

УДК 625.7
doi:10.18720/SPBPU/2/id24-527

Талавирия Александр Юрьевич¹,
мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук;
Ласкин Михаил Борисович²,
гл. науч. сотр., д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, доцент

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕВЕРСИВНОГО ПВП ПЛАТНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

¹ Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, a.talavirya@yandex.ru;

² Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, laskin.m@iias.spb.su

Аннотация. Строительство платных дорог, их технические и проектные решения зависят от конфигурации имеющихся земельных участков. Ограничения по площади иногда не позволяют построить пункт взимания платы (далее – ПВП) с высокой пропускной способностью и большим количеством полос. В таких случаях может быть рассмотрена конфигурация ПВП с реверсивными полосами. Задача состоит в выборе оптимальной конфигурации ПВП с минимальным риском образования дорожных заторов. В настоящей статье оценивается пропускная способность реверсивного ПВП при различных конфигурациях и параметрах транспортного потока. Применяется дискретно-событийное имитационное моделирование в программной среде AnyLogic. Полученные результаты показывают оптимальную конфигурацию реверсивных полос и объясняют, какие параметры транспортного потока влияют на их пропускную способность.

Ключевые слова: система взимания платы за проезд, платная дорога, платный участок, дискретно-событийное моделирование, заторы на дорогах.

*Alexander Yu. Talavirya*¹,
Junior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences;
*Mikhail B. Laskin*²,
Chief Researcher,
Doctor of Economics, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

SIMULATION MODELLING OF REVERSIBLE TOLL PLAZA

¹ St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia, a.talavirya@yandex.ru;

² St. Petersburg Federal Research Centre of RAS, St. Petersburg, Russia,
laskin.m@iiias.spb.su

Abstract. The construction of toll roads, their technical and design solutions depend on the configuration of available land plots. Space constraints sometimes do not allow the construction of a toll station with high capacity and a large number of lanes. In such cases, a reversible lane configuration may be considered. Reversible lanes allow traffic to pass through and help to optimize traffic flow. The challenge is to select the optimal configuration of the lines, that provides the highest capacity (traffic can flow in both directions) and minimizes the risk of congestion. This paper evaluates the capacity of a reversible lane with different configurations and traffic flow parameters. The study uses discrete event simulation modelling in AnyLogic software environment. The results obtained show the optimal configuration of reversible lanes and explain which traffic flow parameters affect their capacity. The paper concludes with practical recommendations on the effective application of simulation modelling in the operation and optimization of Toll Plaza traffic.

Keywords: discrete-event simulation, toll road, toll plaza, toll collection system, traffic congestion.

Введение

Строительство платных дорог в России стремительно развивается в последние 15 лет. Создана обширная сеть скоростных и внутригородских участков платных дорог. Технические решения по сбору платы за проезд различны и включают в себя адаптацию типовых решений к транспортным, климатическим и социально-географическим особенностям регионов. Несмотря на развитие технологии «free flow toll collection», дорожные проекты с использованием классических барьерных ПВП широко распространены, чем и объясняется актуальность настоящей статьи. Авторами ранее в статьях [1–3] рассмотрены основные виды ПВП (съезд, прямой ход, съезд и светофорный объект на выезде). Мы оценили возможные дорожные ситуации, приводящие к возникновению заторов. Исследовали пропускную способность ПВП и определили значения пороговых интенсивностей движения, влияющих на дорожную ситуацию.

1. Постановка задачи

Типы ПВП, рассмотренные в наших предыдущих исследованиях [1–3] имели фиксированное количество полос движения. В данной работе мы

рассматриваем другой тип – ПВП реверсивного типа. Такой тип может быть использован в стесненных городских условиях, а также в регионах, где невозможно разместить полноценный ПВП из-за ограничений по землеотводу.

Цель исследования:

- построить имитационную модель (далее – ИМ) ПВП с реверсивными полосами движения;
- оценить пропускную способность реверсивного ПВП с различным количеством активных полос и различными конфигурациями полос движения;
- оценить долю пользователей электронной системы взимания платы (ЭСВП), которая позволит транспортному потоку проходить через ПВП без заторов.

