

ШЛЯХИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Єресов В.І., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна
Григор'єва О.В., Національний транспортний університет, Київ, Україна

WAYS OF RESEARCH STABILITY OF TRAFFIC FLOW

Yeresov V.I., Ph. D., National Transport University, Kyiv, Ukraine
Grygoryeva O.V., National Transport University, Kyiv, Ukraine

ПУТИ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Єресов В.И., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина
Григорьева О.В., Национальный транспортный университет, Киев, Украина

Вже досить довгий час проблема автомобільного руху являється однією з найважливіших для мегаполісів. Масивні та тривалі затори на дорогах все частіше стають причиною не лише часових, але і економічних втрат. Відомо, що заторовим явищам притаманна властивість гістерезису, тобто таким явищам значно легше запобігти, ніж потім ліквідувати [1]. Тому дедалі актуальнішим стає питання вивчення механізму утворення заторів.

Більшість математичних моделей не можуть коректно описати ні фізику переходу від вільного до щільного потоку, ні основних властивостей його структур, що виникають в результаті [2]. Відомо, що зрозуміти фізичну сутність транспортних процесів такого роду можна лише виходячи з аналізу емпіричних даних. З розвитком інформаційних технологій це стає дедалі реальнішим – починаючи з середини 90-х років в США, Німеччині виникають альтернативні теорії транспортного потоку [3], серед яких особливої уваги заслуговує "теорія трьох фаз", розроблена німецьким вченим Борисом Кернером, що здатна пояснити властивості і трансформації просторово-часових структур в щільних транспортних потоках. Слід підкреслити, що враховуючи подальше завдання дослідження, авторів цікавить перш за все питання утворення та існування заторів в транспортному потоці.

Відповідно Б. Кернеру [4,5] існують три фази транспортного потоку (фазою називають певний стан транспортного потоку, що розглядається у часі і просторі):

- 1) вільний потік (*free flow* – фаза *F*);
- 2) синхронізований потік (*synchronized flow* – фаза *S*);
- 3) широкий рухомий кластер (*wide moving jams* – фаза *J*) – локальний рухомий затор.

Вільний потік – фаза *F*

У вільному потоці досить малої щільності водії можуть вільно рухатися з бажаною швидкістю. Емпіричні дані зображені на рис.1 відображають зв'язок між інтенсивністю транспортного потоку N (авт./год) і щільністю q (авт./км)

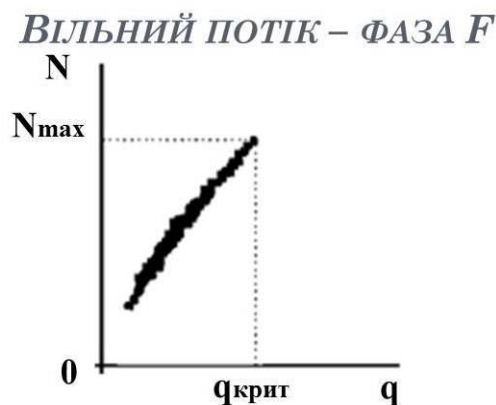


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності руху від щільності у вільному транспортному потоці

Залежність інтенсивності від щільності для вільного потоку обмежена максимальним значенням величини інтенсивності N_{max} і відповідним критичним значенням щільності q_{max} , які можуть бути досягнуті у вільному транспортному потоці (ця фаза принципово не відрізняється від прийнятого в, наприклад, [6] поняття "вільний рух").

Визначення фаз S і J в щільному ТП

В щільному транспортному потоці швидкість автомобілів менша, ніж мінімально можлива швидкість у вільному потоці. Це означає, що пряма з нахилом, рівним мінімальній швидкості у вільному потоці (штрихова лінія на рис. 2) розділяє всі емпіричні дані на 2 області: в лівій частині знаходяться дані, віднесені до вільного транспортного потоку, а в правій – дані, віднесені до щільного транспортного потоку.

