Научная статья / Original research article
УДК 656.11
https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124
EDN: SRODRH

2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)
2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Анализ действующих методик по определению потоков насыщения на городских регулируемых пересечениях

Р. В. Андронов ✉, Е. Э. Леверец, Д. А. Гензе, Е. Н. Легостаева, В. С. Мотелика
Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

✉ andronovrv@tyuiu.ru

Аннотация. В процессе обновления нормативной документации в Российской Федерации устанавливается система национальных и переходных национальных стандартов (ГОСТ, ПНСТ), готовятся к отмене такие формы документации, как СП, ОДМ и др. Согласно федеральному законодательству, в нормативных документах не должно быть дублирующих положений. В настоящее время при расчете потока насыщения и пропускной способности на регулируемых пересечениях используются две оформленные в виде дорожных нормативов методики, основанные на результатах отечественных исследований и стандартах Highway Capacity Manual, принятых в США. Цель статьи – провести анализ применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля, а также сравнительный анализ расчетных значений потока насыщения по представленным документам на примере регулируемых пересечений. При общем сходстве величин транспортных задержек, рассчитанных на пересечениях с коэффициентом загрузки до 1 (расхождение в расчетах находятся в пределах 10 %), выявлено отличие в значениях, полученных по методике Вебстера, и методике, базирующейся на нормах Highway Capacity Manual, при уровне загрузки равном и превышающем 1. Некорректное применение указанных коэффициентов имеет накопительный характер и влияет на общую точность расчетов. Необходимо принятие единого национального стандарта по расчету потока насыщения и пропускной способности, учитывающее наработки как отечественных, так и зарубежных исследований.

Ключевые слова: поток насыщения, пропускная способность, задержки транспортных средств, улично-дорожная сеть, транспортный поток, регулируемые пересечения

Для цитирования: Андронов Р. В., Леверец Е. Э., Гензе Д. А., Легостаева Е. Н., Мотелика В. С. Анализ действующих методик по определению потоков насыщения на городских регулируемых пересечениях. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):112–124. https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124 EDN: SRODRH

Analysis of current methods for determining saturation flows at urban controlled intersections

Roman V. Andronov ✉, Evgeny E. Leverents, Dmitriy A. Genze, Elena N. Legostaeva, Victoria S. Motelika
Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ andronovrv@tyuiu.ru

Abstract. The process of updating regulatory documentation in the Russian Federation involves the implementation of a system of national and transitional national standards (GOST, PNST), and the phasing

© Андронов Р. В., Леверец Е. Э., Гензе Д. А., Легостаева Е. Н., Мотелика В. С., 2025

out of such forms of documentation as SP, ODM, etc. According to federal law, regulatory documents must not contain duplicative provisions. Currently, two standardized methodologies, based on domestic research findings and the Highway Capacity Manual standards adopted in the USA, are used to calculate saturation flow and traffic capacity at controlled intersections. These methodologies are formalized as industry road standards. The purpose of this article is to analyze the existing methodologies for calculating the saturation flow and the average delay per vehicle, as well as to compare the calculated saturation flow values from the presented documents using the example of regulated intersections. While the values of transport delays at intersections with a load factor below 1 are generally similar (calculation discrepancies are within 10%), a difference was found between the values obtained using Webster's method and the method based on the Highway Capacity Manual when the load factor is equal to or exceeds 1. The incorrect application of these coefficients has a cumulative effect and affects the overall accuracy of calculations. Therefore, it is necessary to adopt a unified national standard for calculating saturation flow and traffic capacity, taking into account the findings of both domestic and international research.

Keywords: saturation flow, traffic capacity, vehicle delay, road network, traffic flow, controlled intersections

For citation: Andronov R. V., Leverents E. E., Genze D. A., Legostaeva E. N., Motelika V. S. Analysis of modern methods for determining saturation flows at urban controlled intersections. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):112–124. (In Russ.) https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124

1. Введение / Introduction

В процессе обновления нормативной документации в РФ устанавливается система национальных и переходных национальных стандартов, являющихся обязательными к исполнению. В соответствии со ст. 35 закона «О стандартизации в Российской Федерации»[1] (в редакции 30.12.2020 г.), с 1 сентября 2025 г. все нормативные документы, которые отсутствуют в ст. 14 данного закона, в том числе ОДН, ОДМ, СП, будут отменены и запрещены к применению и упоминанию «при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, закупок товаров, работ, услуг организациями с участием государства». Использование ссылок на такие стандарты в нормативных правовых актах, конструкторской, проектной и иной технической документации также будет запрещено. Исключение составляют национальные и переходные национальные стандарты (ГОСТ, ПНСТ). Также, согласно ст. 4 данного закона, в различных нормативных документах не должно быть дублирующих положений. Вновь разрабатываемые нормативные документы в собственных расчетных методиках должны ссылаться на соответствующие ранее принятые. Проблема обновления и унификации нормативной документации характерна не только для транспортной и дорожной отрасли, но и для строительной отрасли в целом, что отмечалось в ряде исследований, в частности в [1].

В соответствии со стандартами последних лет (ГОСТ Р 56670-2015[2] и ГОСТ Р 58653-2019[3]), для мониторинга движения транспортных потоков, определения конфигурации и параметров пере-

[1] Федеральный закон от 19.06.2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» (с изменениями на 30.12.2020 г.). URL: https://docs.cntd.ru/document/420284277.

[2] ГОСТ Р 56670-2015. Интеллектуальные транспортные системы. Подсистема мониторинга параметров транспортных потоков на основе анализа телематических данных городского пассажирского транспорта = Intellectual transportation system. Traffic parameters monitoring using telematics data of urban passengers transport vehicles. Дата введения 2016-05-01. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200125977 (дата обращения: 11.04.2024).

