

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-04

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СМЕШАННОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА****О. П. Бобровская<sup>1,2,a</sup>, Т. В. Гавриленко<sup>1,2,b</sup>**<sup>1</sup> Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация<sup>2</sup> Сургутский филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Сургут, Российская Федерация<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, ✉ [o-bobrovskaya@mail.ru](mailto:o-bobrovskaya@mail.ru)<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, [taras.gavrilenko@gmail.com](mailto:taras.gavrilenko@gmail.com)

*Аннотация:* развитие и внедрение автономных транспортных средств требует создания модели смешанного транспортного потока. Разрабатываемая модель может использоваться для оценки влияния автопилотов на транспортный поток, а в дальнейшем – для управления транспортной сетью. Существующих моделей, созданных на основе водителей-людей, недостаточно. Модификации этих моделей сводятся к уменьшению в два раза параметров скорости реакции и дистанции до впереди идущего транспортного средства для имитации беспилотного транспорта. Большое внимание в современных исследованиях уделяется подключению автомобилей к единой сети для обмена информацией. В статье рассмотрены подходы к моделированию смешанного транспортного потока и прогнозирования объема трафика, решению задач управления транспортной системой в целом и автономными транспортными средствами и летательными аппаратами в частности: избегания столкновений, планирования маршрута, ориентирования. Условно выделены и охарактеризованы классы этих подходов и сделан вывод о направлении дальнейших разработок.

*Ключевые слова:* микроскопическая модель транспортного потока, автономные транспортные средства, подключенные транспортные средства, методы искусственного интеллекта, нечеткие множества, ситуационное управление, линейное программирование, БПЛА.

*Благодарности:* работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (Выполнение фундаментальных научных исследований ГП 47) по теме № 0580-2021-0007 «Развитие методов математического моделирования распределенных систем и соответствующих методов вычисления».

*Для цитирования:* Бобровская О. П., Гавриленко Т. В. Проблемы моделирования смешанного транспортного потока. *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):39–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-04.

*Поступила в редакцию:* 07.07.2023.

*В окончательном варианте:* 01.09.2023.

**SIMULATION OF MIXED TRAFFIC FLOWS****O. P. Bobrovskaya<sup>1,2,a</sup>, T. V. Gavrilenko<sup>1,2,b</sup>**<sup>1</sup> Surgut State University, Surgut, Russian Federation<sup>2</sup> Surgut Branch of Federal State Institute “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Surgut, Russian Federation<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7045-9085>, ✉ [o-bobrovskaya@mail.ru](mailto:o-bobrovskaya@mail.ru)<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3243-2751>, [taras.gavrilenko@gmail.com](mailto:taras.gavrilenko@gmail.com)

*Abstract:* as autonomous vehicles become common, we need a simulation model for a mixed traffic flow. The proposed model can be used to assess the impact of autonomous vehicles on the traffic flow, and to manage the future traffic. The existing models for human-driven vehicles are insufficient. Such models are usually adapted by halving the driver reaction speed and distance to the vehicle ahead to simulate an autonomous vehicle. Much of the current research is focused on connected vehicles. This study considers some approaches to the simulation of mixed traffic flows and traffic prediction, the management of the entire transportation network, autonomous surface vehicles and aircraft (collision avoidance, route planning, and navigation). The existing strategies are categorized and suggestions for further developments are made.

*Keywords:* microscopic traffic simulation, autonomous vehicles (AV), connected autonomous vehicles (CAV), AI methods, fuzzy sets, situational control, linear programming, unmanned aerial vehicle (UAV).

*Acknowledgements:* this study is the 47 GP government order contracted to the Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences, project No. 0580-2021-0007 Advancing Distribution System Simulation and Computation Methods.

*Cite this article:* Bobrovskaya O. P., Gavrilenko T. V. Simulation of Mixed Traffic Flows. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(3):39–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-04.

*Original article submitted:* 07.07.2023.

*Revision submitted:* 01.09.2023.

## Введение

В связи с непрекращающимся увеличением объема трафика, тестированием и внедрением автоматизированных и автономных транспортных средств, остро стоит проблема управления транспортным потоком в черте города и за его пределами для минимизации времени путешествия и сопутствующих этому расходов топлива и выбросов, опасности столкновений и аварий.