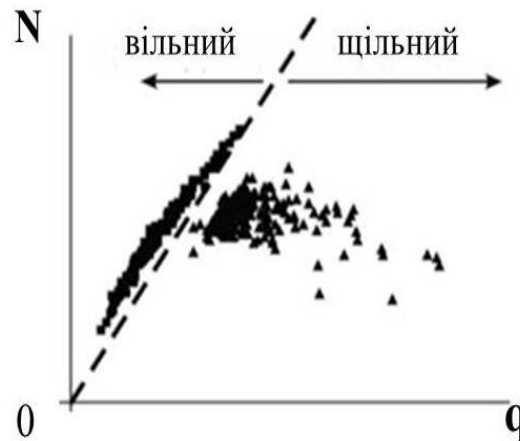


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності руху від щільності у вільному та щільному транспортному потоці

Визначення фази J: задній у напрямку руху фронт **широкого рухомого кластера** (автомобілі подібно шматочкам криги рухаються у потоці рідини), на виїзді з якого автомобілі прискорюються до синхронізованого або аж до вільного потоку, рухається у напрямку, протилежному транспортному потоку з сталою середньою швидкістю, проходячи через всі вузькі місця на автомагістралі (рис. 3). Це його характеристична властивість.

На відміну від широкого рухомого кластера, задній у напрямку руху фронт області **синхронізованого потоку** не володіє цією характеристичною властивістю. Часто задній фронт синхронізованого потоку зафіксований поблизу вузького місця, де він виникає. (Зазначимо супутньо, що йдеться про розповсюдження кінематичних хвиль у транспортному потоці, що як і затори викликані відповідними збуреннями у транспортному потоці).

ТРИ ФАЗИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

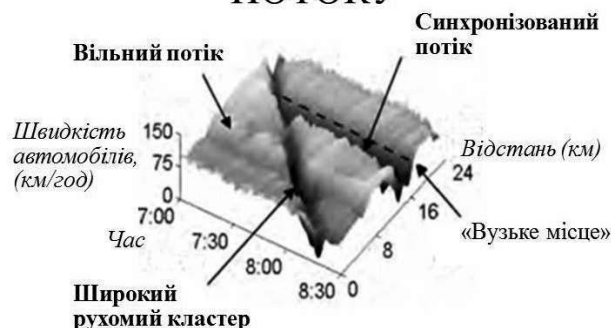


Рисунок 3 – Дані вимірів швидкостей автомобілів у просторі та часі (за Б.Кернером)

Оскільки глобальною метою дослідження є попередження заторів, вкрай цікавою є фізика фазових переходів при зміні фаз потоку.

$F \rightarrow S$ фазовий перехід

В теорії трьох фаз Кернера такий перехід пояснюється виникненням фази синхронізованого потоку (рис.4).

$F \rightarrow S$ ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД

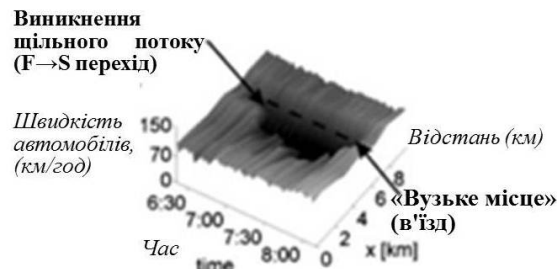


Рисунок 4 – Емпіричний приклад виникнення щільного потоку біля «вузького місця»

Синхронізований потік може виникати у вільному потоці спонтанно (спонтанний $F \rightarrow S$ перехід), або індукованим чином (індукований $F \rightarrow S$ перехід). Спонтанний перехід відбувається у випадку, коли до моменту переходу поблизу вузького місця існує вільний потік, а сам фазовий перехід відбувається в результаті зростання внутрішнього збурення транспортного потоку.

Індукований відбувається в результаті збурення, що виникає на певній відстані від вузького місця, і, розповсюджуючись, досягає вузького місця. Як правило, індукований перехід пов'язаний з розповсюдженням у напрямку проти потоку області синхронізованого потоку або широкого рухомого кластера, що вже виникли поблизу наступного по ходу руху вузького місця.