[3] ГОСТ Р 58653-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания. Технические требования = Automobile roads of generaluse. Intersections and junctions. Technical requirements. Дата введения 2020-03-01. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200169423 (дата обращения: 20.04.2024).

сечений, а также организации дорожного движения по ним, необходимо знать рассчитанное значение потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений. Данный вопрос не рассмотрен в упомянутых документах, и для расчета пока используются ОДМ 218.6.003-2011[4] и ОДМ 218.2.020-2012[5]. Положения закона «О стандартизации в Российской Федерации» выводят упомянутые документы за рамки правового поля и грозят будущим отсутствием актуальной и релевантной методики расчета показателей потока насыщения и пропускной способности.

Представленные нормы не являются статичными, и в настоящее время исследователи ведут значительную работу по совершенствованию данных подходов с учетом российских и региональных особенностей [2–4] с целью организации дорожного движения с применением автоматизированной системы управления движением [5, 6].

Цель статьи – проведение сравнительного анализа применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля посредством натурного эксперимента. Для достижения поставленной цели необходимо провести сравнение расчетных значений параметров транспортного потока на регулируемых пересечениях по представленным документам. Новизна исследования заключается в том, что впервые установлен факт дублирования используемых рекомендаций в области применения некоторых расчетов параметров транспортного потока.

Как было отмечено выше, при расчете вышеуказанных характеристик руководствуются ОДМ 218.6.003-2011 и ОДМ 218.2.020-2012. В дополнение ко второму документу в 2017 г. Министерство транспорта РФ выпустило Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения[6], которые в целом повторяют положения ОДМ 218.2.020-2012.

ОДМ 218.6.003-2011 базируются в основном на исследованиях отечественных ученых [7], а ОДМ 218.2.020-2012 и дополняющие их рекомендации основываются на серии американских стандартов Highway Capacity Manual (2000, 2010, 2016 гг.)[7, 8] (далее – HCM) и отражают большой пласт зарубежных исследований теории транспортных потоков [8], на русском языке они известны по работам [2, 9, 10].

Современные исследования в части потока насыщения и пропускной способности делают акцент на изыскании резервов пропускной способности в условиях движения плотных транспортных потоков и наличия заторов [11, 12, 13] и оптимизации светофорного цикла с повышением пропускной способности конфликтных поворачивающих направлений [11, 16]. Отдельное внимание следует уделить исследованию [3], базирующемуся на нормах Highway Capacity Manual, в котором корректировку пропускной способности проводят на основании погодных условий с использованием методов нечеткой логики.

---

[4] ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200098292 (дата обращения: 11.04.2024).

[5] ОДМ 218.2.020-2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200092512 (дата обращения: 04.04.2024).

[6] Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 26.12.2018 г. № 479 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения в части расчета значений основных параметров дорожного движения». URL: https://docs.cntd.ru/document/552196818 (дата обращения: 04.04.2024).

[7] Highway Capacity Manual 2010 by National Academy of Sciences. URL: https://archive.org/details/highway-capacity-manual-2010 (accessed 04.04.2024).

[8] Highway Capacity Manual 7th Edition. A Guide for Multimodal Mobility Analysis (2022). URL: https://doi.org/10.17226/26432 (accessed 11.04.2024).

Существующие методики расчета задержек транспортных средств разделились на две ветви, одну из них можно назвать методикой Вебстера [7, 16], вторая базируется на нормах HCM и представлена в нормативной документации по регулируемым пересечениям (ГОСТ Р 58653-2019, Методических рекомендациях по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения). Несмотря на то, что вторая методика вошла в государственный стандарт, до сих пор при расчетах и в технических заданиях проектов по организации дорожного движения требуется учитывать положения ОДМ 218.6.003-2011.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Гипотеза, которая легла в основу исследования, заключается в том, что современная транспортная ситуация требует совершенствования методов оценки параметров транспортных потоков на пересечениях, что вызвано изменением режима работы элементов улично-дорожной сети, в частности, транспортных пересечений.

Объектом исследования являлся процесс движения транспортных потоков на регулируемых пересечениях городских улиц и дорог. В исследовании использовались методы расчета потока насыщения, пропускной способности и задержек транспортных средств, а также такие общенаучные методы, как наблюдение, анализ, системный подход. Данное исследование является теоретическим, базой для всех расчетных выкладок и выводов являлись фундаментальные положения теории транспортных потоков [7, 17].

Для сравнения методов был проведен расчет характеристик транспортного потока на регулируемых пересечениях с различными уровнями загрузки по формуле Вебстера и по методике HCM.

В настоящей статье не ставилась цель практического подтверждения теоретических положений рассматриваемых документов (ОДМ 218.6.003-2011, ОДМ 218.2.020-2012 и Методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения) и осуществлялось только сравнение расчетных методик.

Сравнение проводилось только по расчетным параметрам, т. к. существуют значительные трудности измерить поток насыщения в натурных условиях и в связи с низкой потенциальной достоверностью такого эксперимента (это объясняется эпизодическим характером заторов, влиянием на характер очереди пропускной способности соседнего пересечения). Сравнение фактических значений потока насыщения не входило в задачу данной статьи ввиду достаточной изученности данного вопроса и множества влияющих факторов, поэтому вывод о применимости методик делался на сходстве/различии полученных теоретических результатов по исследуемым методикам.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Особенностью отечественных нормативных документов является то, что ОДМ 218.2.020-2012 применяются в основном в области проектирования конфигурации проезжей части и организации движения, а ОДМ 218.6.003-2011 используются преимущественно с целью назначения и расчета светофорной сигнализации. В плане расчета потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений данные документы дублируют друг друга.

