

Научная статья
УДК 656.025.4:004.8
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>
EDN: VLMXXD



СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.М. Жданова^{1,2} ✉, А.В. Старостенко^{3,4}, Д.А. Царев^{1,2}

¹АО «СТАР-Проект»,

г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),

г. Санкт-Петербург, Россия

³АО ПО «РосДорСтрой»,

г. Валдай, Россия

⁴Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор

anastasiiazhdanova22@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи со стремительным развитием высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) становится всё более актуальным вопрос адаптации существующей дорожной инфраструктуры для обеспечения их бесперебойной и безопасной работы. Кольцевые пересечения, благодаря своей способности сокращать количество потенциальных аварийных ситуаций и повышать общую безопасность по сравнению с обычными перекрёстками, рассматриваются как вариант повышения безопасности дорожного движения, однако не являются существенными в плане повышения пропускной способности и оптимизации движения.

Материалы и методы. Данная работа посвящена сравнительной оценке эффективности использования ВАТС на кольцевых пересечениях. В статье рассматриваются достоинства ВАТС, их воздействие на транспортный поток и анализируются результаты моделирования на микро- мезоуровне с помощью программного обеспечения SUMO, демонстрируется влияние различных конфигураций кольцевых пересечений на движение в потоке пилотируемых и беспилотных транспортных средств.

Результаты. Результаты моделирования показали, что применение кольцевых пересечений для движения чистого потока ВАТС неэффективно. Несмотря на то, что кольцевые пересечения позиционируются как способ повышения безопасности дорожного движения за счет исключения конфликтных точек пересечения и замены их на точки переплетения, алгоритмический проезд перекрёстков ВАТС не предполагает возникновения опасных ситуаций, так как конфликты решаются заранее. Наиболее важным фактором для увеличения пропускной способности ВАТС на перекрестке является ширина дорожного полотна. На данный момент точные количественные показатели влияния ширины дорожного полотна на пропускную способность ВАТС не установлены, однако можно выделить такие важные аспекты, как возможность равномерного движения потока без остановок, характерных для пилотируемых автомобилей, и, как следствие, более плотное движение колонн ВАТС.

Обсуждение и заключение. Полученные в рамках исследования выводы могут служить основой для оптимизации существующей транспортной инфраструктуры и формирования рекомендаций по созданию перекрёстков, приспособленных к условиям автономного движения, а также для дальнейших исследований, направленных на повышение пропускной способности различных видов пересечений дорог в условиях высокой автоматизации транспортного потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: организация дорожного движения, кольцевые пересечения, высокоавтоматизированные транспортные средства, транспортные потоки, безопасность дорожного движения, транспортное моделирование

Статья поступила в редакцию 20.06.2025; одобрена после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

© Жданова А.М., Старостенко А.В., Царев Д.А., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Жданова А.М., Старостенко А.В., Царев Д.А. Сравнительное исследование эффективности кольцевых пересечений для высокоавтоматизированных транспортных средств // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, №. 4. С. 578-589. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

EDN: VLMXXD

COMPARATIVE RESEARCH INTO ROUNDABOUT PERFORMANCE FOR HIGHLY AUTOMATED VEHICLES

Anastasia M. Zhdanova^{1,2} ✉, Andrey V. Starostenko^{3,4}, Danil A. Tsarev^{1,2}

¹STAR-Project JSC,

St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU),

St. Petersburg, Russia

³JSC "PO RosDorStroy",

Valdai, Russia

⁴Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),

Moscow, Russia

✉ corresponding author

anastasiiazhdanova22@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. With the rapid development of highly automated vehicles (HAVs), the issue of adapting existing road infrastructure to ensure their uninterrupted and safe operation is becoming increasingly relevant. Roundabouts, due to their ability to reduce the number of potential conflict points and improve overall safety compared to conventional intersections, are considered as a means of enhancing road safety. However, they are not significantly effective in terms of increasing capacity and optimizing traffic flow.

Materials and Methods. This study is dedicated to a comparative assessment of the efficiency of HAVs on roundabouts. The paper examines the advantages of HAVs, their impact on traffic flow, and analyzes simulation results at the micro (or meso-) level using SUMO software. It demonstrates the influence of different roundabout configurations on the movement of both manually driven and autonomous vehicles within traffic streams.

Results. Simulation results have shown that the use of roundabouts for pure HAV traffic flow is inefficient. Although roundabouts are promoted as a way to improve road safety by replacing conflict points with weaving zones, the algorithmic navigation of HAVs on intersections inherently prevents hazardous situations, as conflicts are resolved in advance. The most critical factor for increasing the throughput of HAVs at intersections is the width of the roadway. At present, no precise quantitative indicators to demonstrate the road width impact on HAVs capacity have been established, however, it is possible to highlight such important aspects as the possibility of uniform traffic flow, typical for piloted vehicles, and, hence, higher volume of HAV traffic flow.

Discussion and Conclusion. The findings of this study can serve as a foundation for optimizing existing transportation infrastructure and developing recommendations for designing intersections adapted to autonomous traffic conditions. They also provide a basis for further research aimed at increasing the capacity of various types of road intersections under high levels of traffic automation.