Кернер пояснює природу $F \rightarrow S$ переходу за допомогою "змагання" у часі і просторі двох протилежних процесів (рис.5): прискорення автомобіля при обгоні повільнішого автомобіля попереду (так зване «переприскорення»), і у випадку, коли обгін неможливий, гальмування автомобіля до швидкості повільнішого (т.з. «адаптація швидкості»). Переприскорення підтримує подальше існування вільного потоку, тоді як адаптація швидкості призводить до синхронізованого потоку.



Рисунок 5 – «Переприскорення» та «адаптація швидкості»

Якщо у вільному потоці поблизу вузького місця виникає локальне зменшення швидкості, то ймовірність обгону всередині такого збурення падає. Якщо це зменшення ймовірності обгону стає меншим, то $F \rightarrow S$ фазовий перехід відбувається всередині збурення; в протилежному випадку збурення затухає, і вільний стан потоку зберігається.

Якщо вихідний стан транспортного потоку відповідає синхронізованій фазі, і в цьому випадку виникає випадкове локальне збільшення швидкості, то всередині збурення ймовірність обгону зростає. Відповідно, якщо зростання ймовірності обгону перевищує критичне значення, то в області збурення відбувається зворотний $S \rightarrow F$ перехід; в протилежному випадку збурення затухає, і синхронізований потік зберігається.

Причому, спонтанний $F \rightarrow S$ перехід може відбуватися в широкому діапазоні значень інтенсивності у вільному транспортному потоці. Якщо інтенсивність буде близькою до максимальної пропускної здатності, то навіть мале збурення у вільному транспортному потоці може призвести до виникнення $F \rightarrow S$ переходу. І навпаки, для менших значень інтенсивності лише збурення великої амплітуди може призвести до $F \rightarrow S$ фазового переходу.

$S \rightarrow J$ фазовий перехід

Середня швидкість автомобілів у широкому рухомому кластері (ШРК) набагато менша порівняно зі швидкістю у вільному потоці. На задньому (у напрямку потоку) фронті кластера (рис.6) автомобілі можуть прискорюватися навіть до вільного потоку, а на передньому його фронті

автомобілі, що до нього під'їжджають, повинні сильно зменшувати свою швидкість. Інтенсивність потоку всередині кластера також значно зменшується.

ШРК не виникають у вільному потоці, але вони можуть виникати в області синхронізованого потоку (це і називається $S \rightarrow J$ фазовим переходом).

$S \rightarrow J$ ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД

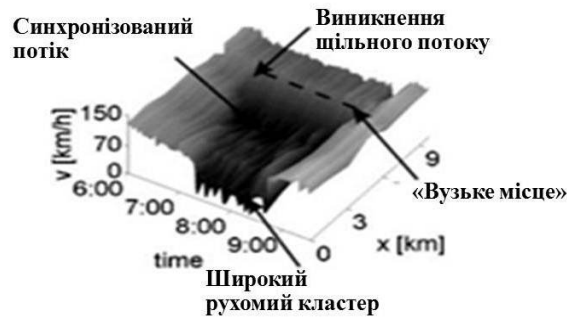


Рисунок 6 – Емпіричний приклад виникнення широких рухомих кластерів у синхронізованому потоці (за Б.Кернером)

Утворення ШРК у вільному транспортному потоці спостерігається в результаті каскаду $F \rightarrow S \rightarrow J$ фазових переходів: спочатку область синхронізованого потоку виникає всередині вільного потоку; далі, вже всередині синхронізованого потоку відбувається «стиснення» потоку, тобто щільність автомобілів зростає, а швидкість – падає, в результаті чого виникають вузькі рухомі кластери, при чому частота їх виникнення тим вища, чим вища щільність в синхронізованому потоці. По мірі зростання вузьких рухомих кластерів деякі з них трансформуються у ШРК, які далі розповсюджуються по потоку, а деякі зникають. Ці постулати безумовно можна розглядати як робочі моделі виникнення заторів, пов'язані зі стійкістю руху, оскільки в подальших дослідженнях задача зводиться до кількісної оцінки.

Рух заднього фронту ШРК можна відобразити на площині інтенсивність-щільність за допомогою прямої, названої *лінією J Кернера* (рис.7).