2. Обзор литературы

Большое количество исследований по оценке эффективности платных дорог свидетельствует о растущем исследовательском интересе к проблеме оценки качества управления ПВП по всему миру. В [7, 8] изучались ПВП на проектах в Индии. Важность поведения водителя как фактора, влияющего на пропускную способность ПВП, рассматривалась в [1]. Применение ЭСВП в качестве средства повышения эффективности работы ПВП рассматривается в проектах платных дорог в Тайване [5], Корее [6] и Индии [7]. Авторы [9] изучили транспортный поток на платной дороге с ПВП с ручной и автоматической оплатой проезда. Работа [10] посвящена изучению транспортного потока, проходящего через ПВП, в виде гидродинамической модели, способной описать его плотность и эволюцию при прохождении нескольких ПВП. В исследовании [11] был представлен метод управления, основанный на конфигурации полос ПВП. В работе [12], для проекта в Сербии была представлена новая методология оптимального управления платными дорогами, объединяющая рекуррентные нейронные сети, теорию массового обслуживания и метаэвристику. Основной проблемой, связанной с эффективностью взимания платы на ПВП барьерного типа, являются заторы на дорогах. Этой проблеме посвящена статья [13]. В исследовании [14] изучалось, как растут заторы в зоне выезда с ПВП. В исследовании [15] представлена модель очередей для оценки профилей времени ожидания и длины очереди. Количественная оценка общей задержки транспортного потока, проходящего через зону ПВП представлена в исследованиях [16, 17]. Существует лишь несколько работ, посвященных изучению реверсивных ПВП. Например, исследование [18], в котором изучаются различные значения интенсивности прямого и обратного движения через ПВП.

3. Построение имитационной модели ПВП

3.1. Технологические особенности ПВП

Реверсивный ПВП имеет несколько платных полос, которые могут взимать плату за проезд в обоих направлениях движения. Реверсивные платные полосы могут работать в одном или нескольких режимах взимания платы: автоматический (ЭСВП), ручной или смешанный. Пример схемы расположения полос реверсивного ПВП показан на рис. 1. Направление движения транспортных средств показано стрелками. Полосы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18 являются реверсивными. В каждом направлении может работать от 6 до 12 полос. В случае шести полос движение будет осуществляться от полосы 7 до полосы 12 в одном направлении, от полосы 19 до полосы 24 – в противоположном направлении. В случае двенадцати полос движение будет осуществляться от полосы 1 до полосы 12 в одном направлении, от полосы 13 до полосы 24 в противоположном направлении.

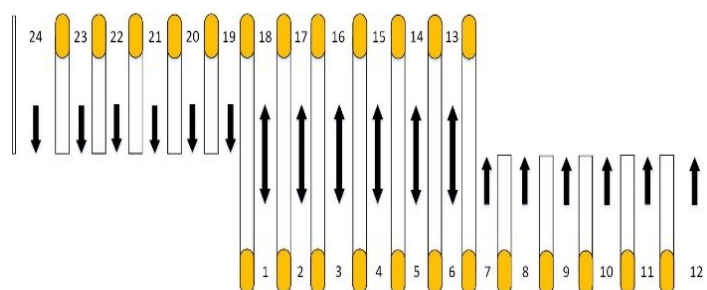


Рис. 1 Пример реверсивной схемы организации полос движения ПВП с 24 полосами

Ограничение: ПВП не может эффективно функционировать при высокой интенсивности транспортного потока в прямом и обратном направлениях за один период. Технологические особенности ПВП приводят нас к проблеме выбора оптимального количества функционирующих полос для каждого направления движения, обеспечивающего максимальную интенсивность транспортного потока с заданными параметрами в обоих направлениях.

3.2. Имитационная модель и выбор конфигурации ПВП

Для проведения экспериментов разработана ИМ с 18 физическими и 24 логическими платными полосами. Очевидно, что достаточно проанализировать работу ПВП в одном направлении движения. На рисунке 2 показан общий вид ИМ для реверсивного ПВП.