KEYWORDS: traffic management, roundabout junctions, highly automated vehicles, traffic flows, traffic safety, transport modeling

The article was submitted: June 26, 2025; approved after reviewing: July 21, 2025; accepted for publication: August 22, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Zhdanova A.M., Starostenko A.V., Tsarev D.A. Comparative research into roundabout performance for highly automated vehicles. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 578-589. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-578-589>

© Zhdanova A.M., Starostenko A.V., Tsarev D.A., 2025



Content is available under the license

Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы стали свидетелями стремительного прогресса в области высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС), что кардинально меняет наше представление о дорожном движении и структуре транспортной инфраструктуры. ВАТС обладают огромным потенциалом для повышения безопасности, оптимизации работы и увеличения пропускной способности транспортных сетей за счет сокращения времени отклика, более совершенного восприятия дорожной обстановки и возможности согласованного движения [1]. Вследствие этого возникает необходимость в адаптации существующих элементов дорожной инфраструктуры для максимально плодотворной интеграции ВАТС в транспортную сеть.

Внедрение беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования является закономерным этапом развития современных интеллектуальных транспортных систем и преследует следующие цели¹:

- повышение безопасности дорожного движения;
- повышение номинальной пропускной способности дорог;
- оптимизация транспортных процессов;
- формирование заданного поведения участников дорожного движения и культуры вождения;
- развитие различных сервисных услуг для пользователей транспортной системы;
- поддержание заданного уровня содержания дорожного полотна и дорожно-транспортной инфраструктуры.

Кольцевые пересечения, благодаря своей способности минимизировать конфликтные ситуации и повышать безопасность по сравнению с обычными перекрёстками, всё чаще рассматриваются как перспективный компонент инфраструктуры для автономных транспортных систем. Однако влияние таких пересечений на манеру движения ВАТС и их эффективность в условиях смешанных потоков движения требует более глубокого изучения. Текущие исследования в основном посвя-

щены традиционному транспорту и не берут во внимание уникальные аспекты функционирования автоматизированных систем управления².

В данном исследовании проводится сравнительная оценка эффективности кольцевых пересечений с использованием ВАТС. В центре внимания находятся ключевые параметры, включая пропускную способность, время ожидания, безопасность и устойчивость транспортного потока. Работа направлена на выявление как преимуществ, так и потенциальных ограничений кольцевых пересечений в условиях увеличения доли высокоавтоматизированных транспортных средств, а также на разработку рекомендаций для проектирования и обновления транспортной инфраструктуры в будущем.

Автомобили, относящиеся к четвертым и пятым уровням автономности по SAE (Society of Automotive Engineers – американская ассоциация автомобильных инженеров), обладают высокой степенью автоматизации и способны передвигаться без водителя в большинстве, а то и во всех дорожных ситуациях. Основанные на компьютерном зрении, лидарах, радарх, высокоточных картах и алгоритмах искусственного интеллекта, эти технологии выступают как ключевой фактор в реформировании современной транспортной индустрии.

Важнейшим достоинством систем ВАТС является их способность повышать безопасность на дорогах. По данным NHTSA, более 90% аварий на дорогах вызваны человеческим фактором, например, усталостью, рассеянностью или ошибками в принятии решений. Благодаря своей высокой скорости обработки данных, непрерывному мониторингу дорожной ситуации и отсутствию эмоциональных и физиологических факторов, высокоавтоматизированные транспортные средства могут значительно уменьшить количество аварий [2].

ВАТС также выгодно отличаются способностью повышать пропускную способность, а одна из основных целей их внедрения – снижение дорожных заторов: согласно экспериментам по внедрению ВАТС в транспортный поток наличие даже 5% беспилотных автомо-

¹ Распоряжение Правительства РФ от 25.03.2020 № 724-р «Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования» // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <https://pravo.gov.ru/>

² Никитин Н.А., Савина Ю.Э. Анализ эффективности различных конфигураций кольцевых пересечений при проектировании выезда из нового жилого района // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международной научно-практической конференции (20 мая 2020 года). 2020. С. 127–135.

билей в потоке способно увеличить пропускную способность на 14,1% [3].

Автоматизированные транспортные средства могут передвигаться с более короткими интервалами, оперативно реагировать на изменения дорожной обстановки и поддерживать оптимальную скорость, что в итоге приводит к более эффективному использованию дорожной инфраструктуры. В рамках кооперативных транспортных систем, где несколько автомобилей (ВАТС) обмениваются данными в режиме реального времени (V2V и V2X-коммуникации), возникает возможность создания так называемых «потоков-поездов» (platooning), что, в свою очередь, способствует еще большей стабильности и плавности движения транспорта [4].

Для успокоения дорожного движения и минимизации последствий аварий с участием реальных водителей используют кольцевые пересечения. Эффективность кругового движения обусловлена тем, что конфликтные точки, характерные для традиционных перекрестков, где встречаются потоки из разных направлений, устраняются, оставляя лишь столкновения при слиянии или разделении потоков. Кольцевая форма пересечения заставляет водителей снизить скорость до 50% при проезде (в зависимости от радиуса островка), что также способствует повышению безопасности [5].

Важно отметить, что круговое движение не всегда является самым эффективным решением, поскольку пропускная способность дорог может быть ограничена, в частности, когда интенсивность движения на прилегающих дорогах максимально загружена³. В реальности, организация кольцевого перекрестка может быть весьма дорогостоящей. При выборе между светофорным регулированием и круговым движением последний вариант часто отбрасывается из-за ограничений, накладываемых пространственными условиями улично-дорожной сети, и предпочтение отдается светофорному регулированию [6, 7].

В условиях стремительного развития ВАТС становится всё более актуальным вопрос о влиянии кольцевых пересечений на работу ВАТС и общую эффективность движения на дорогах со смешанным потоком (где ездят и беспилотные, и управляемые человеком ма-

шины). Эти условия добавляют сложность, поскольку требуют прогнозирования и учета человеческого фактора, а также обеспечения безопасного и согласованного взаимодействия между разными типами участников дорожного движения.