Таким образом, согласно положениям федерального закона и ввиду отмены действия данных документов, необходимо разработать единый документ по расчету потока насыщения и пропускной способности, учитывающий российские особенности движения по городским улицам и дорогам. Далее в статье будет показаны некоторые методологические отличия обоих документов.

Под *пропускной способностью (Capacity)* подразумевается максимальное число автомобилей, которое может пропустить участок дороги за единицу времени в одном или двух направлениях в рассматриваемых дорожных и погодно-климатических условиях (согласно ОДМ 218.2.020-2012).

Поток насыщения (Saturation Flow) – это максимально возможная интенсивность движения по полосе, с которой транспортные средства, ранее стоявшие в очереди, могут проехать перекресток в текущих условиях при условии зеленого сигнала без потерь времени (перевод из Highway Capacity Manual). В [2] данное определение приведено в сокращенном виде: «поток насыщения – это максимальная интенсивность разъезда транспортных средств из очереди в течение зеленого сигнала». В Методических рекомендациях по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения дано упрощенное определение: «поток насыщения – установившаяся интенсивность движения через стоп-линию из очереди большой длины».

При регулировании очередности проезда потоков разных направлений фазы движения и их продолжительность подбираются таким образом, чтобы обеспечивать максимальную пропускную способность пересечений автомобильных дорог, согласно ОДМ 218.2.020-2012. Таким образом, пропускная способность является производным параметром от потока насыщения. Расчетное значение потока насыщения *S* группы полос в конкретных дорожных условиях определяется по формуле:

$$S = S_0 \cdot N \cdot f_W \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_P \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb}, \quad (1)$$

где S_0 – идеальный поток насыщения, прив. авт./ч (по умолчанию 1 900);
N – количество полос движения в составе группы;
f_W – коэффициент, учитывающий ширину полосы движения;
f_{HV} – коэффициент, учитывающий долю грузовых автомобилей в потоке;
f_g – коэффициент, учитывающий продольные уклоны;
f_P – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые паркующимися транспортными средствами;
f_{bb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые автобусами;
f_a – коэффициент, учитывающий тип территории;
f_{LU} – коэффициент, учитывающий неравномерность загрузки полос движения;
f_{LT} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые поворачивающими налево транспортными средствами в составе группы;
f_{RT} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые поворачивающими направо транспортными средствами в составе группы;
f_{Lpb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые пешеходами при повороте налево;
f_{Rpb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые пешеходами при повороте направо.

Приведенная формула практически идентична формуле, изложенной в ОДМ 218.2.020-2012, в которой коэффициент грузовых автомобилей в потоке не учтен. В городских условиях, где участие грузовых автомобилей и общественного транспорта оказывает влияние на поток движения, это не корректно и расчет потока насыщения требует его учета.

При дальнейшем анализе ОДМ 218.2.020-2012 и Методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения было выявлено отличие применяемых диаграмм для оценки коэффициента, влияющего на снижение показателя потока насыщения при левоповоротном движении при одинаковых условиях применения и при полной идентичности положений в части расчета потока насыщения (рис. 1).

Расчет показателя потока насыщения по ОДМ 218.6.003-2011 является известной задачей, и формула расчета в настоящей статье не приводится.

Регулируемые пересечения являются так называемыми узкими местами улично-дорожной сети, и пропускная способность улиц в целом будет обуславливаться пропускной способностью регулируемых пересечений [17, 18]. В данном исследовании были рассмотрены регулируемые пересечения ул. Герцена – ул. Первомайской и ул. Полевой – ул. Ямской в г. Тюмени. Первый узел, согласно данным сайта Госавтоинспекции Тюменской области, на втором месте по показателю аварийности.

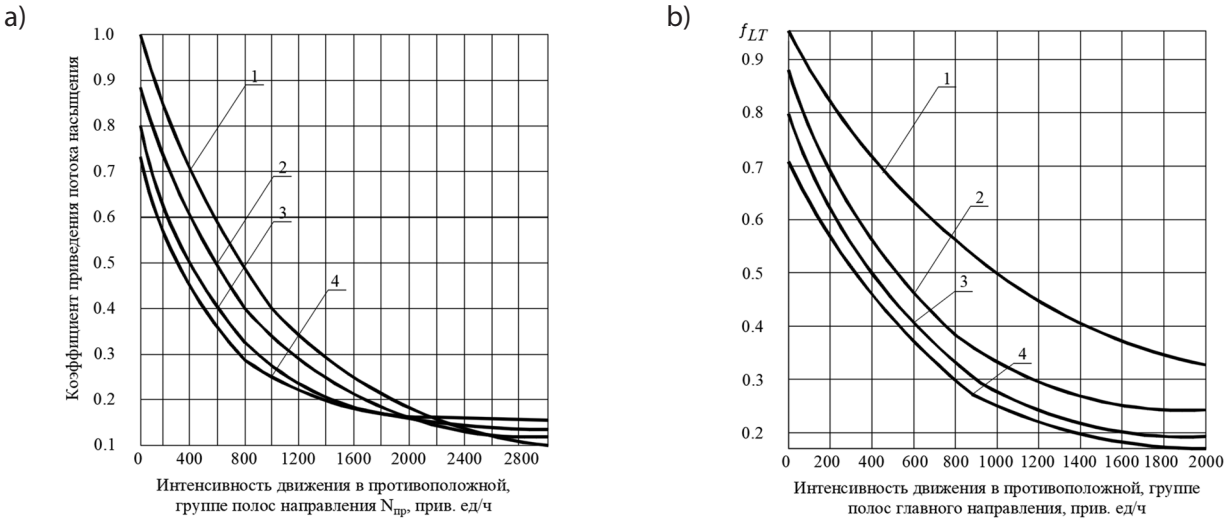

Рис. 1. Отличие применяемых графиков в документах: a) ОДМ 218.2.020-2012; b) Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, 2017 г.
Fig. 1. Difference in the charts used in the documents: a) ODM 218.2.020-2012; b) Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures, 2017