В статье [1] предлагается система управления транспортной сетью с помощью узловых светофоров. Авторы принимают решение об использовании макромоделирования из-за скорости работы, подходящей для режима реального времени, описывают используемую модель, вариацию макроскопической модели Даганзо, вводят формулы и алгоритмы для управления, прогнозирования и оценивания состояния системы. Затем осуществляется построение транспортной сети, ее калибровка, определение транспортных потоков и распределительных матриц для узлов (перекрестков) и сравнение результатов моделирования с управлением и без.

Понятно, что для успешного управления, прежде всего, необходима модель системы, на которую можно будет осуществлять управляющие воздействия. Для решения этой проблемы за продолжительную историю существования автомобильного транспорта было создано множество моделей транспортного потока различных уровней абстракции. В этих моделях транспортный поток уподобляется потоку жидкости (макромодели) с соответствующими модификациями или создается обобщенная модель водителя (микромодели), отражающая распространенные особенности его поведения. Для последних, микроскопических, моделей на основе экспериментальных данных рассчитываются параметры, характеризующие поведение водителей легковых автомобилей, грузового транспорта, мотоциклов и мопедов.

Возникает вопрос: как, используя эти модели, представить смешанный транспортный поток, в котором, кроме водителей-людей, присутствуют автопилоты? Достаточно ли изменить параметры модели или нужно создавать принципиально новую модель? Если реальный автопилот является, по сути, программой, можно ли его непосредственно использовать в пространстве модели? Но тогда какого производителя выбрать в качестве эталона?

Чтобы создать модель смешанного потока реального и автопилотируемого транспорта, рассмотрим, как к этому вопросу подходят другие исследователи. Не только непосредственно к смешанному потоку и управлению, но и к локальным проблемам управления и задачам, касающимся трафика. Полезно будет рассмотреть как легковые автомобили, так и другие виды наземного транспорта (рельсовый, грузовики), и летательные аппараты, поскольку стоящие перед ними задачи, хоть и имеют свою специфику, во многом похожи.

## Состояние проблемы

Обратимся к работам, в которых описано управление транспортом. Задача управления общественным транспортом с учетом неполной и недостоверной информации о ситуации, а также множественности вариантов управляющих воздействий и необходимости учета последствий от этих воздействий, может решаться с помощью СППР с продукционной базой знаний, где ситуация формализуется с использованием теории нечетких множеств [2] (2012). Конкретное управляющее воздействие выбирается ЛППР, при этом становится возможным объяснить процесс принятия решения на основе нечеткой сети типовых ситуаций. Прогнозирование реализации определенной ситуации не производится, а выбор предпочтительной ситуации, в которую будет осуществлен переход из текущей, производится согласно экспертным оценкам, хранящимся в БЗ.

Также на моделях ситуаций базируются принципы построения алгоритмов для Интеллектуальной системы управления движением городским внеуличным рельсовым транспортом [3] (2021). Сбои движения в метрополитене были разделены на 4 группы, для каждой из которых были разработаны эвристические алгоритмы преодоления сбоев, построенные на основе обобщения опыта экспертов. Результаты работы алгоритмов сравнивались с эталонным решением, полученным от полного перебора, а также подвергались экспертной оценке.

В монографии 2021 года [4] разработан теоретический аппарат принятия системных решений интеллектуального управления в экосистеме транспорта. При решении задачи перемещения партий грузов в транспортной системе применяется метод динамического программирования для упорядочивания и сокращения перебора возможных вариантов.

Задача перемещения партий грузов также является задачей планирования – поиска траектории, переводящей объект из начального состояния в конечное, в обход препятствия. Другие подходы к планированию маршрута включают метод на основе рекурсивного алгоритма итеративной кусочно-линейной аппроксимации с последовательным увеличением количества её отрезков до тех пор, пока все ограничения по обходу препятствия не будут выполнены [5] (2018), и эвристический алгоритм решения задачи коммивояжера для одного БПЛА и многих целей, расчет оптимальных маршрутов и количества необходимых БПЛА из заданного множества и перепланирование маршрутов при деградации группы [6] (2019).