По мере увеличения доли автономных транспортных систем (ВАТС) в общем потоке транспортных средств всё большее внимание уделяется моделированию их функционирования в условиях реального дорожного движения. Исследования показывают, что ВАТС обладают способностью поддерживать более короткие интервалы движения, сохранять стабильность потока и минимизировать вероятность резких маневров за счет высокой скорости обработки данных и использования согласованных алгоритмов управления [8, 9].

Беспилотные транспортные средства принимают решения, руководствуясь четкими правилами безопасности, что делает их действия более предсказуемыми. Однако эта повышенная предсказуемость может привести к излишней осторожности, особенно в нестандартных ситуациях, например, на кольцевых развязках [10]. Взаимодействие ВАТС с водителями традиционных транспортных средств, не обладающих высокой дисциплиной, может негативно сказаться на пропускной способности и привести к задержкам в смешанных потоках.

Также стоит отметить, что внедрение ВАТС требует пересмотра подхода к проектированию дорожной инфраструктуры, поскольку автоматизированные транспортные средства обладают уникальными особенностями восприятия, реакций принятия решений [11]. При значительном количестве ВАТС на дорогах эффективность перекрестков может быть существенно повышена за счет синхронизации движения и V2V-коммуникации [12].

Заслуживают особого внимания работы, фокусирующиеся на моделировании функционирования ВАТС на перекрестках и кольцевых развязках без светофоров [13]. Авторы этих исследований предлагают новые концепции управления движением, основанные на распределённых системах приоритетов и взаимодействии транспортных средств в динамике, что может в будущем сделать ненужными традиционные правила предоставления преимущества движения.

³ Никитин Н.А., Савина Ю.Э. Анализ эффективности различных конфигураций кольцевых пересечений при проектировании выезда из нового жилого района // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международной научно-практической конференции (20 мая 2020 года). 2020. С. 127–135.

Ситуации смешанных потоков, где одновременно присутствуют как автономные беспилотные транспортные системы (ВАТС), так и автомобили с водителем, представляют собой сегодня самую сложную задачу для моделирования и практического исследования. В научных работах отмечается, что эффективность и безопасность в таких условиях тесно связана с долей ВАТС в транспортном потоке [14, 15]. В случае малой и средней доли ВАТС наблюдается неоднозначный эффект: с одной стороны, они приносят предсказуемость и плавность в движение, с другой – их традиционный подход может стать причиной задержек и удлинения времени проезда перекрестков.

Несмотря на множество исследований, посвящённых работе ВАТС на пересечениях, сравнительная оценка эффективности кругового движения в разных ситуациях (классический поток, смешанный поток, преобладающий поток ВАТС) по-прежнему требует более глубокого изучения. Отсутствует согласованная методика для количественной оценки преимуществ и недостатков кольцевых пересечений с применением систем ВАТС, учитывающая реальные действия водителей и многоаспектное влияние инфраструктурных и поведенческих факторов. Такой пробел подчеркивает необходимость комплексного сравнительного исследования, которое позволит устранить существующие неточности и разработать рекомендации по проектированию дорожной инфраструктуры с учетом будущей интеграции ВАТС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках исследования было рассмотрено пересечение ул. Свердлова, ул. Дружбы и Октябрьского пр-та в г. Кирове, представляющего собой Y-образное пересечение (рисунок 1).

Данный перекресток является нерегулируемым, однако обладает достаточной площадью для внедрения на ней различных видов организации дорожного движения. Стоит отметить, что существующую ситуацию ОДД можно описать как «хаотичную»: главная дорога проходит по Октябрьскому проспекту, для проезда налево с ул. Дружбы на ул. Свердлова и в обратную сторону водителям необходимо преодолеть достаточно большое пространство, при этом уступив дорогу главному направлению. Данную организацию дорожного движения можно охарактеризовать как небезопасную, так как на ней присутствует большое количество конфликтных точек, а неопытный водитель может растеряться при проезде данного пересечения.

С целью получения информации о составе потока ТС на исследуемом участке несколько раз была проведена фиксация количества и состава потока на пересечении. Полученные результаты были обработаны для получения средних статистических данных. Итоговое значение количества ТС на пересечении – 1516 ед., из которых 1261 ед. – легковые (80%), автобусов малой и большой вместимости – 117 ед. (7%), оставшееся – разной вместимости грузовые автомобили. Для приведения разнородного состава транспортного потока к легковому автомобилю были использованы коэффициенты приведения СП 34.13330.2021. Итоговое значение пиковой интенсивности в приведённых автомобилях – 1723 прив. авт/ч. Данное число является средним по нескольким измерениям пиковой интенсивности, в связи с чем любая конфигурация перекрестка справляется с данной нагрузкой. Отклонение от максимальной зафиксированной интенсивности в 1789 прив. авт/ч – 3,8%, от минимальной в 1657 прив. авт/ч – 4,0 %.

Для упорядочивания движения автомобилей было рассмотрено несколько вариантов организации дорожного движения:

- регулируемое пересечение (внедрение светофорного регулирования);
- кольцевое нерегулируемое пересечение;
- кольцевое регулируемое пересечение.