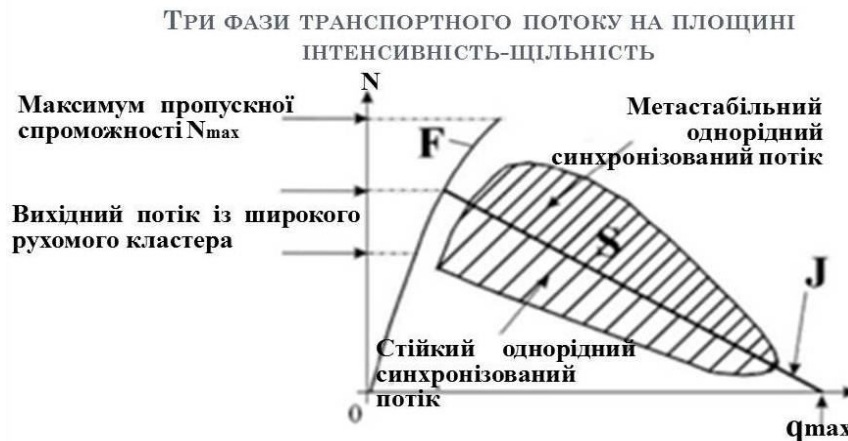


Рисунок 7 – Три фази транспортного потоку в площині інтенсивність-щільність в «теорії трьох фаз» (за Б.Кернером)

Нахил лінії J Кернера дорівнює швидкості кластера, тоді як координата перетину лінії J з віссю абсцис (при значенні інтенсивності $q = 0$) відповідає максимальній щільності у кластері. Лінія J ділить всі однорідні стани синхронізованого потоку на дві області: стани вище лінії J є **метастабільними** відносно утворення широких рухомих кластерів, в той час як стани нижче лінії J є **стійкими**.

Метастабільні стани синхронізованого потоку означають, що відносно малих збурень стан потоку залишається стійким, проте при більших збуреннях в синхронізованому потоці відбувається $S \rightarrow J$ перехід.

Висновки:

1. Теорія Кернера надає принципову можливість оцінювати стійкість транспортного потоку на базі співвідношень макро-характеристик ТП (q, ρ, v), підпорядкованих вимірюванням.
2. Застосування Теорії Кернера принципово дозволяє прогнозувати можливість утворення рухомих черг (кластерів) в усіх трьох фазах стану транспортного потоку.
3. Основні положення теорії Кернера, уявляються більш зручними з точки зору ідентифікації стану щільних потоків порівняно, наприклад, з висновками [7] або [8].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Семенов В.В. Математическое моделирование автотранспортных потоков (<http://www.trizland.ru/trizba/pdf-books/IPMreview.pdf>).
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.; Приложения : Бланк М.Л., Гасникова Е.В., Замятин А.А., Малышев В.А., Колесников А.В., Райгородский А.М.; Под ред. А.В. Гасникова — М.: МФТИ, 2010. — 360 с.
3. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке – новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий, М.: Труды МФТИ. – 2010. – Том 2, №4. – с. 75-89.
4. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin: Springer, 2009.
5. Kerner B.S. The Physics of Traffic. – Berlin: Springer, 2004.
6. Системологія на транспорті: Підручник: У 5 кн. – К.: Знання України, 2005 – Кн. IV: Організація дорожнього руху / Е.В.Гаврилов, М.Ф.Дмитриченко, В.К.Доля, О.Т.Лановий, І.Е.Линник, В.П.Поліщук. 2007. – 451 с.
7. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. Москва: Издательство „Транспорт“, 1972. 424 с.
8. Организация и безопасность движения: Учеб. пособие /И. Н. Пугачёв. – Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2004. –232 с.