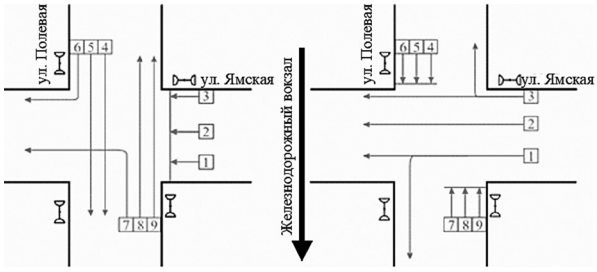

Рис. 2. Организация движения транспорта на пересечении ул. Ямской – Полевой
Fig. 2. Traffic management at the intersection of Yamskaya Street and Polevaya Street

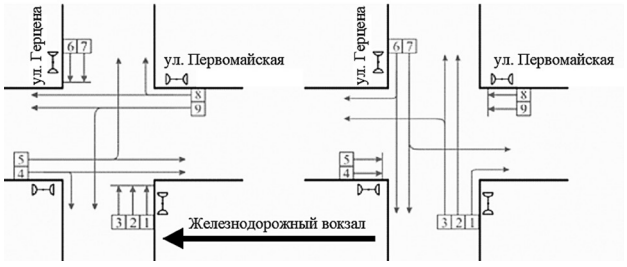

Рис. 3. Организация движения транспорта на пересечении ул. Герцена – Первомайской
Fig. 3. Traffic management at the intersection of Herzen Street and Pervomayskaya Street

Данные перекрестки оснащены необходимыми техсредствами регулирования движения. Схемы организации движения по пересечениям по состоянию на май 2024 г. представлены на рис. 2, 3.

Определение коэффициентов приведения к легковому автомобилю ввиду перехода от грузоподъемности автомобиля к количеству осей движения у транспортного средства[9] является достаточно нетривиальной задачей для применяемых методик (предлагаемых ОДМ 218.6.003-2011 и Методическими рекомендациями по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения). Так как общее количество грузовых автомобилей и автобусов в транспортном потоке на рассматриваемых узлах не превышает 5 %, то для простоты анализа сравнение проводилось в физических единицах.

Расчет значения коэффициентов, учитывающих влияние левоповоротного движения с конфликтом, производился для светофорного цикла и интенсивности движения в будний день с 17.00 до 18.00 (2 мая 2024 г.).

[9] ГОСТ 32965-2014 Методы учета интенсивности движения транспортного потока = Public roads. Traffic flow intensity accounting methods. Дата введения 08.09.2016. Москва: Стандартинформ, 2016. 26 с.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения и ОДМ 218.6.003-2011
Table 1. Comparison of calculation results using the Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures and ODM 218.6.003-2011

Пересечение	Номер полосы (рис. 2 и 3)	Итоговое значение потока насыщения согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения			Итоговое значение потока насыщения согласно ОДМ 218.6.003-2011	Относительное отклонение полученных значений по колонкам, %		
		f_a = 0.9; f_{LU} = 0.95; (для полос 4, 5, 8, 9)	f_a = 1.0; f_{LU} = 0.95; (для полос 4, 5, 8, 9)	f_a = 1.0; f_{LU} = 1.0;		3 и 6	4 и 6	5 и 6
Ул. Ямская – Полевая	1	1 560	1 733	1 733	1 663	6	4	4
	2	1 596	1 773	1 773	1 850	14	4	4
	3	1 580	1 756	1 756	1 762	10	0	0
	4	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	5	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	6	1 324	1 471	1 471	1 480	11	6	1
	7	882	980	980	1 057	17	7	7
	8	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	9	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
Среднее отклонение, %						15	7	5
Ул. Герцена – Первомайская	1	1 386	1 540	1 540	1 480	6	4	4
	2	1 630	1 811	1 811	1 850	12	2	2
	3	1 016	1 129	1 129	1 057	4	7	7
	4	1 609	1 787	1 787	1 786	10	0	0
	5	1 208	1 342	1 342	1 324	9	1	1
	6	1 607	1 786	1 786	1 745	8	2	2
	7	1 197	1 330	1 330	1 396	14	5	5
	8	1 537	1 708	1 708	1 805	15	5	5
	9	1 114	1 238	1 238	1 345	17	8	8
Среднее отклонение, %						11	4	4

Итоговые значения потока насыщения, полученные согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, представлены в таблице 1.

Можно предположить, что при неоднородном составе транспортного потока разница в расчете потока насыщения по представленным методикам была бы наибольшей.

Отдельно заслуживают внимания коэффициенты f_a – тип территории (равен 0) и f_{LU} – неравномерность загрузки полос движения (f_T и f_H соответственно, согласно ОДМ 218.2.020-2012), описывающие общую ситуацию с дорожными условиями на данном узле. Так как оба рассматриваемых пересечения расположены в центральной части города, то рекомендуемое значение коэффициента f_a составляет 0.9, а значение коэффициента f_{LU} для групп полос с одинаковым направлением движения – 0.95.

Результаты расчетов по двум документам были достаточно схожими, несмотря на то, что ОДМ 218.6.003-2011 в целом не предусматривает разделение движения на конфликтное и бесконфликтное.