Основной ход – движение по Октябрьскому проспекту, второстепенный – движение по ул. Свердлова и ул. Дружбы. На кольцевом пересечении допуск к проезду кольцевого пересечения определяется с такой же приоритетностью. Для регулируемого X-образного и кольцевого пересечения были внедрены оптимальные светофорные фазы. Они были рассчитаны, исходя из интенсивностей движения, и оптимизированы инструментами программного обеспечения SUMO, пакета для моделирования мультимодального движения с открытым исходным кодом, предназначенным для работы с большими сетями. SUMO находится в свободном доступе с открытым исходным кодом с 2001 г.

Исходя из представленных данных, скорость проезда X-образного нерегулируемого пересечения считается наибольшей и значительно уменьшается при внедрении светофорного регулирования. Так как основной задачей является эффективное использование площади перекрестка, то наиболее оптимальным из четырех представленных вариантов будет кольцевое нерегулируемое пересечение.

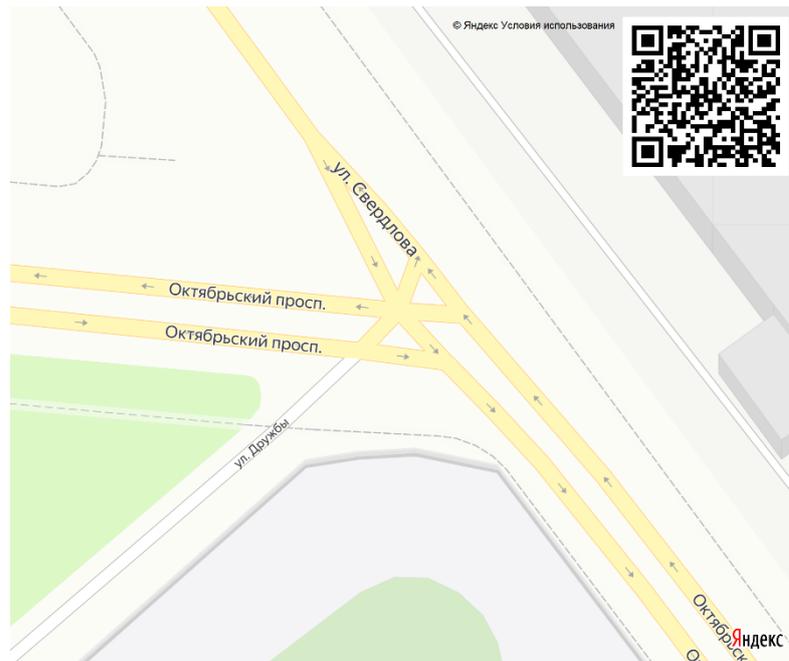


Рисунок 1 – Дорожно-транспортная ситуация на перекрестке Октябрьский пр-т – ул. Свердлова – ул. Дружбы
 Источник: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 21.04.2025).

Figure 1 – Traffic situation at the intersection of Oktyabrskiy Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street
 Source: <https://yandex.ru/maps> (assessed: 21.04.2025).

Важным фактором в безопасной организации дорожного движения является тяжесть последствий ДТП. При внедрении кольцевой ОДД скорость снизится на 25% до 35,4 км/ч, следовательно, возможные столкновения будут носить низкую тяжесть последствий. Более того, опасность перекрестка снижается на 25% при подсчете конфликтных точек слияния, разделения, пересечения и переплетения и умножении их на необходимые коэффициенты.

Количество остановок на кольцевом нерегулируемом пересечении больше, чем на нерегулируемом Х-образном, однако значительно меньше, чем на двух вариантах регулируемых перекрестков. Так как кольцевая проезжая часть является главной, входящие потоки должны уступить движущимся по кругу транспортным средствам, в связи с чем и объясняется рост количества остановок на кольцевой ОДД. Водители для въезда на кольцо подбирают наилучший момент, однако здесь влияние оказывает человеческий фактор – некоторые водители могут принять решение выехать чуть позже, чем планировали, так как не рассчитали изначальный маневр.

По показателям среднего времени простоя и времени задержки, как и в предыдущих случаях, наиболее эффективным считается самый простой Х-образный нерегулируемый перекресток, однако в абсолютных значениях время задержки на кольцевом нерегулируемом пересечении составляет всего 10 сек, а у Х-образного – 4 сек. Данный факт объясняется тем, что движение машины по прямой занимает меньше времени, чем движение по дуге при кольцевой организации движения. Время простоя также растет, что объясняется необходимостью машин на въездах уступить дорогу движущимся по кольцу автомобилям, как и в случае с ростом количества остановок.

Таким образом, несмотря на эффективность существующего Х-образного пересечения по всем показателям целесообразнее внедрение кольцевой ОДД, так как уменьшение количества параметров не так значительно, как при внедрении светофорного регулирования, а потоки движутся более структурированно: количество конфликтных точек снижается вместе с тяжестью ДТП, а следовательно, безопасность дорожного движения на данном участке повысится при отсутствии в потоке высокоавтоматизированных транспортных средств.

Моделирование динамики высокоавтоматизированных транспортных средств (ВАТС) представляет собой комплексную задачу, требующую применения методов математического анализа и теории системного моделирования. Основная цель – разработка адекватной математической абстракции реального движения с учетом ограничений, накладываемых аппаратными возможностями ВАТС и характеристиками дорожной среды.

Существующие модели дорожного движения можно условно разделить на модели макро-, мезо- и микроуровня. Для ВАТС микроскопический или мезоскопический уровни предпочтительнее, так как они позволяют учитывать возможности координации и оптимизации движения.