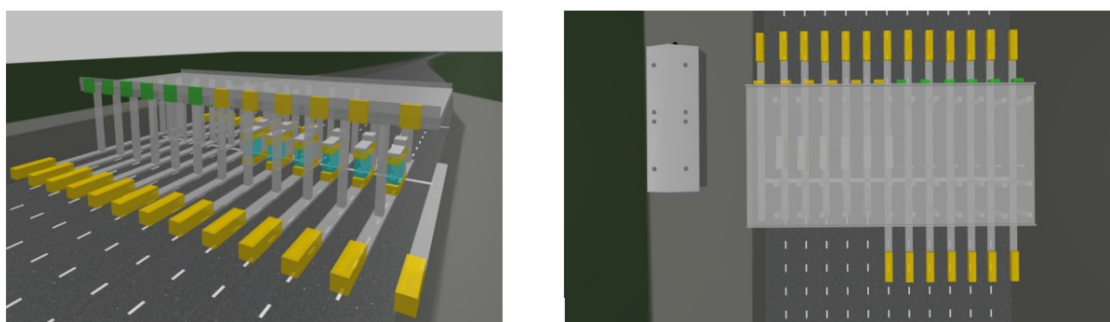


Рис. 2. Общий вид (слева) и вид сверху (справа) разработанного СМ реверсивного ПВП

Имитационная модель (см. рис. 2) реверсивного ПВП выполнена с соблюдением параметров и пропорций проектируемого ПВП. Это позволяет проводить предварительные имитационные расчеты на этапах проектно-изыскательских работ и проектирования. В зависимости от полученных параметров и результатов имитационного моделирования проектные решения могут быть скорректированы для улучшения транспортных характеристик ПВП.

3.3. Оценка предельных возможностей реверсивного ПВП

Разработанная ИМ реверсивного ПВП позволяет учитывать следующие параметры:

- 1) интенсивность движения на ПВП;
- 2) состав движения;
- 3) распределение транспортных средств по способам оплаты;
- 4) количество действующих платных полос;
- 5) режимы работы полос;
- 6) время автоматического обслуживания полос;
- 7) время обслуживания полосы в ручном режиме;
- 8) дополнительные параметры (поведение пользователя).

Подробное описание параметров ИМ приведено в исследовании [1]. Для проведения имитационных экспериментов для реверсивного ПВП были зафиксированы значения параметров ИМ № 2, 3, 6, 7, 8 распределение транспортных средств по классам: легковые – 75 %, большегрузные – 5 %, средние грузовые – 20 %; доля пользователей ЭСВП – 70 %; влияние поведения пользователей – 5 %. В ходе имитационных экспериментов изменялись значения параметров № 1, 4, 5. Конфигурация ПВП задается количеством платных полос и режимом их работы. В ИМ предусмотрено наличие двух ручных полос (одна – резервная). На рис. 3 приведены все конфигурации реверсивных ПВП в одном направлении автомагистрали с соответствующими номерами, для которых указано количество полос с ручным управлением и ЭСВП (в строках «Число полос») и номера полос (в строках «Номера полос»). Номера полос в столбце «Номера полос» соответствуют номерам полос на рисунке 1.

Для того оценки пропускной способности реверсивного ПВП было проведено 23 группы экспериментов для определения пороговой интенсивности транспортного потока, при которой на ПВП начинают образовываться заторы. Каждая группа экспериментов включала анализ работы конфигурации ПВП при возрастающей интенсивности транспортного потока в диапазоне от 250 до 3500 автомобилей/ч с шагом 10 автомобилей/ч. Продолжительность наблюдений каждого эксперимента – 1 час. Результаты экспериментов по оценке предельной пропускной способности реверсивного ПВП представлены на рис. 4.