Итоговое сравнение показало схожие результаты расчета. Отклонение составило в целом 4–5 %. Большие значения отклонений (11–15 %) фиксируются при недостаточно обоснованном, на взгляд авторов, применении коэффициента, учитывающего тип территории. При очевидном влиянии способа пропуска (конфликтного/бесконфликтного) левоповоротного потока методика ОДМ 218.6.003-2011 является достаточно простой, и результаты расчета по ней не отличаются от результатов, полученных согласно ОДМ 218.2.020-2012 и Методическим рекомендациям по разработке и

реализации мероприятий по организации дорожного движения. Это обусловлено тем, что при планировании организации движения и при подходе, где безопасность дорожного движения зависит в первую очередь от качества дороги, значительные левоповоротные потоки выделяют полностью (отдельная фаза) или частично (ранняя отсечка и т. д.) в бесконфликтное состояние.

На следующем этапе проводилось сравнение расчета транспортных задержек $t_{ср}$ по двум методикам.

Первая методика базируется на формуле Вебстера:

$$t_{ср} = \frac{T_ц}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0.65\left(\frac{T_ц}{N^2}\right)^{1/3} \cdot x^{(2+5\lambda)}, \quad (2)$$

где λ – отношение длительности разрешающего сигнала к циклу ($\lambda = T_0/T_ц$);
x – степень насыщения направления движения;
N – интенсивность движения транспортных средств в рассматриваемом направлении, авт./с.

Вторая методика – методика HCM [11]. Нормативный документ, используемый на территории Соединенных Штатов Америки, во многих аспектах аналогичен канадским нормативным документам и включает в себя результаты исследований регулируемых пересечений, которые проводились на протяжении 30 лет. Величина средней задержки на один автомобиль d определяется по данной методике следующим образом [11]:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3, \quad (3)$$

где d_1 – стандартная задержка при равномерном прибытии автомобилей к перекрестку, с/прив. ед.;
PF – коэффициент прогрессии для стандартной задержки с учетом прогрессии регулирования;
d_2 – дополнительная задержка случайного транспортного средства при начальной длине очереди автомобилей равной нулю, с/прив. ед.;
d_3 – задержка автомобилей в начале анализируемого периода, с/прив. ед. (в отечественных нормативных документах (ГОСТ Р 58653-2019, Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения) отсутствует).

Стандартная задержка d_1 подразумевает равномерное прибытие автомобилей к пересечению при отсутствии первоначальной очереди. Стандартная задержка не может быть больше 1, так как была основана на методике Вебстера [9]. Величина средней задержки d_1 определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{0.5C\left(1-\frac{g}{C}\right)^2}{1-\left[\min(1,X)\frac{g}{C}\right]}, \quad (4)$$

где C – длина цикла регулирования, с;
g – эффективное время разрешительного сигнала, с;
X – коэффициент насыщения полосы.

Дополнительная задержка d_2 учитывает случайности в прибытии автомобилей на перекресток и в перенасыщении циклов регулирования. Она является чувствительной к: потоку насыщения X; длительности периода T, затор определяется на подходе к перекрестку или в момент уменьшения затора; пропускной способности C; типу светофорного регулирования k.

При расчете дополнительной задержки d_2 предполагается отсутствие очереди в начале анализируемого периода:

$$d_2 = 900T\left[(X-1)+\sqrt{(X-1)^2+\frac{8klX}{C_iT}}\right], \quad (5)$$

где C_i – пропускная способность для полос *i*, прив. ед./ч;
k – коэффициент, учитывающий влияние параметров светофорного оборудования при адаптивном регулировании на величину дополнительной задержки;
I – коэффициент, учитывающий удаленность предыдущего регулируемого перекрестка от рассматриваемого.

Сравнение методов расчета по ряду критериев показано в таблице 2. Оба метода позволяют вычислить величину транспортной задержки для прогноза ситуации на пересечении. Однако современная транспортная ситуация подразумевает частые случаи работы перекрестков в режиме перегрузки, когда поток автомобилей превосходит пропускную способность пересечения. Именно для режима перегрузки расчеты по формуле Вебстера дают неточные результаты [15].

Для проверки влияния перегрузки на результаты расчетов по двум методам было проведено исследование 7 объектов в Тюмени. Различие в полученых значениях представлено на рис. 4. Значительное отличие результатов на пересечении ул. Луначарского и Полевой связано с высоким коэффициентом загрузки на обоих пересекающихся направлениях.

Результаты расчетов транспортной задержки на пересечениях по двум методикам приведены в таблице 3. Различие значений увеличивалось в зависимости от коэффициента загрузки (чем выше коэффициент загрузки, тем больше отличие).

Таблица 2. Сравнение методов расчета по выбранным критериям
Table 2. Comparison of calculation methods based on selected criteria

Критерий	Метод Вебстера	Метод HCM 2000
Подход	Эмпирический, упрощенный расчет задержки	Комплексный, с учетом трех компонентов задержки
Учет перегрузки	Не учитывается	Учитывается
Сложность расчетов	Относительно простой	Сложный, учитывает больше параметров
Применение	Подходит для изолированных пересечений и пересечений, работающих без координации	Подходит для любого типа организации дорожного движения
Точность	Не работает при перегрузке	Высокая при различных условиях