В основе большинства микромоделей лежит кинематическое описание движения, определяемое дифференциальными уравнениями, связывающими положение ТС в пространстве с линейной и угловой скоростью. Для упрощения анализа часто используется плоская модель, ограничивающая движение двумя координатами. В этом случае динамика описывается системой уравнений (1):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cdot \cos(\theta) \\ \frac{dy}{dt} = v \cdot \sin(\theta), \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

где θ – угол ориентации транспортного средства;

ω – угловая скорость, рад/с;

v – линейная скорость, м/с;

x, y – координаты на плоскости.

Скорость определяется как текущая (current speed) и желаемая (desired speed). ТС стремится к движению с желаемой скоростью в небольшом нормальном диапазоне от среднего его значения и применяет различную величину ускорения, заданного как эталонное максимальное для конкретного вида транспортного средства. Ускорение как линейное, так и угловое задается как функция управления (2):

$$a = f(v_d - v_c), \quad (2)$$

где v_d – желаемая скорость;

v_c – текущая скорость, м/с;

$f(v_d - v_c)$ – функция управления ускорением, например, пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, м/с².

Динамическое поведение добавляется через уравнения, учитывающие силы и моменты, действующие на ВАТС. С упрощенной точки зрения чистый поток ВАТС подчиняется модели следования за автомобилем и учитывает желаемую скорость, безопасное расстояние и время реакции. Особенность ВАТС заключается в низком времени реакции, связанном с возможностью быстрого обмена данными между участниками дорожного движения.

Приёмом автомоделной редукции возможен переход от микромоделей к макромоделей, если представить поток транспортных средств как связанный друг с другом пружинами заданной жёсткости ряд шариков, где движение одного крайнего шарика приводит к движению всего ряда с разными силами, подчиняющимися законам механики [16, 17]. Схематично такое представление приведено на рисунке 2, а уравнение относительного удлинения элемента (продольная деформация) принимает вид (3):

$$\frac{d\xi}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\xi(x+\Delta x) - \xi(x)}{\Delta x}, \quad (3)$$

ξ – относительная продольная деформация, м;
 x – расстояние безопасности, м;
 $x+\Delta x$ – скорректированное расстояние безопасности, м;

$\xi(x+\Delta x) - \xi(x)$ – величина растяжения расстояния, м.

Решив данное уравнение, возможно определить расстояние между транспортными средствами при изменении скорости и положения первого в ряде автомобиля.

Сложности возникают при моделировании пересечения нескольких чистых рядов ВАТС, так как потоки должны предоставлять интервалы в движении для выполнения маневров других, пересекаемых потоков. На практике готовых моделей для проведения таких расчётов нет.

Однако возможен вариант с проведением имитационного моделирования движения ВАТС, где точное местоположение ТС не рассчитывается аналитическим путём, а исходит из выполнения итерационных расчётов оперативно при возникновении необходимости.



Рисунок 2 – Представление потока ВАТС в виде механической системы [16]

Figure 2 – Representation of the HAV flow as a mechanical system [16]

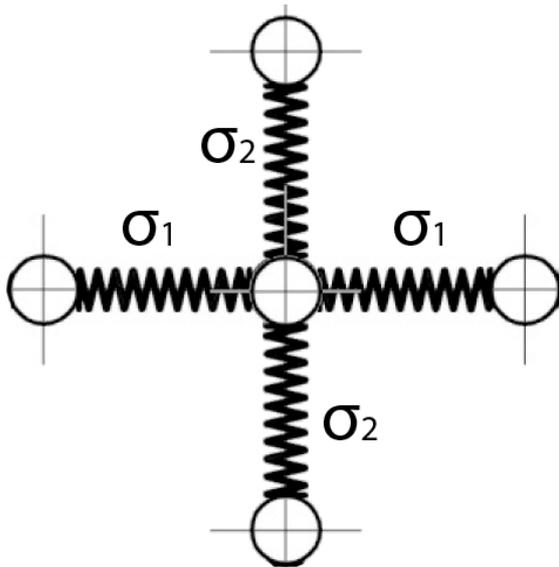


Рисунок 3 – Представление пересечения двух рядов ВАТС в виде механической системы
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Representation of the intersection of two rows of HAV as a mechanical system
Source: compiled by the authors.

В имитационных моделях заданы желаемые скорости и ускорения ТС, расстояния видимости, или, в случае ВАТС, связи между участниками движения, и, соответственно, принимаемые меры по решению конфликтов. ВАТС следует обмениваться информацией с двумя другими ТС, между которыми необходимо выполнение маневра на пересечении и двумя в собственном потоке. Тогда систему можно описать с механической точки зрения как крест тех же шаров, где перпендикулярные связи различаются силой воздействия, однако движение шаров одного ряда не приводит к движению другого. Диагональные шары в

ходе следования также связаны силами, действующими при их последующем пересечении траекторий. Условно схема взаимодействия приведена на рисунке 3. При одинаковых желаемых скоростях рядов $\sigma_1 = \sigma_2$.

Подобные случаи, однако, не могут полноценно быть описаны механическими законами ввиду «непрочной» связи пересекающихся потоков. Но при идентичных скоростях могут быть смоделированы имитационно.