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12
Конфигурация 3	Число полос Номера полос	4 9-12

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12
Конфигурация 3	Число полос Номера полос	4 9-12
Конфигурация 4	Число полос Номера полос	5 8-12

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12
Конфигурация 3	Число полос Номера полос	4 9-12
Конфигурация 4	Число полос Номера полос	5 8-12

Конфигурация	Ручные полосы	ЭСВП полосы
Конфигурация 1	Число полос Номера полос	2 11-12
Конфигурация 2	Число полос Номера полос	3 10-12
Конфигурация 3	Число полос Номера полос	4 9-12
Конфигурация 4	Число полос Номера полос	5 8-12
Конфигурация 5	Число полос Номера полос	6 7-12

Рис. 3. Конфигурации односторонних реверсивных ПВП с 6,7,8,9,10,11,12 полосами в одном направлении

Номер эксперимента	Число полос	Конфигурация полос	Интенсивность входного потока
23	12	6 ЭСВП; 6 РУЧН	1070
22	12	7 ЭСВП; 5 РУЧН	1010
21	12	8 ЭСВП; 4 РУЧН	930
20	12	9 ЭСВП; 3 РУЧН	830
19	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	780
18	11	6 ЭСВП; 5 РУЧН	980
17	11	7 ЭСВП; 4 РУЧН	910
16	11	8 ЭСВП; 3 РУЧН	840
15	11	9 ЭСВП; 2 РУЧН	750
14	10	5 ЭСВП; 5 РУЧН	970
13	10	6 ЭСВП; 4 РУЧН	860
12	10	7 ЭСВП; 3 РУЧН	830
11	10	8 ЭСВП; 2 РУЧН	750
10	9	5 ЭСВП; 4 РУЧН	950
9	9	6 ЭСВП; 3 РУЧН	820
8	9	7 ЭСВП; 2 РУЧН	710
7	8	4 ЭСВП; 4 РУЧН	860
6	8	5 ЭСВП; 3 РУЧН	800
5	8	6 ЭСВП; 2 РУЧН	700
4	7	4 ЭСВП; 3 РУЧН	810
3	7	5 ЭСВП; 2 РУЧН	710
2	6	3 ЭСВП; 3 РУЧН	800
1	6	4 ЭСВП; 2 РУЧН	710

Рис. 4. Результаты экспериментов по оценке предельной пропускной способности реверсивного ПВП

В колонке «конфигурация полос» «ЕТС» означает количество автоматических полос, а «М» – количество ручных платных полос. Пороговая интенсивность для каждой конфигурации ПВП варьируется от 710 до 1070 автомобилей/ч. Результаты экспериментов показывают, что при недостаточной доле пользователей ЭСВП в потоке на ПВП образуются заторы, из-за накопления очередей на ручных платных полосах. Пример очереди на ручных полосах показан на рисунке 5.

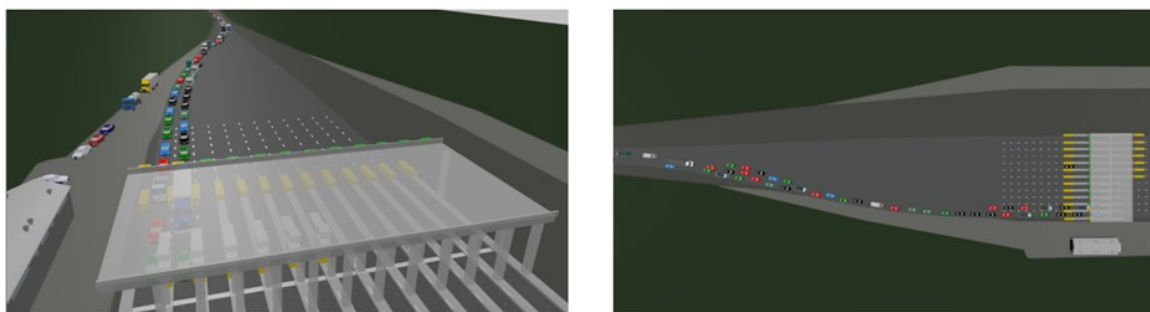


Рис. 5. Образование заторов на полосах ручной оплаты реверсивного ПВП (общий вид)

Проведено 5 групп экспериментов по оценке влияния параметра доли пользователей ЭСВП на образование заторов перед реверсивным ПВП. Для эксперимента выбрана конфигурация ПВП с максимальным (12) количеством функционирующих полос, 10 – в режиме ЭСВП, 2 – в ручном режиме. Результаты приведены на рис. 6. При разработке ИМ ПВП ключевыми являются два показателя: длина очереди и время ожидания в очереди. Для расчета длины очереди и времени ожидания могут быть применены классические методы теории массового обслуживания. Вывод необходимых формул, применяемый математический аппарат и численные методы подробно описаны в [1–3]. В сложных случаях, например, при построении ИМ, включающей несколько транспортных объектов, таких как ПВП, следующий за ним регулируемый светофорный объект, могут быть использованы методы машинного обучения. Пример такого объекта рассмотрен авторами в [3].