В большинстве работ о смешанном транспортном потоке реальных и автопилотируемых автомобилей рассматриваются подключенные автономные автомобили, как в работе [7] (2021), ориентированной на программное обеспечение AIMSUN. Рассматриваются модели совместного/кооперативного адаптивного круиз-контроля (CACC) и смены полосы, основанные на моделях подключенных беспилотных автомобилей, и оценивается влияние параметров этих моделей на эффективность дорожного движения.

В работе [8] (2020) особо отмечается отсутствие единой методологии моделирования подключенных автопилотов. Поведение автопилотов, в отличие от человеческого, может быть, в принципе, известно априори. Но вероятное отсутствие в будущем алгоритмов автопилотов в открытом доступе и их чрезвычайная сложность требуют разработки модели транспортного потока с CAV. Рассматривается несколько моделей, реализующих CACC. Упоминается, что для моделирования поведения CAV часто используется IDM – интеллектуальная модель водителя (с некоторыми модификациями). Кроме нее, предложена модель Talebroug A. и Mahmassani H. S., над которой проведены эксперименты, показавшие, помимо прочего, что внедрение неподключенных беспилотников имеет «негативное влияние» на транспортный поток, в то время как внедрение CAV влияет положительно, причем тем лучше, чем больше процент внедрения.

Проблемы, возникающие при подключении к единой сети, хорошо представлены в работе [9] (2021), посвященной историческому обзору дронов в Европе и США и их интеграции в беспроводную сеть. Рассматриваются свойства возможных вариантов подключения: безопасность, надежность, скорость и др.

Меньше работ, в которых рассматривается смешанный поток реальных и автопилотируемых (но не подключенных) автомобилей. Например, в работе [10] (2016) изучается влияние внедрения AV на трафик и делается прогноз увеличения пропускной способности в 2 раза при переводе автопарка на полностью автономные автомобили. Временной интервал (время, за которое автомобиль преодолеет дистанцию до следующего транспортного средства в транспортном потоке) для автономных автомобилей взят как технически осуществимое и в то же время приемлемое с точки зрения участников дорожного движения значение, в результате беспилотники характеризуются значениями характеристик примерно в два раза лучшими, чем у человека. Правильность формул подтверждается соответствием результатов современным усредненным эмпирическим данным, собранным в Германии. Учитываются не только легковые автомобили, но и грузовики, и для процентного внедрения беспилотников используется формула, аналогичная расчету внедрения грузовиков. Помимо пропускной способности, выделяется стабильность как еще одна важная характеристика транспортного потока. С некоторого процента внедрения автор предлагает введение выделенных полос для беспилотников, чтобы их не замедляли водители-люди. Улучшения в потоке от внедрения автономных ТС происходят за счет: 1) сокращения интервалов; 2) увеличения скорости движения (но лишь при полном отсутствии людей). Для обеспе-

чения предсказуемости и комфорта пассажиров на перекрестках автор настаивает на необходимости подключения V2V и V2I.

В еще одной работе [11] (2020) проводится моделирование с использованием свободно распространяемого ПО – SUMO и его стандартной модели следования за лидером Краусса. В таблице 1 приведены параметры модели. Анализ результатов проводится с помощью фундаментальной диаграммы.

Таблица 1

*Parameters of the driver model used in SUMO simulations [11]*

	Mingap (m)	Accel (m/s <sup>2</sup> )	Decel (m/s <sup>2</sup> )	Emergency decel (m/s <sup>2</sup> )	Sigma	Time headway (s)
No automation	1.5	3.5	4.5	8	0.5	0.9
Full automation	0.5	3.8	4.5	8	0	0.6

В работе [12] (2022) авторами предложена микроскопическая модель смешанного транспортного потока, основанная на взаимодействии частиц с потенциалом действия, в которой для реальных автомобилей и беспилотников используется модель с одинаковыми параметрами, но для реальных водителей добавлены случайные возмущения и большая возможная скорость. Внедрение автономных ТС в транспортный поток приводит к большей стабильности, при этом пропускная способность уменьшается.