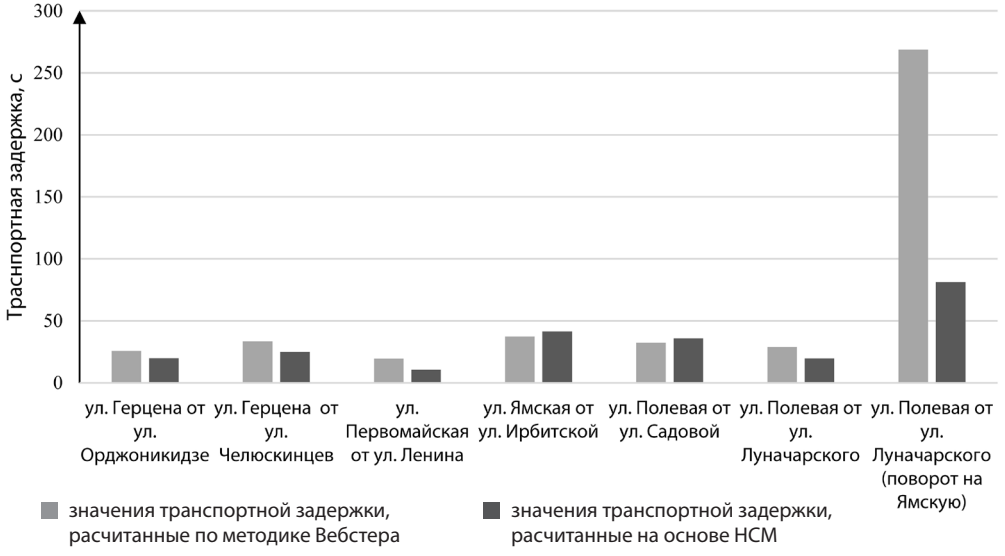

Рис. 4. Расчет транспортной задержки по двум методам
Fig. 4. Calculation of traffic delay using two methods

Таблица 3. Различие методов по оценке величины транспортной задержки
Table 3. Differences in methods for estimating traffic delay

Улица, направление	Коэффициент загрузки $K_з$	Величина транспортной задержки по методике Вебстера, с	Величина транспортной задержки на основе HCM, с	Отличие расчетов, %
Ул. Герцена от ул. Орджоникидзе	0.27	26	20	30
Ул. Герцена от ул. Челюскинцев	0.36	33	25	34
Ул. Первомайская от ул. Ленина	0.18	19	11	85
Ул. Ямская от ул. Ирбитской	0.7	37	41	10
Ул. Полевая от ул. Садовой	0.45	32	36	10
Ул. Полевая от ул. Луначарского	0.7	29	20	47
Ул. Полевая от ул. Луначарского (поворот на ул. Ямскую)	0.98	269	82	231

Значения, полученные по методике HCM и закрепленные в ГОСТ, являются более релевантными при оценке транспортной ситуации и в целом схожи с полученными при имитационном моделировании результатами. Такие значения характерны для уровня загрузки меньше единицы. При уровне загрузки больше единицы формула Вебстера показывает неточные результаты и отличие двух методов достигает 85 %, так как среднее значение задержки, рассчитанной по формуле Вебстера, стремится к бесконечности [15]. Как видно на рис. 5, при коэффициенте загрузки близкому или превосходящему 1 значения, рассчитанные по методике Вебстера, стремятся к бесконечности, что не соответствует фактическим условиям движения [15].

При синхронизации работы соседних пересечений и наличии так называемой прогрессии (синхронный подход транспортных средств на зеленый сигнал светофора) вторая методика будет выдавать более корректные значения. Метод Вебстера также не учтывает перегрузку, поэтому при корректной работе на уровнях загрузки ниже 1 оценка транспортной задержки имеет приемлемую точность. Но при высоких уровнях загрузки и при перегруженном пересечении расчет может дать некорректные результаты.

Методика расчета средней задержки, базирующаяся на нормах HCM, учитывает условия перегрузки транспортного пересечения. Таким образом, при работе с пересечениями, для которых характерны пиковые значения интенсивности движения с превышением их пропускной способности, наиболее корректный расчет сможет дать методика HCM.

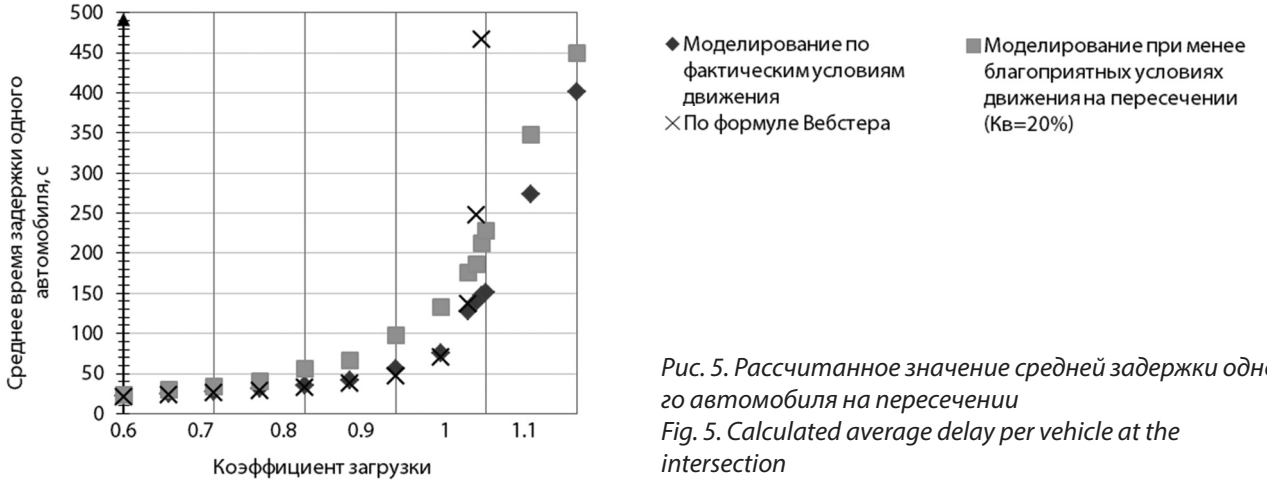

Рис. 5. Рассчитанное значение средней задержки одного автомобиля на пересечении
Fig. 5. Calculated average delay per vehicle at the intersection