Номер эксперимента	Число полос	Конфигурация полос	Интенсивность без образования затора	Интенсивность начала образования затора	Интенсивность с образованием затора	Процент пользователей ЭСВП
29	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	затора нет	затора нет	95%
28	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	затора нет	затора нет	90%
27	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	1690	3500	85%
26	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	1040	1500	80%
25	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	880	1500	75%
24	12	10 ЭСВП; 2 РУЧН	250	780	1500	70%

Рис. 6. Оценка доли ЕТС, позволяющей транспортным средствам проезжать через ПВП без образования заторов. Результаты экспериментов

Как видно из рис. 4 и 6, при доле ЭСВП 70 % при любой конфигурации реверсивного ПВП образуется затор при скорости потока 1500 автомобилей/ч. Из рис. 6 также видно, что увеличение доли ЭСВП до 75–80 % не решает проблему образования заторов при скорости потока 1500 автомобилей/ч. При доле ЭСВП, равной 85 %, устойчивый затор образуется при скорости потока 3500 автомобилей/ч. Только при значениях 90–95 % доли ЭСВП заторы не возникают для рассматриваемой конфигурации реверсивного ПВП, т. е. оставшихся 5–10 % транспортных средств недостаточно для образования заторов на ручных полосах.

Заключение

ИМ реверсивного ПВП, рассмотренная в данном исследовании, показывает, что способами увеличения пропускной способности ПВП являются:

- увеличение количества функционирующих полос;
- изменение конфигурации ПВП (доля ЭСВП и полос с ручной оплатой);
- увеличение доли пользователей ЭСВП в транспортном потоке.

Для оценки рисков заторов целесообразно применять индивидуальную ИМ для каждого пункта взимания платы, учитывая особенности его географического положения, удаленность от городских агломераций, состав трафика на объекте, а также влияние окружающей транспортной, логистической и социальной инфраструктуры. При расположении ПВП в ярко выраженных промышленных и логических зонах города, а также в приграничных зонах между городом и областью, для анализа пропускной способности ПВП может потребоваться дополнительная оценка интенсивности движения в различных условиях с учетом суточной, недельной и сезонной неравномерности потока. Дальнейшим направлением исследований для нас является изучение соотношения плотности потока и скорости потока на бесплатных участках платных дорог, поскольку, как следует из результатов работы [19], снижение скорости потока из-за увеличения плотности потока также может привести к образованию заторов на ПВП.

Список литературы

1. Talavirya A., Laskin M. Discrete-event modelling of the capacity of the toll collection exit point and the formation of congestion // *International Journal of Simulation and Process Modelling*. – 2021. – Vol. 17. – Nos. 2-3. – Pp.150–165.
2. Talavirya A., Laskin M. Simulation modeling of toll plaza operation at the main direction of the intra urban toll road // *Information and communication*. – 2020. – Vol. 5. – Pp. 67–77.
3. Talavirya A., Laskin M., Dubgorn A. Application of simulation modeling to assess the operation of urban toll plazas // *Simulation Modeling – Recent Advances, New Perspectives, and Applications*. – 2023. – DOI:<https://doi.org/10.5772/intechopen.1002003>.
4. Navandar Y. V., Patel D. A., Dhamaniya A., Velmurugan S., Bari Ch. Users perception based service quality analysis at toll plazas using structural equation modeling // *Case Studies on Transport Policy*. – 2023. – Vol. 13. – Paper 101053. – DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101053>.
5. Tseng P.-H., Pilcher N. Political and technical complexities of electronic toll collection: Lessons from Taiwan // *Case Studies on Transport Policy*. – 2022. – Vol. 10. – DOI:[10.1016/j.cstp.2022.01.005](https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.005).
6. Chang M.-S., Oh Y.-T., Kang K.-W., Jung H.-W. Evaluations and improvements of the Korean highway electronic toll system // *IATSS Research*. – 2002. – Vol. 26, Iss. 1. – Pp. 37–44. – DOI:[10.1016/S0386-1112\(14\)60080-7](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60080-7).
7. Chintaman B., Ashish D., Satish C. Drivers' willingness to shift towards electronic toll collection system in India // *Case Studies on Transport Policy*. – 2023. – Vol. 13. – Paper 101046. – ISSN 2213-624X. – DOI:[10.1016/j.cstp.2023.101046](https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.101046).