Модель смешанного транспортного потока должна включать модели водителей и автопилотов, поэтому стоит рассмотреть способы решения некоторых важных проблем, стоящих перед системой управления транспортным средством. Например, избежание столкновений в трехмерном пространстве.

В работе [13] (2020) и еще серии статей до нее авторы разрабатывают математическую модель избежания столкновения БПЛА в проекции на горизонтальную плоскость. Когда у 2 БПЛА траектории пересекаются, что подтверждается расчетами высоты и скорости, определяется ближайшая граница критической (ведущей к столкновению) скорости и требуемое для ее преодоления ускорение. Случай, при котором слетается не пара беспилотников, а больше, представлен в [14] (2020). Рассматривается один беспилотник и его поведение в зависимости от движения всех остальных. Автором дано разбиение пространства на зоны, для каждой из которых задано определенное последующее поведение рассматриваемого БПЛА, а также алгоритм распределения уровня угроз. Избегание столкновений осуществляется только посредством изменения скорости в пределах реальных границ ускорения.

С помощью нелинейной системы дифференциальных уравнений и алгоритмов в работе [15] (2011) решается задача избежания столкновений БПЛА, представленных материальными точками. Для двух БПЛА производится расчет относительной скорости, и задача сводится к поиску наикратчайшего пути обхода препятствия.

Полет, при котором БПЛА удерживает свое положение относительно других БПЛА с заданными значениями интервалов и дистанции, называется полетом строем, а совокупность положений БПЛА называется формацией. Для процедуры распределения БПЛА по заданной формации может использоваться критерий наименьшего суммарного перемещения [16] (2012). Если считать все БПЛА равнозначными и одинаковыми, то при решении задачи перестроения возможно определение оптимального по суммарному перемещению маршрута, при котором отсутствуют пересечения траекторий. В работе [17] (2017) предложен алгоритм перестроения без столкновений по внешней команде оператора для уменьшения объема проекции БПЛА на плоскость следящей камеры, с минимизацией длины маршрута перестроения. Безопасность перестроений, связанная с вероятностью столкновений, задается допустимыми значениями интервала и дистанции между аппаратами.

Задача управления роем заключается в избегании препятствий при перемещении роя до заданной цели. Часто ее решает оператор, который посылает команды не каждому устройству в рое, а одному или нескольким лидерам. Остальные БПЛА перемещаются, ориентируясь на ближайшего лидера. В процессе перемещения лидеры могут оказаться в далеких от центра роя позициях, поэтому может быть выгодно динамически менять лидеров [18] (2014).

Обычно для управления роем БПЛА с уклонением от препятствий используется метод искусственного потенциального поля, представленный в работе [19] (1986), где задача обхода препятствий была перенесена из высокоуровневого построения траектории на низкий оперативный уровень. Искус-

ственное потенциальное поле, описываемое в данной работе, состоит из точки притяжения на месте цели и точек отталкивания на месте препятствий. Этот метод в сочетании с векторами вращения [20] (2016) позволяет управлять роем БПЛА с лидером для сопровождения движущейся цели. Привлекательное потенциальное поле между лидером и целью побуждает лидера отслеживать цель, основываясь на их относительном положении. Другие БПЛА в строю следуют за лидером благодаря силе притяжения. Сила отталкивания, действующая между БПЛА, предотвращает столкновения и равномерно распределяет БПЛА на сферической поверхности, центром которой является лидер.

Сложность, обнаруживаемая в поведении роя насекомых или стаи птиц, отражает эмерджентные явления, возникающие в результате простых взаимодействий их членов. Для моделирования поведения птиц может использоваться модель, основанная на трех простых правилах [21] (2017): разделение (избегание столкновений с соседями), выравнивание (движение по направлению среднего направления соседей) и связность (движение к центру масс стаи). Модификации условий границ для разворота в замкнутом двумерном пространстве приводят в итоге к поведению, визуально похожему на поведение стаи птиц и близкому к экспериментальным данным. Есть множество коротких видео на YouTube с результатами моделирования.