4. Заключение / Conclusions

Проведенный анализ применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля, а также расчетных значений потока насыщения позволил сделать следующие выводы:

1. Расчеты потока насыщения по методикам, предлагаемым ОДМ 218.6.003-2011 и Методическими рекомендациями по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, показали схожие значения, отклонение составило 4–15 %.
2. Изложенная в ОДМ 218.6.003-2011 методика для определения потока насыщения на регулируемых пересечениях является более доступной (необходимы значения потока насыщения и пропускной способности) и удобной для моделирования больших сетей с использованием автоматизированной системы управления дорожного движения. В свою очередь для расчета по Highway Capacity Manual требуется большее количество параметров пересечения. Если при планировании организации движения левоповоротные потоки выделить полностью (отдельная фаза) или частично (ранняя отсечка и др.) в бесконфликтное состояние, различие в результатах расчета будет незначительным (4–5 %).

Таким образом, наиболее популярную и часто применяемую в отечественной практике методику Вебстера для расчета задержек имеет смысл заменить на методику HCM, приведенную в ГОСТ Р 58653-2019, либо другую, актуализированную для российских условий, без дублирования положений документов и «неопределенности» по условиям применения. Кроме того, необходимо принятие в рамках единого подхода национального стандарта по расчету потока насыщения пропускной способности и задержек транспортных средств, учитывающего наработки как отечественных, так и зарубежных исследований.

Вклад авторов. Андронов Р. В. – формулировка концепции исследования; разработка методологического подхода; подготовка исходного текста; обобщение итоговых результатов. Леверец Е. Э. – проведение эксперимента; подготовка исходного текста; редактирование и доработка текста. Гензе Д. А. – анализ текущего состояния проблемы; совершенствование методологической базы. Легостаева Е. Н. – проектирование программы испытаний; проведение эксперимента. Мотелика В. С. – исследование актуального состояния вопроса; редактирование и доработка текста.

Author contributions. Roman V. Andronov – formulation of the research concept; development of the methodological approach; preparation of the initial draft; summarization of the final results. Evgeny E. Leverents – conducting the experiment; preparation of the initial draft; editing and refinement of the text. Dmitriy A. Genze – analysis of the current state of the problem; refinement of the methodological framework. Elena N. Legostaeva – design of the testing program; conducting the experiment. Victoria S. Motelika – investigation of the current state of the issue; editing and refinement of the text.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Жаналиев Б. Б., Кудайбергенов Н. Б. Проблемы применения современных нормативных документов для расчета транспортных сооружений. *Архитектура, строительство, транспорт.* 2024;(1):116–122. https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122
2. Левашев А. Г., Михайлов А. Ю. Состояние методов расчета регулируемых пересечений. *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2003;(3-4):71–76. Режим доступа: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2003/3_4.
3. Боровской А. Е., Шевцова А. Г. Методы определения потока насыщения автотрассы. *Мир транспорта.* 2013;(3):44–51. URL: https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/376.
4. Лихачев Д. В., Дорохин С. В. Исследование процесса ввода специализированной лево-поворотной фазы регулирования. *Мир транспорта и технологических машин.* 2018;(2):40–47. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35384490_12001931.pdf.

5. Морозов В. В. Решение проблемы образования транспортных заторов путем использования АСУДД в г. Тюмень. В сб.: *Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича, Тюмень, 15–16 октября 2015 г.* Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет; 2015. Т. III. С. 257–262.
6. Баните А. В., Деряга Д. С., Леоненко О. В. Совершенствование городской транспортной системы путем внедрения адаптивных систем управления дорожным движением. *Автоматика на транспорте.* 2021;7(4):565–583. URL: https://atjournal.ru/ru/nauka/issue/5099/view#issue-rubrics.
7. Кременец Ю. А., Печерский М. П., Афанасьев М. Б. *Технические средства организации дорожного движения*. Москва: Академкнига; 2005. 279 с. URL: https://djvu.online/file/eoke6HJUnFkdJ.
8. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington DC: The National Academies Press; 2022. https://doi.org/10.17226/26432
9. Цариков А. А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения.* 2009;(3–4):118–123. URL: https://www.usurt.ru/vestnik/arxiv/002_1_20_3_1.pdf.
10. Власов А. А. *Теория транспортных потоков*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2014. 123 с.
11. Pan Jia-Xiu, Xue Yu, Liang Yu-Juan, Tang Tie-Qiao. Effect of road structure on the capacity of a signalized road intersection. *Chinese Physics B.* 2009;18(10):4169–4176. https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/10/016
12. Hongqiang Li, Dianhai Wang, Zhaowei Qu. Research on the optimal method of cycle length for signalized intersection. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportaion Engineering*. 2004. P. 371–376. https://doi.org/10.1061/40730(144)70
13. Shepelev V., Glushkov A., Gritsenko A., Gritsenko A., Nevolin D. Vorobyev A. Assessing the traffic capacity of urban road intersections. *Frontiers in Built Environment.* 2022;8:968846. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.968846
14. Дрю Д. *Теория транспортных потоков и управление ими.* Москва: Транспорт; 1972. 424 с.
15. Андронов Р. В., Леверинц Е. Э. Расчет методом Монте-Карло задержек транспортных средств на изолированном регулируемом пересечении при его работе на высоких уровнях загрузки. *Вестник гражданских инженеров.* 2017;(1):221–226. URL: https://vestnik.spbgasu.ru/article/raschet-metodom-monte-karlo-zaderzhek-transportnyh-sredstv-na-izolirovannom-reguliruemom.
16. Сильянов В. В. *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения*. Москва: Транспорт; 1977. 303 с.
17. Морозов Г. Н., Морозов В. В., Фадюшин А. А., Мерданов Ш. М. Влияние остаточной автотранспортной очереди на процесс движения автомобилей на городских регулируемых пересечениях. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(1):89–97. https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-89-97
18. Морозов В. В. Повышение эффективности организации дорожного движения методом отнесенного левого поворота. *Архитектура, строительство, транспорт.* 2023;(3):72–80. https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-3-72-80

