
6. Использование математических моделей транспортных потоков для расчёта показателей качества и эффективности организации дорожного движения. <https://infopedia.su/16x12015.html>.
1. Transportation Research Board Highway Capacity Manual. Washington, D.C: National Research Council; 2000.
2. Transportation Research Board Highway Capacity Manual. Washington, D.C: National Research Council; 2010.
3. Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. In: Lemke K. German Highway Capacity Manual Copenhagen: FGSV Verlag GmbH; 2015.
4. Vlasov A.A. Theory of Transport Flows. Penza: Penza State University of Agriculture and Construction; 2014.
5. Levashov A.G. Mikhailov A.Yu. Golovin I.M. Designing Controlled Crossings. Irkutsk: Irkutsk National Technical University; 2007.
6. Using Mathematical Models of Traffic Flows to Calculate the Quality and Efficiency of Traffic Organisation [Internet]. Available from: <https://infopedia.su/16x12015.html>.

7. Агентное моделирование автотранспортных потоков / Панасюк Я.С., Малых В.А., Мануйлов В.А., Дудинов И.К., Черняк Г.М. // Труды 53-й научной конференции МФТИ. 2010. Ч. 5. С. 130-131.

8. Курц В.В., Ануфриев И.Е. Новые микроскопические модели автомобильного трафика // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. №4. С.50-56.

9. Архангельский А.Н. Моделирование движения автомобиля в транспортном потоке на ЭВМ. – Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2020. №1(7). С. 26-31.

10. Treiber, M., Kesting A. Christian Thiemann Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. London: Springer. 2012. P. 221-222.

11. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов. Москва. Машиностроение.1989. 240 с.

7. Panasyuk YaS, Malykh VA, Manuilov VA, Dudinov IK, Chernyak GM. Agent-Based Modelling of Auto Traffic Flows. In: Proceedings of the 53rd Scientific Conference of Moscow Institute of Physics and Technology. 2010;5:130-131.

8. Kurts V.V., Anufriev I.E. New Microscopic Models of Motocar Traffic. St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2014;4:50-56.

9. Arkhangelsky A.N. Modelling the Car Motion in a Transport Flow on a Computer. Automation and Modelling in Design and Management. 2020;1(7):26-31.

10. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. London: Springer; 2012. p. 221-222.

11. Litvinov A.S., Farobin Ya.E. Car: Operational Properties Theory. Moscow: Mashinostroenie; 1989.

Информация об авторах:

Анатолий Николаевич Архангельский

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета.

Information about authors:

Anatoly Nikolaevich Arkhangelsky

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Educational Scientific Transport Institute, Associate Professor of the Department «Automobile Transport» of Bryansk State Technical University.

Статья поступила в редакцию 10.05.2022; одобрена после рецензирования 21.05.2022; принята к публикации 25.07.2022.

The article was submitted 10.05.2022; approved after reviewing 21.05.2022; accepted for publication 25.07.2022.

Рецензент – Рассоха В.И., доктор технических наук, профессор, Оренбургский государственный университет.

Reviewer – Rassokha V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Оренбургский State University.