

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.1/5

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.156

## МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОВОРОТНОГО ПОТОКУ НА РЕГУЛЬОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ

Рябушенко О. В., Просвірнін О. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** В умовах неможливості модернізації вулично-дорожньої мережі міст актуальним є завдання оптимізації та вдосконалення проектування циклів світлофорного регулювання на перехрестях, зокрема вдосконалення методів аналізу потоків насичення смуг руху. Геометричні параметри перехрестя насамперед впливають на характеристики руху виділених поворотних потоків, а отже, на величину потоку насичення. Цей фактор враховує більшість емпіричних методів, однак в методиці HCM 2000 відповідний корегувальний коефіцієнт є постійним. Для перевірки ступеня впливу радіуса траєкторії руху поворотного потоку на потік насичення виділеної смуги руху було проведено імітаційне моделювання роботи умовного регульованого перехрестя в програмі PTV VISSIM. Результати демонструють, що для виділених поворотних смуг потік насичення збільшується в разі збільшення радіуса траєкторії руху поворотного потоку, що відповідає класичній формулі Ф. Вебстера, якщо значення радіуса до 15 м. Тому корегування потоку насичення для виділених поворотних потоків в цьому разі є доцільним. Якщо рух потоку здійснюється траєкторією з більшим радіусом, потік насичення не залежить від геометрії перехрестя.

**Ключові слова:** регульоване перехрестя, транспортний потік, потік насичення, траєкторія руху, імітаційне моделювання.

**Вступ**

Забезпечення потрібної пропускної спроможності перехресть є обов'язковою умовою стійкого функціонування транспортної системи міст. Зокрема, в довіднику Федерального управління автомобільних доріг США зазначається, що недостатня пропускна спроможність перехресть є причиною понад 40 відсотків заторів [1].

Значною мірою це актуально для багатьох країн світу. ВДМ великих міст України, зокрема в межах центральної ділової частини міста, визначається недостатньою шириною проїзної частини і невеликою відстанню між перехрестями на одному рівні. Також недостатньою є кількість магістральних вулиць з широкою проїзною частиною. У містах України в умовах значного збільшення кількості транспортних засобів площа вулиць і пропускна спроможність перехресть майже не змінюється [2].

В умовах неможливості суттєвої модернізації ВДМ міст України актуальним є завдання максимального використання пропускної спроможності перехресть внаслідок удосконалення їхніх геометричних параметрів та оптимізації світлофорного регулювання. Відомо, що оптимізація параметрів циклу

світлофорного регулювання може скоротити затримки та черги транспортних засобів, збільшити пропускну спроможність перехресть та в такий спосіб підвищити якість функціонування транспортної мережі міст.

**Аналіз публікацій**

Основою методів розрахування параметрів світлофорного циклу є можлива інтенсивність руху транспортного потоку за всіма напрямками на перехресті. Як розрахунковий параметр у цьому випадку використовується потік насичення, що визначає максимальну інтенсивність роз'їзду черги транспортних засобів для певного напрямку.

В американському посібнику HCM2010 [3] потоком насичення називається інтенсивність руху, з якою транспортні засоби (ТЗ) рухаються перехрестям на зеленому сигналі світлофора без затримок. Величина потоку насичення вимірюється як кількість ТЗ, що проїхали за час дії зеленого сигналу.

Процедура визначення розрахункового потоку насичення полягає в тому, що значення так званого «ідеального потоку насичення» за еталонних умов корегується за допомогою коефіцієнтів, які враховують фактичні умови руху цього потоку на пере-

хресті. Різноманітні методики розрахунку потоку насичення відрізняються лише кількістю коригувальних коефіцієнтів та процедурою їх отримання. Наприклад, найбільш розповсюджена методика Ф. Вебстера враховує вплив ширини проїзної частини, повздовжнього ухилу дороги, розділення потоку та радіуса траєкторії руху поворотного потоку [4], тоді як у відомій американській методиці HCM2010 для корегування значення потоку насичення можуть використовуватися одинадцять коефіцієнтів [3]. Такі самі процедури корегування потоку насичення містять канадське керівництво з проектування регульованих перетинів (Canadian Capacity Guide 2008) [5] та німецьке керівництво з проектування організації вуличного руху HBS 2001 [6].

Формули для визначення коригувальних коефіцієнтів є емпіричними залежностями, що отримані їхніми авторами за результатами експериментального дослідження. Оскільки зазначені дослідження здійснювались здебільшого в минулому столітті, актуальною є їхня перевірка та уточнення, зокрема через зміну характеристик сучасних транспортних засобів.