References

1. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Zhanaliev B. B., Kudaibergenov N. B. Issues of application of modern regulatory documents for the calculation of transportation structures. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(1):116–122. (In Russ.) https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122
2. Levashev A. G., Mikhaylov A. Yu. Status of methods for calculating regulated intersections. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = iPolytech Journal.* 2003;(3-4):71–76. (In Russ.) URL: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2003/3_4.
3. Borovskoy A. E., Shevtsova A. G. Methods of determination of saturation flow of a motor way. *World of Transport and Transportation*. 2013;(3):44–51. (In Russ.) URL: https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/376.
4. Likhachev D. V., Dorokhin S. V. Investigation of the process of the introduction of a specialized left-turning phase of regulation. *The world of transport and technological machinery*. 2018;(2):40–47. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35384490_12001931.pdf.
5. Morozov V. V. Solving the problem of traffic congestion by using ASUDD in the city of Tumen. In: *Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya Kosukhina Anatoliya Nikolayevicha, Tyumen, October 15–16, 2015*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2015. Vol. III. P. 257–262.
6. Banite A. V., Deriaga D. S., Leonenko O. V. Improvement of the urban transportation system by the introduction of adaptive traffic control systems. *Automation on Transport.* 2021;7(4):565–583. (In Russ.) URL: https://atjournal.ru/ru/nauka/issue/5099/view#issue-rubrics.
7. Kremenets Yu. A., Pecherskiy M. P., Afanas'yev M. B. *Technical means of road traffic organization.* Moscow: Akademkniga; 2005. (In Russ.) URL: https://djvu.online/file/eoke6HJUnFkdJ.

8. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis.* Washington DC: The National Academies Press; 2022. https://doi.org/10.17226/26432
9. Tsarikov A. A. The development of calculation methods of regulated junctions on the street network. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2009;(3–4):118–123. (In Russ.) URL: https://www.usurt.ru/vestnik/arxiv/002_1_20_3_1.pdf.
10. Vlasov A. A. *Theory of traffic flows*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2014. (In Russ.)
11. Pan Jia-Xiu, Xue Yu, Liang Yu-Juan, Tang Tie-Qiao. Effect of road structure on the capacity of a signalized road intersection. *Chinese Physics B*. 2009;18(10):4169–4176. https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/10/016
12. Hongqiang Li, Dianhai Wang, Zhaowei Qu. Research on the optimal method of cycle length for signalized intersection. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportaion Engineering*. 2004. P. 371–376. https://doi.org/10.1061/40730(144)70
13. Shepelev V., Glushkov A., Gritsenko A., Gritsenko A., Nevolin D. Vorobyev A. Assessing the traffic capacity of urban road intersections. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:968846. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.968846
14. Drew D. R. *Traffic flow theory and control.* New York: McGraw-Hill; 1968.
15. Andronov R. V., Leverenz E. E. Calculation of vehicles` delay at an isolated regulated intersection characterized with a high value of traffic load coefficient using the Monte Carlo technique. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers.* 2017;(1):221–226. (In Russ.) URL: https://vestnik.spbgasu.ru/article/raschet-metodom-monte-karlo-zaderzhek-transportnyh-sredstv-na-izolirovannom-reguliruemom.
16. Silyanov V. V. *Theory of transport flows in road design and traffic organization*. Moscow: Transport; 1977. (In Russ.)
17. Morozov G. N., Morozov V. V., Fadyushin A. A., Merdanov Sh. M. Influence of residual vehicle queue on the process of vehicle traffic at urban regulated intersections. *Architecture, Construction, Transport.* 2024;(1):89–97. (In Russ.) https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-89-97
18. Morozov V. V. Improving the efficiency of traffic organization by the method of the offset left turn. *Architecture, Construction, Transport.* 2023;(3):72–80. (In Russ.) https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-3-72-80

Информация об авторах

Андронов Роман Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, andronovrv@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0002-1418-3587

Леверец Евгений Эдуардович, старший преподаватель кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, leverentsee@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6574-8456

Гензе Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, genzeda@tyuiu.ru, https://orcid.org/0009-0007-4017-7627

Легостаева Елена Николаевна, ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, legostaevaen@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2778-7547

Мотелика Виктория Сергеевна, обучающийся, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, viktoria.mot@mail.ru

Information about the authors

Roman V. Andronov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, andronovrv@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0002-1418-3587

Evgeny E. Leverents, Senior Lecturer in the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, leverentsee@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0001-6574-8456

Dmitriy A. Genze, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, genzeda@tyuiu.ru, https://orcid.org/0009-0007-4017-7627

Elena N. Legostaeva, Assistant in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, legostaevaen@tyuiu.ru, https://orcid.org/0000-0003-2778-7547

Victoria S. Motelika, Student, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, viktoria.mot@mail.ru

Получена 08 мая 2024 г., одобрена 02 декабря 2024 г., принята к публикации 01 февраля 2025 г.
Received 08 May 2024, Approved 02 December 2024, Accepted for publication 01 February 2025