Ориентирование БПЛА в лабиринте города рассматривается в работе [22] (2016), где приведены способ представления карты, сравнение алгоритмов автономного движения, модификация алгоритма поиска кратчайшего расстояния до цели и алгоритм решения задачи ориентирования.

Влияние отвлекающих факторов (гаджетов) на поведение водителей на дороге было рассмотрено в работе [23] (2021). Для этого в симуляторе были собраны данные о поведении реальных людей при наличии отвлекающих факторов. Результирующие коэффициенты использованы в качестве параметров микроскопических моделей транспортного потока в коммерческом ПО Transmodeler (использовались модель Гипсса и IDM).

Для прогнозирования объема трафика в работе [24] (2021) подбирается лучшая архитектура из следующих: радиальной базисной функции, персептрона, многослойного персептрона, адаптивного линейного нейрона и сверточной нейронной сети. При обучении на данных за несколько лет многослойный персептрон оказывается лучшим вариантом для прогнозирования объема трафика по часам, в зависимости от внешних условий.

Потребность в трафике (traffic demand) в транспортной сети – это количество автомобилей, проезжающих по каждому участку дороги и совершающих повороты на перекрестках. Для ее прогнозирования в работе [25] (2019) используется полносвязная нейронная сеть на 3 слоя, обученная классификации с учителем, которая показала 80 % точности. Было выделено 4 класса с потребностью в трафике от 0,1 до 0,4. Для обучения было сгенерировано 2,7 млн примеров, в которых на изолированный перекресток из независимых 4-х источников (с 4-х сторон) поступали автомобили.

## Обсуждение

Из рассмотренных выше работ были условно выделены классы подходов, для которых в таблице 2 отмечены решаемые задачи и ограничения.

Подключение автомобилей к единой сети решает многие проблемы восприятия, прогнозирования и планирования, которые сложно решить иначе при текущем уровне развития технологий. При этом реализация подключения всех транспортных средств к единой сети, которая может включать и элементы инфраструктуры, является технически сложной и дорогостоящей. В случае же выхода из строя устройств или сбоя, транспортные средства будут работать на основе данных со своих датчиков, что побуждает развивать управление, основанное, в первую очередь, на локальной системе восприятия.

Транспортный поток – это динамически изменяющийся, стохастический и нестационарный процесс, и создание точных моделей транспортных потоков является сложной и трудоемкой задачей. Хотя еще нет чисто математических или алгоритмических методов для ее полного решения, полученные в процессе разработок решения частных проблем крайне полезны. В том числе успехи динамического программирования.

Специально для борьбы со сложностью подобных систем были созданы нечеткий и ситуационный подходы, развивались методы искусственного интеллекта. Однако при использовании теории нечетких множеств, продукционной БЗ и ситуационного управления необходима предварительная формализация знаний экспертов, а появление новой ситуации требует расширения модели и дополнительной формализации этой ситуации. Методы искусственного интеллекта применяются для решения

Таблица 2

## Ограничения классов подходов к моделированию смешанного транспортного потока

Класс	Решаемые задачи	Ограничения
Подключение	Большое количество качественной информации об окружении	Технически сложная и дорогостоящая реализация. Возможность сбоев требует развития локальной системы восприятия
Интеллектуальный (эволюционные методы, ИНС)	Аппроксимация плотности транспортного потока, моделирование сложных агентных систем	Отсутствие строгих математических доказательств эффективности
Нечеткие множества	Формализация и количественное измерение качественных характеристик процессов	Необходима формализация знаний экспертов: предварительная и последующая при появлении новой ситуации
Динамическое программирование	Распределение корреспонденции для ориентирования и планирования маршрута	Отсутствие строгой методологии
Математический	Обобщенные модели транспортного потока (мезоскопические и макроскопические) и подзадачи построения траектории	Высокая сложность построения модели и ее последующей валидации
Алгоритмический	Подзадачи построения траектории и ориентирования	Высокая сложность разработки алгоритма и его последующего применения
Ситуационное управление	Выделение множества нежелательных ситуаций и способов их нейтрализации	Неизбежное появление новых ситуаций требует расширения системы. Экстраполяция и оценка производятся по правилам, основанным на знаниях экспертов
Микроскопические модели транспортного потока	Реалистичные модели транспортного потока водителей-людей	Для имитации поведения беспилотного транспорта требуются непрерывные модификации

частных задач прогнозирования макрохарактеристик, когда есть достаточно данных для обучения, или для управления движением БПЛА в рое. Хотя для летательных аппаратов используется множество моделей роя, полноценного решения задачи моделирования транспортного потока только методами искусственного интеллекта еще нет.