REFERENCES

1. Semenov V.V. *Mathematical modeling of motor traffic flows*. [Virtual Resource], <http://www.trizland.ru/trizba/pdf-books/IPMreview.pdf> (Accessed 18 October 2005) (Rus)
2. Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminskiy Y.A., Kholodov Y.A., Shamray N.B.; Prilozheniya: Blank M.L., Gasnikova Y.V., Zamyatin A.A., Malyshev V.A., Kolesnikov A.V., Raygorodskiy A.M. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportnykh potokov* [Introduction to mathematical modeling of traffic flows] Moskow, MPTI Publ., 2010. – 360 p.(Rus)
3. Klenov S.L. *Teoriya Kernerera trekh faz v transportnom potoke – novyy tereticheskiy basis dlya intellektualnykh tekhnologiy* [Kerner's Three-Phase Traffic Theory – a new theoretical basis for intelligent transportation technologies], Moskow: Trudy MPTI [Bulletin of of Moskow Institute of Physics and Technology State University], 2010. Tom 2, issue №4. p.75-89. (Rus)
4. Kerner B.S. Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control. – Berlin: Springer, 2009.
5. Kerner B.S. The Physics of Traffic. – Berlin: Springer, 2004.
6. Havrylov E.V., Dmytrychenko M.Ph, Dolia V.K., Lanovyi O.T., Lynnyk I.E., Polishchuk V.P.. *Systemology of transport: Pidruchnyk: U 5 kn.– Kn. IV: [Traffic organization]/ Kyiv , Znannia Ukrainy, Publ. 2007. – 451 p. (Ukr)*
7. Drew D.R. Traffic Flow Theory and Control. Moskow: Transport Publ., 1972. 424 p. (Rus)
8. Pugachev I.N. *Organizatsiya i bezopasnost dvizheniya* [Organization and safety of traffic]:– Khabarovsk: Izd-vo Khabar. gos. tekhn. un-ta Publ., 2004. 232 p. (Rus)

РЕФЕРАТ

Єресов В.І., Григор'єва О.В. Шляхи дослідження стійкості транспортного потоку./ В.І. Єресов, О.В. Григор'єва // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ – 2013. – Вип. 12.

В статті досліджуються механізми утворення заторів на автомобільних дорогах.

Об'єкт дослідження – просторово-часові властивості фазових переходів до щільних транспортних потоків.

Метод дослідження – теорія трьох фаз транспортного потоку Б.Кернера, загальні методи та положення системного аналізу.

В статті розглянуто аплікацію основних положень теорії трьох фаз в транспортному потоці запропонованої німецьким вченим Б.Кернером. Це надає можливість передбачити просторово-часові умови переходу до щільного транспортного потоку.. Показано, що в теорії Кернера виникнення

щільного транспортного потоку пояснюється як фазовий перехід від фази вільного потоку до фази синхронізованого потоку. Такий перехід може відбуватися в широкому діапазоні значень інтенсивності транспортного потоку. Проаналізовано характерні властивості виникнення фази рухомих кластерів автомобілів (рухомих заторів) в синхронізованому потоці, наведена класифікація просторово-часових структур транспортного потоку в теорії Кернера.

Результати статті можуть бути використані для подальшого дослідження і оцінки стійкості транспортного потоку на базі співвідношень макро-характеристик транспортного потоку, які підпорядковуються вимірюванням.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТРАНСПОРТНИЙ ПОТІК, ФАЗА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ, СИНХРОНІЗОВАНИЙ ПОТІК, ШИРОКИЙ РУХОМИЙ КЛАСТЕР, МЕТАСТАБІЛЬНИЙ СТАН ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ, СТІЙКИЙ СТАН ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ.

ABSTRACT

Yeresov V.I., Grygoryeva O.V. Ways of research stability of traffic flow. Management of projects, system analysis and logistics. Kyiv. National Transport University. 2013. Vol. 12.

The article studies the mechanisms of the formation traffic congestion on the roads.

Object of the study - the space-time properties of phase transitions in congested traffic.

Method of the study – Three Phase Traffic Theory, methods and positions of system analysis.

This article describes the main positions of Three-Phase Traffic Theory proposed by the German scientist B.Kerner. This theory allows to explain and predict the empirical spatiotemporal properties of the transition to the congested traffic. It is shown that in the Kerner's theory emergence of the congested traffic is explained as a phase transition from the free flow phase to the synchronized flow phase. Such a transition may occur in a wide range of values of the flow rate. The article analyzes the characteristics and features of the emergence of the wide moving jam phase in the synchronized flow; it gives classification of spatiotemporal structures of traffic flow in Kerner's theory.