Рассмотрим исследованное ранее пересечение и изменим состав транспортного потока на чистые потоки ВАТС с желаемой скоростью 60 км/ч. Для такого потока безопасная дистанция рассчитывается по формуле (4):

$$d_{\min} = L + T_f [v_r - v_f + p \cdot (a_a + a_b)] - \frac{p^2 a_b}{2} + \frac{(T_r - T_f)(v_r + p a_a - (T_f - p) a_b)}{2}, \quad (4)$$

где L – средняя длина автомобиля;

p – время отклика заднего автомобиля (для ВАТС $p = 0$), с;

v_r, v_f – скорость заднего и переднего автомобиля, м/с;

a_a, a_b – максимальное ускорение (торможение) автомобилей, м/с²;

T_f – время остановки переднего автомобиля при максимальном торможении, с;

T_r – время остановки переднего автомобиля при максимальном ускорении во время отклика и максимальном торможении после, с.

Так как время реакции для ВАТС равно нулю, а скорости и ускорения между автомобилями идентичны, уравнение принимает упрощенный вид (5):

$$d_{\min} = L. \quad (5)$$

Таблица

Параметры эффективности схем ОДД на пересечении Октябрьский пр-т – ул. Свердлова – ул. Дружбы
Источник: составлено авторами.

Table

Efficiency parameters of traffic management schemes at the intersection
of Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street
Source: compiled by the authors.

N п/п	Вид пересечения	Время задержки, с	Скорость средняя, км/ч	Среднее время простоя, с	Общее кол-во остановок	Оценка безопасности перекрестка по конфликтным точкам/по светофорным циклам
1	Х-образный (нерегулируемый) - существующий	4,0	47,3	0,5	248	112
2	Х-образный (регулируемый)	31,7 (+793%)	20,4 (-56%)	22,2 (+4440%)	1194 (+481%)	112/40 (-64%)
3	Кольцевое (нерегулируемый)	10,0 (+250%)	35,4 (-25%)	0,7 (+140%)	477 (+192%)	84 (-25%)
4	Кольцевое (регулируемый)	39,1 (+978%)	18,1 (-61%)	21,4 (+4280%)	1867 (+753%)	84/66 (-41%)
5	ВАТС Х-образный (нерегулируемый)	0,4 (-90%)	57,5 (+22%)	0,0 (-100%)	2 (-99%)	112 (-0%)
6	ВАТС Кольцевое (нерегулируемый)	7,1 (+77%)	51,3 (+8%)	0,0 (-100%)	5 (-99%)	84 (-25%)

При имитации движения по перекрёстку «Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы» потоков ВАТС полученные результаты приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнивая результаты применения кольцевой организации дорожного движения с Х-образным на пересечениях, наблюдается среднее уменьшение скорости движения ВАТС на 6,2 км/ч, незначительное увеличение времени задержки на 6,7 сек и увеличение общего количества остановок на 3 ед. Параметры данного конкретного примера связаны с геометрическими параметрами дороги, а именно с близостью расположения съездов на ул. Дружбы, ул. Свердлова и западным направлением Октябрьского проспекта. Уменьшение скорости связано с необходимостью выполнения большего числа маневров ВАТС, что приводит к более частому алгоритму просчёта изменения движения всей цепочки.

При сравнении результатов моделирования потока ВАТС и пилотируемых ТС наблюдается значительное увеличение средней скорости на 10,2 км/ч для Х-образного и 15,9 км/ч для кольцевого пересечения, снижение времени задержки на 3,6 сек и 32,0 сек соответственно.

С точки зрения безопасности сравнение ВАТС с пилотируемыми ТС не представляется возможным ввиду природы управления системой потока беспилотных ТС.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам симуляции возможно сделать вывод, что использование кольцевых пересечений для движения чистого потока ВАТС не представляется эффективным. Кольцевые пересечения предполагают повышение безопасности дорожного движения за счёт устранения точек пересечения и заменой их на точки переплетения, однако для алгоритмического проезда перекрёстков ВАТС конфликты решаются заранее и не являются опасными.

Сравнение итоговых параметров эффективности для пилотируемых ТС и ВАТС приведено на рисунках 4 и 5.

Пиковая интенсивность для пилотируемых ТС в 2 750 прив. авт/ч на Х-образном пересечении приводит к возникновению заторов, в то время как при движении ВАТС поток стабилен и способен пропускать до 5 650 прив. авт/ч со сравнимой с комфортными условиями скоростью. Наиболее важным фактором для увеличения пропускной способности ВАТС на перекрестке является ширина дорожного полотна.

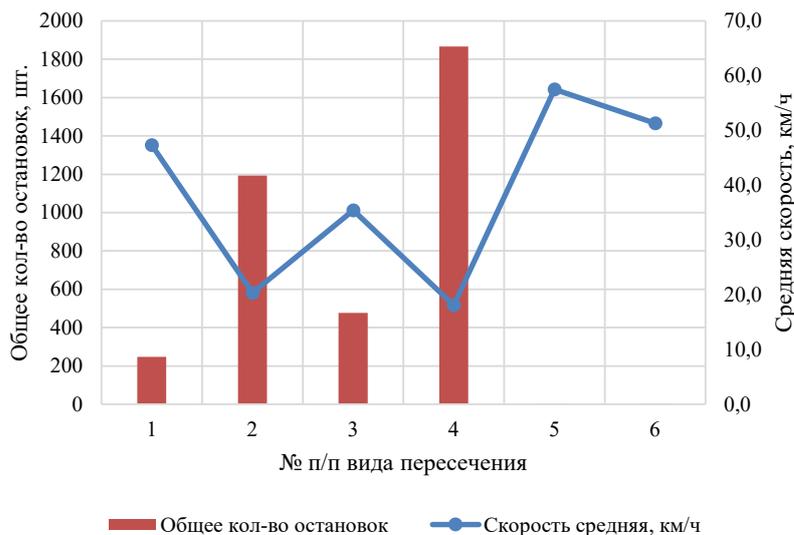


Рисунок 4 – Общее количество остановок и средняя скорость проезда перекрестка Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Total number of stops and average speed of traffic at the Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street intersection
 Source: compiled by the authors.