Существующие модели транспортного потока разрабатывались для имитации поведения человека, управляющего автомобилем, но не беспилотного транспорта. К настоящему времени было предложено множество модификаций классических моделей с целью добавить в них автономные автомобили, причем часто подключенные к единой сети. Результаты экспериментов с такими моделями противоречивы или несопоставимы, что можно объяснить отсутствием единых представлений о характеристиках и поведении автопилотов, а также способах оценки транспортного потока.

### Заключение

Можно сделать вывод о том, что одним из наиболее перспективных подходов к моделированию транспортных потоков является микроскопическая модель, подходящая для описания поведения реальных автомобилей. С дополнительными элементами для имитации поведения беспилотников она может описывать смешанный транспортный поток, как представлено в ряде работ, включая авторскую. Проверка адекватности подобной модели является сложной и нетривиальной задачей.

Математические модели и алгоритмы подойдут для решения задач оперативного и тактико-

го управления. В объединении с интеллектуальным подходом для реализации общего поведения системы на стратегическом уровне это позволит создать модель управления смоделированным смешанным транспортным потоком.

Задача построения модели смешанного транспортного потока полностью не решена. Существует множество подходов, в том числе авторских, для решения тех или иных частных сторон задачи. Разработка этих подходов углубляет наши знания об особенностях реализации смешанного транспортного потока и приближает к итоговому решению.

Окончательное решение задачи требует строгих критериев эффективности и универсальный набор критериев для оценки адекватности. Разработка критериев – одна из ключевых задач на ближайшее будущее.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Куржанский А. Б., Куржанский А. А., Варайя П. Роль макро моделирования в активном управлении транспортной сетью. *Труды МФТИ*. 2010;2:4(8):100–118. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-makromodelirovaniya-v-aktivnom-upravlenii-transportnoy-setyu>.
2. Кригер Л. С. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении движением общественного транспорта. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2012;2:150–155. EDN: PAJWZX. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17839437>.
3. Баранов Л. А., Балакина Е. П., Сидоренко В. Г. Безопасное диспетчерское управление в условиях использования интеллектуальных беспилотных систем управления движением городского внеуличного транспорта. *Проблемы управления безопасностью сложных систем : Материалы XXIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 года*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. С. 329–336. DOI: 10.25728/iccsc.2021.63.40.051. EDN: LUEHUG. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47534022>.
4. Субботин Б. С. и др. *Теоретические и концептуальные представления о взаимодействии человека с системами искусственного интеллекта в транспортной экосистеме*. Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ); 2021. 146 с. ISBN: 978-5-7962-0284-5. EDN: ZTJNZM. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47696343>.
5. Антонов В. О., Гурчинский М. М., Петренко В. И., Тебуева Ф. Б. Метод планирования траектории движения точки в пространстве с препятствием на основе итеративной кусочно-линейной аппроксимации. *Системы управления, связи и безопасности*. 2018;1:168–182. Режим доступа: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-01/09-Antonov.pdf>.
6. Максимов Н. А. Модель планирования группового полета и взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях деградации группы. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019;6:24–29. EDN: LVTBNQ. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41114714>.
7. Mohmmadsina S. Microscopic Simulation Analysis of Connected and Autonomous Cars and Trucks at a Freeway Merge Area. *Electronic Theses and Dissertations*. 2021. Режим доступа: <https://scholar.uwindsor.ca/etd/8613>.
8. Gora P., Katrakazas C., Drabicki A., Islam F., Ostaszewski P. Microscopic Traffic Simulation Models for Connected and Automated Vehicles (CAVs) – State-of-the-art. *Procedia Computer Science*. 2020;170:474–481. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.091.
9. Milicevic Z. M., Vojkovic Z. S. From the Early Days of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to Their Integration into Wireless Networks. *Military Technical Courier*. 2021;69:4:941–962. DOI: 10.5937/vojtehg69-33571.
10. Friedrich V. The Effect of Autonomous Vehicles on Traffic. *Autonomous Driving*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2016:317–334. DOI: 10.1007/978-3-662-48847-8\_16.
11. Lu Q., Tettamanti T., Hörcher D., Varga I. The Impact of Autonomous Vehicles on Urban Traffic Network Capacity: an Experimental Analysis by Microscopic Traffic Simulation. *Transportation Letters*. 2020;12(8):540–549. DOI: 10.1080/19427867.2019.1662561.
12. Бобровская О. П., Гавриленко Т. В., Галкин В. А. Модель транспортного потока, основанная на взаимодействии частиц с потенциалом действия. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2022;40:3:72–87. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-72-87.