The results of this paper can be used for further study and research of the stability of traffic flow based on ratios of macro-characteristics of traffic flow, which are subject to measurement.

KEYWORDS: TRAFFIC FLOW, TRAFFIC FLOW PHASE, SYNCHRONIZED FLOW, WIDE MOVING JAM, METASTABLE SYNCHRONIZED FLOW, STABLE HOMOGENEOUS SYNCHRONIZED FLOW.

РЕФЕРАТ

Ересов В.И., Григорьева О.В. Пути исследования устойчивости транспортного потока. / В.И. Ересов, О.В. Григорьева // Управление проектами, системный анализ и логистика. – К.: НТУ – 2013. – Вып. 12.

В статье исследуются механизмы возникновения заторов на автомобильных дорогах.

Объект исследования – пространственно-временные свойства фазовых переходов к плотному транспортному потоку.

Метод исследования – теория трех фаз транспортного потока Б.Кернера, общие методы и положения системного анализа.

В статье рассмотрена аппликация основных положений теории трех фаз в транспортном потоке, предложенной немецким ученым Б. Кернером. Эта теория дает возможность предвидеть пространственно-временные условия перехода к плотному транспортному потоку. Показано, что в теории Кернера возникновение плотного транспортного потока объясняется как фазовый переход от фазы свободного потока к фазе синхронизованного потока. Такой переход может происходить в широком диапазоне значений интенсивности транспортного потока. Проанализированы характерные свойства возникновения фазы движущихся кластеров автомобилей (движущихся заторов) в синхронизованном потоке, приведена классификация пространственно-временных структур транспортного потока в теории Кернера.

Результаты статьи могут быть использованы для дальнейшего исследования и оценки устойчивости транспортного потока на базе соотношений макро-характеристик транспортного потока, которые поддаются измерениям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК, ФАЗА ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА, СИНХРОНИЗОВАННЫЙ ПОТОК, ШИРОКИЙ ДВИЖУЩИЙСЯ КЛАСТЕР, МЕТАСТАБИЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА, УСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА.

АВТОРИ:

Єресов Володимир Іванович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху, e-mail: tsbdr@ukr.net, тел. +380442804885, Україна, 01010, м. Київ, вул.. Суворова 1, к.435.

Григор'єва Ольга Вадимівна, аспірантка, Національний транспортний університет, асистент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху, e-mail: tsbdr@ukr.net, тел. +380442804885, Україна, 01010, м. Київ, вул.. Суворова 1, к.435.

AUTHOR:

Yeresov Volodymyr I., Ph.D., associate professor, National Transport University, professor department of transport systems and road traffic safety, e-mail: tsbdr@ukr.net, tel. +380442804885, Ukraine, 01010, Kyiv, Suvorova str. 1, of.435.

Grygoryeva Olga V., National Transport University, National Transport University, assistant lecturer department of transport systems and road traffic safety, e-mail: tsbdr@ukr.net, tel. +380442804885, Ukraine, 01010, Kyiv, Suvorova str. 1, of.435.

АВТОРЫ:

Єресов Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, профессор кафедры транспортных систем и безопасности дорожного движения, e-mail: tsbdr@ukr.net, тел. +380442804885, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1, к.435.

Григорьева Ольга Вадимовна, аспирантка, Национальный транспортный университет, асистент кафедры транспортных систем и безопасности дорожного движения, e-mail: tsbdr@ukr.net, тел. +380442804885, Украина, 01010, г. Киев, ул. Суворова 1, к.435.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Прокудін Г.С., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Київ, Україна.

Савченко Л.В., кандидат технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри логістики, Київ, Україна.

REVIEWER:

Prokudin G.S. Ph. D., Engineering (Dr.), professor, National Transport University, professor, department of international transportations and custom control, Kyiv, Ukraine.

Savchenko L.V., Ph. D., associate professor, National Aviation University, associate professor, department of logistics, Kyiv, Ukraine.