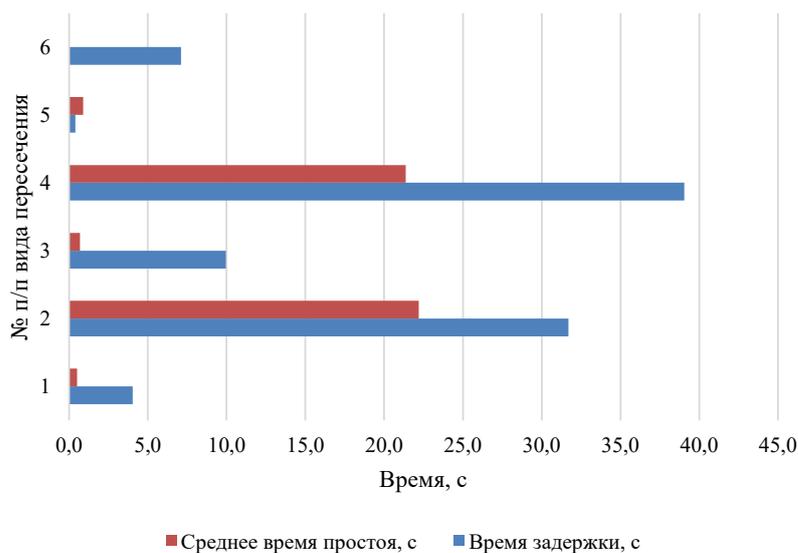


Рисунок 5 – Сравнение показателей среднего времени простоя и времени задержки перекрестка Октябрьский проспект – ул. Свердлова – ул. Дружбы
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Comparison of the average downtime and delay time at the Oktyabrsky Prospekt – Sverdlova Street – Druzhby Street intersection
 Source: compiled by the authors.

На данный момент точные количественные показатели влияния ширины дорожного полотна на пропускную способность ВАТС не установлены, однако можно выделить такие важные аспекты, как возможность равномерного

движения потока без остановок, характерных для пилотируемых автомобилей и вызванных человеческим фактором, и, как следствие, более плотное движение колонн ВАТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Подопригора Н.В. Алгоритмы диагностирования конструктивных систем высокоавтоматизированных транспортных средств // Мир транспорта и технологических машин. 2023. №. 4-1 (83). С. 3–8. DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1\(83\)-3-18](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-3-18)
2. Грошев А.М., Тумасов А.В. Беспилотные транспортные средства: настоящее и будущее // Транспортные системы. 2016. №. 2. С. 68.
3. Stern R.E. et al. Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments // *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018. Т. 89. С. 205–221.
4. Пырнова О.А., Зарипова Р.С. Автономные машины и искусственный интеллект // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2020. №. 3. С. 46–49.
5. Голов Е.В. Фактор скорости в системе безопасности дорожного движения // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3(86). С. 139–148.
6. Солодкий А.И. Проектирование экономически эффективной улично-дорожной сети городов // Вестник. Зодчий. 21 век. 2013. № 1(46). С. 078–081.
7. Солодкий А.И., Черных Н.В. Повышение уровня обслуживания дорожного движения на улично-дорожной сети городов // Техника и технология транспорта. 2019. № S(13). С. 70.
8. Schwarting W., Alonso-Mora J., Rus D. Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018. Vol. 1. P. 187–210.
9. Rios-Torres J., Malikopoulos A.A. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 18, No. 5. P. 1066–1077.
10. Levin M.W., Boyles S.D. Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016. No. 2565. P. 1–9.
11. Talebpour A., Mahmassani H.S. Influence of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Stability and Throughput // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016. Vol. 71. P. 143–163.
12. Chen D., Ahn S., Chitturi M., Noyce D.A. Towards Vehicle Automation: Roadway Capacity Formulation for Traffic Mixed with Regular and Automated Vehicles // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. Vol. 100. P. 196–221.
13. Dresner K., Stone P. A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2008. Vol. 31. P. 591–656.
14. Zhou M., Jin S., Wang H. Simulation-Based Evaluation of Automated Vehicles in a Mixed Traffic Environment // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. Vol. 82. P. 290–307.
15. Milakis D., van Arem B., van Wee B. Policy and Society Related Implications of Automated Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 324–348.
16. Куверин И.Ю., Гусев С.А., Зернов А.А., Блинов Д.Г. Моделирование однополосного транспортного потока беспилотных автомобилей на основе теории следования за лидером // *Автоматика на транспорте*. 2024. Т. 10, №. 2. С. 166–177. DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177>
17. Быков Н.В. Моделирование кластерного движения беспилотных транспортных средств в гетерогенном транспортном потоке // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14, №. 5. С. 1041–1058. DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058>