8. Bari Ch. S., Chandra S., Dhamaniya A., Arkatkar Sh., Navandar Yo. V. Service time variability at manual operated tollbooths under mixed traffic environment: Towards level-of-service thresholds // *Transport Policy*. – 2021. – Vol. 106. – Pp. 11–24. – ISSN 0967-070X. – DOI:10.1016/j.tranpol.2021.03.018.
9. Komada K., Masukura S., Nagatani T. Traffic flow on a toll highway with electronic and traditional tollgates // *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications – PHYSICA A*. – 2009. – Vol. 388. – Pp. 4979–4990. – DOI:10.1016/j.physa.2009.08.019.
10. Marasco A. Nonlinear hydrodynamic models of traffic flow in the presence of toll-gates // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2002. – Vol. 35, Issues 5–6. – Pp. 549–559. – ISSN 0895-7177. – DOI:10.1016/S0895-7177(02)80020-6.
11. Naitong Y., Minghui M., Shidong L., Wenjie W., Hu Z. Optimal control method of freeway based on tollbooths lane configuration and variable speed limit control // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022 – Vol. 603. – Paper 127801. – ISSN 0378-4371 – DOI:10.1016/j.physa.2022.127801.
12. Petrovic A., Delibašić B., Nikolić M., Bugaric U., Lio P. Controlling highway toll stations using deep learning, queuing theory, and differential evolution // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2022. – Vol. 119. – DOI:10.1016/j.engappai.2022.105683.
13. Takashi N. Traffic jam at adjustable tollgates controlled by line length // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2016. – Vol. 442. – Pp. 131–136. – ISSN 0378-4371. – DOI:10.1016/j.physa.2015.09.051.
14. Binbin C., Wei Li. Improving highway traffic performance: Merging pattern design of a departure zone after tollbooths or ETC // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2022. – Vol. 608, Part 1. – Paper 128251. – ISSN 0378-4371. – DOI:10.1016/j.physa.2022.128251.
15. Andrea P., Raffaele M., A multi-class time-dependent model for the analysis of waiting phenomena at a motorway tollgate // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. – 2021. – Vol. 8, Iss. 2. – Pp. 237–256. – ISSN 2095-7564. – DOI:10.1016/j.jtte.2020.09.001.
16. Chintaman B., Yogeshwar N., Ashish D. Delay modelling at manually operated toll plazas under mixed traffic conditions // *International Journal of Transportation Science and Technology*. – 2020. – Vol. 11. – DOI:10.1016/j.ijtst.2020.10.001.
17. Chintaman B., Satish C., Ashish D. Estimation of system delay based toll equivalency factors at toll plazas using simulation // *International Journal of Transportation Science and Technology*. – 2023. – Vol. 12, Iss. 3. – Pp. 822–835. – ISSN 2046-0430. – DOI:10.1016/j.ijtst.2022.08.002.
18. Kumar A., Thakare A., Tawalare A. Strategy to reduce queuing time at toll plaza // In: T. Mathew, G. Joshi, N. Velaga, S. Arkatkar (eds.) *Transportation Research. Lecture Notes in Civil Engineering*. – Singapore: Springer, 2020. – Vol. 45. – Pp. 453–464. – DOI:10.1007/978-981-32-9042-6_36.
19. Gasnikov A. V., Klenov S. L., Nurminsky E. A., Kholodov Ya. A., Shamray N. B. *Introduction to mathematical modeling of traffic flows: tutorial*. – 2nd ed. – Moscow, 2013.