#### Мета та постановка завдання

Натурні експериментальні дослідження впливу геометричних параметрів перехрестя на характеристики руху транспортних потоків ускладнюються через їхню нерівномірність та зазвичай трудомісткість. За допомогою сучасних програмних комплексів PTV VISSIM здійснюють спектр досліджень функціонування перехрестя методом імітаційного моделювання.

Моделювання роботи складних транспортних вузлів, зокрема регульованих перехрестя, є досить складним завданням. І якщо геометричні параметри перехрестя можуть бути досить точно відображені в моделі, то транспортний потік, що складається з технічних засобів (автомобілів, мотоциклів, автобусів тощо) складніше формалізувати алгоритмічною мовою моделі.

Перевагою програми PTV VISSIM в цьому контексті є використання сучасної психофізіологічної моделі поведінки водія (Psychophysical Action Pointmodel) у мікромоделі транспортного потоку [7].

На думку багатьох авторів, VISSIM є програмою з високою якістю моделювання руху транспортних потоків на регульованих перехрестях [8–12].

Метою цього дослідження є уточнення результатів впливу геометричних параметрів регульованого перехрестя на інтенсивність руху поворотного потоку методом імітаційного моделювання та апробація методики дослідження з використанням програмного продукту PTV VISSIM.

#### Аналіз методів корегування потоку насичення для виділеної поворотної смуги

Геометричні параметри регульованого перехрестя, зокрема радіус закруглення проїзної частини, насамперед мають впливати на тип руху поворотних потоків, зокрема тих, що рухаються з окремої смуги. Однак не всі розрахункові методики для визначення потоку насичення враховують радіус траєкторії руху поворотного потоку. Наприклад, в посібнику HCM2010 вплив поворотного потоку враховується коефіцієнтом, який в разі руху потоку праворуч вздовж виділеної смуги є постійним та становить  $f_{RT} = 0,85$  [3]. Тобто, незалежно від траєкторії руху поворотного потоку, потік насичення зменшується на 15 % від значення ідеального потоку насичення.

У процесі розрахування потоку насичення за відомою методикою Ф. Вебстера скореговане значення потоку насичення для виділених смуг руху під час повороту праворуч визначається за формулою

$$M_R = M_0 \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,525}{R}}, \quad (1)$$

де  $M_0$  – ідеальний потік насичення, авт/год;  
 $R$  – радіус повороту, м.

Таким чином, методика Ф. Вебстера демонструє, що збільшення радіуса траєкторії руху поворотного потоку буде призводити до зростання потоку насичення.

Оскільки потік насичення є максимальною інтенсивністю руху транспортних засобів, його значення також може бути визначене з умови дотримання критерію лінійної безпеки під час руху:

$$M = \frac{3600}{\tau_{\min}} = \frac{3600 \cdot V_a}{L_d}, \quad (1)$$

де  $\tau_{\min}$  – мінімальний інтервал безпеки між ТЗ, с;  $V_a$  – швидкість руху ТЗ, м/с;  $L_d$  – динамічний габарит ТЗ, м.

Динамічний габарит ТЗ можна визначити за формулою А. Ю. Врубеля:

$$L_d = 7 + V_a + 0,015 \cdot \frac{V_a^2}{\varphi}, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт зчеплення коліс ТЗ з дорогою.

Формули (1) та (2) містять швидкість руху транспортного засобу, тому потрібно проаналізувати вплив радіуса закруглення перехрестя на швидкість руху поворотного потоку криволінійною траєкторією під час повороту. Професор В. Ю. Врубель на підставі аналізу даних про рух транспортних потоків на перехрестях пропонує визначити розрахункову швидкість руху автомобіля під час повороту за залежністю

$$V_a = 0,33 \cdot \rho, \quad (3)$$

де  $\rho$  – радіусу кривизни траєкторії руху поворотних потоків, м.

З огляду на залежності (2) та (3) отримуємо формулу для розрахування потоку насичення поворотного потоку на перехресті за умовою лінійної безпеки:

$$M_R = \frac{1188 \cdot \rho}{7 + \rho \cdot \left( 0,33 + 0,016 \cdot \frac{\rho}{\varphi} \right)}. \quad (4)$$

Залежність (4) визначає потік насичення залежно від радіуса траєкторії руху транспортного потоку, тобто враховує геометрію регульованого перехрестя.

На рис. 1 наведено графічне відображення залежностей потоку насичення від радіуса траєкторії руху поворотного потоку за трьома зазначеними методиками. Значення ідеального потоку насичення було дорівнює 1900 авт/год згідно з рекомендаціями HCM2010.