REFERENCES

1. Podoprigora N.V. Methods of diagnostics of structural systems of highly automated vehicles. *World of Transport and Technological Machines/ 2023; 4-1 (83): 3–8. (In Russ.)* DOI: [https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1\(83\)-3-18](https://doi.org/10.33979/2073-7432-2023-4-1(83)-3-18)
2. Groshev A.M., Tumasov A.V. Unmanned Vehicles: Present and Future. *Transport Systems*. 2016; 2: 68. (In Russ.)
3. Stern R.E. et al. Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments. *Transportation research part C: emerging technologies*. 2018; 89: 205–221.
4. Pyrnova O.A., Zaripova R.S. Autonomous Machines and Artificial Intelligence. *Information Technologies in Construction, Social, and Economic Systems*. 2020; 3: 46–49.
5. Golov E.V. The Speed Factor in the Road Traffic Safety System. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 3(86): 139–148.
6. Solodky A.I. Designing Cost-Effective Urban Road Networks. *Bulletin. Zodchy. 21st Century*. 2013; 1(46): 078–081. (In Russ.)
7. Solodky A.I. Improving the level of traffic service on the road network of cities. *Transport Engineering and Technology*. 2019; S(13): 70. (In Russ.)
8. Schwarting W., Alonso-Mora J., Rus D. Planning and Decision-Making for Autonomous Vehicles. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2018; vol. 1: 187–210.
9. Rios-Torres J., Malikopoulos A.A. A Survey on the Coordination of Connected and Automated Vehicles at Intersections and Merging at Highway On-Ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2017; vol. 18, no. 5: 1066–1077.
10. Levin M.W., Boyles S.D. Effects of Autonomous Vehicle Ownership on Trip, Mode, and Route Choice, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016; 2565: 1–9.
11. Talebpour A., Mahmassani H.S. Influence of Connected and Autonomous Vehicles on Traffic Flow Stability and Throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016; 71: 143–163.
12. Chen D., Ahn S., Chitturi M., Noyce D.A. Towards Vehicle Automation: Roadway Capacity Formu-

lation for Traffic Mixed with Regular and Automated Vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 100: 196–221.

13. Dresner K., Stone P.A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2008; vol. 31: 591–656.

14. Zhou M., Jin S., Wang H. Simulation-Based Evaluation of Automated Vehicles in a Mixed Traffic Environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017; 82: 290–307.

15. Milakis D., van Arem B., van Wee B. Policy and Society Related Implications of Automated Driving: A Review of Literature and Directions for Future Research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2017; 21, no. 4: 324–348.

16. Kuverin I.Yu., Gusev S.A. Zernov A.A., Blinov D.G. Simulation of single-lane traffic flow of self-driving cars based on the theory of following the leader. *Transport automation research*. 2024; Vol. 10, no. 2: 166–177. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177>

17. Bykov N.V. A simulation model of connected automated vehicles platoon dynamics in a heterogeneous traffic flow. *Computer Research and Modeling*. 2022; Volume 14, Issue 5: 1041–1058. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2022-14-5-1041-1058>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Жданова А.М. Постановка целей и задач исследования, изучение кольцевых пересечений и перспектив развития ВАТ, подготовка обзора литературы, анализ результатов исследования и формулирование выводов.

Старостенко А.В., Царев Д.А. Выявление параметров эффективности для пилотируемых ТС и ВАТС, микро- мезомоделирование движения ВАТС на кольцевых пересечениях в специализированном программном обеспечении, анализ результатов исследования и формулирование выводов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Zhdanova A.M. Setting the goals and objectives of the study, studying roundabout intersections and the prospects for the development of HAV, preparing a literature review, analyzing the research results, formulating conclusions.

Starostenko A.V., Tsarev D.A. Identifying efficiency parameters for manned vehicles and HAV, micro (meso-) modeling of HAV traffic at roundabout intersections using specialized software, analyzing the research results, formulating conclusions.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жданова Анастасия Михайловна – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4); ведущий

инженер камеральных работ АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Измайловское, б-р Измайловский, д. 11, стр. 1, помещ. 29Н, КАБ. 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2765-4643>,

SPIN-код: 4414-4239,

e-mail: anastasiiazhdanova22@gmail.com

Старостенко Андрей Владимирович – ведущий специалист по сопровождению объектов АО «ПО РосДорСтрой» (175400, просп. Васильева, 9, Валдай, Новгородская обл.), магистр Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,

e-mail: starostenko2637@mail.ru

Царев Данил Александрович – аспирант кафедры «Транспортные системы и дорожно-мостовое строительство» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4); ведущий инженер камеральных работ АО «СТАР-Проект» (196084, г. Санкт-Петербург, вн.тер. г. муниципальный округ Измайловское, б-р Измайловский, д. 11, стр. 1, помещ. 29Н, КАБ. 2).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9793-2522>,

e-mail: mr.tsar2309@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia M. Zhdanova – graduate student of the Department of Transport Systems and Road and Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) (2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, St. Petersburg, 190005.); Lead Desk Engineer, STAR-Project JSC (external Municipal District Izmailovskoye, Blvd. Izmailovsky, 11, p. 29N, guided bombs. 2, St. Petersburg, 196084).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2765-4643>,

SPIN code: 4414-4239,

e-mail: anastasiiazhdanova22@gmail.com

Andrey V. Starostenko – leading specialist in the maintenance of facilities of JSC “PO RosDorStroy” (ave. Vasilyeva, 9, Valdai, Novgorod region, 175400) master of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (Leningradsky Prospekt, 64, Moscow, 125319).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3889-6489>,

e-mail: starostenko2637@mail.ru

Daniil A. Tsarev – graduate student of the Department of Transport Systems and Road and Bridge Construction, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU) (2nd Krasnoarmeyskaya St., 4, St. Petersburg, 190005.); Lead Desk Engineer, STAR-Project JSC (external Municipal District Izmailovskoye, Blvd. Izmailovsky, 11, p. 29N, guided bombs. 2, St. Petersburg, 196084).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9793-2522>,

e-mail: mr.tsar2309@gmail.com