13. Бердонос В. Д., Журавлёв Д. О. Математическая модель взаимного движения беспилотных летательных аппаратов. *Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами: электрон. науч. журн.* 2020;3(8):11–21. DOI: 10.26731/2658-3704.2020.3(8).11-21.
14. Журавлев Д. О. Разработка и реализация алгоритмов предотвращения столкновения беспилотных летательных аппаратов, находящихся в едином воздушном пространстве. *Молодые ученые – Хабаровскому краю : Материалы XXII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 14–20 января 2020 года.* Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. 2020:106–112. EDN: LHUQVO. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42914355>.
15. Kvetny R., Borshchova I. Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Aerial Vehicles. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University.* 2011;1:9. EDN: PYXDNV. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18959470>.
16. Дьяченко А. А. Задача формирования строя в группе БПЛА. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2012;3. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/zadacha-formirovaniya-stroya-v-gruppe-bpla>.
17. Михайлов Н. А. Разработка алгоритма перестроения группы беспилотных летательных аппаратов для уменьшения заметности. *Труды МАИ.* 2017;96:22. EDN: ZWUHIN.
18. Walker P., Amraii S., Chakraborty N., Lewis M., Sycara K. Human Control of Robot Swarms with Dynamic Leaders. *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA.* 2014:1108–1113. DOI: 10.1109/IROS.2014.6942696.
19. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *Int J Robot Res.* 1986;5(1):90–98. Режим доступа: [https://khatib.stanford.edu/publications/pdfs/Khatib\\_1986\\_IJRR.pdf](https://khatib.stanford.edu/publications/pdfs/Khatib_1986_IJRR.pdf).
20. Chang K., Xia Y., Huang K. UAV Formation Control Design with Obstacle Avoidance in Dynamic Three-Dimensional Environment. *SpringerPlus.* 2016;5:1124. Режим доступа: <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2476-y>.
21. Brown G. *Beyond Phase Transitions: an Algorithmic Approach to Flocking Behavior.* Department of Physics and Astronomy, Brigham Young University. 2017.78 p.
22. Михайлов И. И., Кухтяева В. Р. Разработка алгоритма автономного движения беспилотного летательного аппарата. *Микроэлектроника и информатика – 2016 : Материалы научно-технической конференции, Зеленоград, 20–22 апреля 2016 года.* Зеленоград: Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники». 2016:104–108. EDN: WBXUXP. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26226563>.
23. Zatemeh-Kanj S., Toledo T. Car Following and Microscopic Traffic Simulation Under Distracted Driving. *Transp. Res. Rec.* 2021;2675(8):643–656. DOI: 10.1177/03611981211000357.
24. Хуссейн А. Х. С., Заргарян Е. В., Заргарян Ю. А. Модель прогнозирования транспортного потока на основе нейронных сетей для предсказания трафика на дорогах. *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2021;6(223):124–132. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-6-124-132.
25. Төлеби Г., Курманходжаев Д. Прогнозирование потока транспортных средств на основе офлайн обученной искусственной нейронной сети. *Вестник Казахстано-Британского технического университета.* 2019;16(2):170–174. Режим доступа: <https://vestnik.kbtu.edu.kz/jour/article/view/140>.