Потік насичення, розрахований за умови лінійної безпеки, є найбільшим, якщо значення радіуса траєкторії поворотного потоку більше ніж 25 м, але швидко зменшується та стає найменшим за малих значеннях радіуса. Якщо радіус траєкторії руху потоків дорівнює 18 м, значення потоку насичення відповідає вимогам HCM2010. Корегування потоку насичення за методикою Ф. Вебстера призводить до поступового зростання потоку насичення за умови збільшення радіуса.

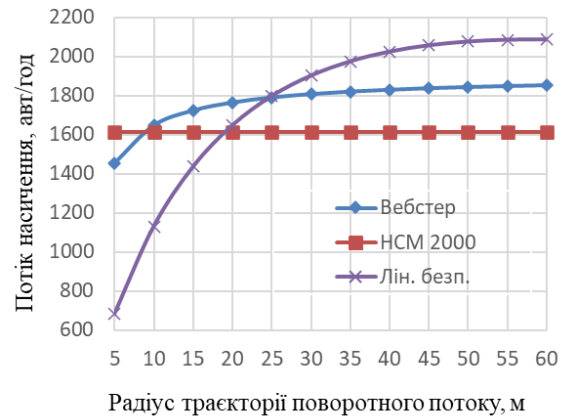


Рис. 1. Залежності розрахункового потоку насичення від радіуса траєкторії руху поворотного потоку

### Визначення потоку насичення методом імітаційного моделювання

Варто здійснити порівняльний аналіз значень потоку насичення поворотного потоку регульованого перехрестя, які отримані за емпіричними моделями з результатами імітаційного моделювання руху транспортних засобів на перехресті.

Для цього була розроблена модель умовного перехрестя в середовищі VISSIM. Під час експерименту достатньо змодельовати рух лише одного правоповоротного потоку за різних значень радіуса траєкторії руху. Для створення достатньо довгої черги автомобілів перед стоп-лінією потрібен достатньо великий обсяг вхідного потоку з відповідними параметрами циклу регулювання. Були вибрані такі параметри вхідного потоку та циклу регулювання моделі:

- 1 ізольоване перехрестя з виділеним потоком, що рухається праворуч;
- 2 режим роботи ССП є двофазний із параметрами  $t_4 = 70$  с;  $t_3 = 40$  с;  $t_{жс} = 3$  с;
- 3 транспортний потік складається з легкових автомобілів;
- 4 ширина смуги руху становить 3,5 м;
- 5 інтенсивність вхідного поворотного потоку – 10000 авт/год.

У процесі моделювання змінювався лише один параметр – траєкторія руху поворотного потоку внаслідок перебудови сполучного відрізка, який є дугою кола. Радіус траєкторії руху потоку розраховувався під час процесу вимірювання довжини та висоти хорди.

Для підрахунку автомобілів за стоп-лінією на смузі руху поворотного потоку було розміщено віртуальний детектор транспорту. Потік насичення визначався за кількістю автомобілів, що перетинають стоп-лінію

протягом 30 секунд основного такту після ввімкнення зеленого сигналу. Для кожної геометричної схеми перехрестя здійснювалось десять циклів імітації за різних значень стартового випадкового числа. Після переведення на годинну інтенсивність усереднене значення експериментального потоку насичення можна отримати за формулою

$$M_e = \frac{3600 \cdot \bar{N}_i}{30} = 12 \cdot \bar{N}_i, \quad (5)$$

де  $\bar{N}_i$  – середня кількість зафіксованих детектором ТЗ.

На рис. 2 наведено скріншот процесу імітації руху правоповоротного потоку на регульованому перехресті.

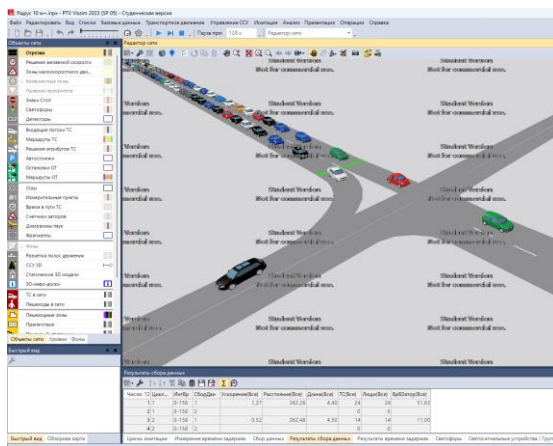


Рис. 2. Скріншот процесу моделювання

Результати аналізу пропускної спроможності перехрестя за даними роботи імітаційної моделі наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати імітаційного моделювання руху поворотного потоку

Радіус траєкторії руху поворотного потоку, м	Середня вимірювана кількість ТЗ	Потік насичення за результатами моделювання, авт/год
10	13,0	1560
15	13,9	1668
20	15,4	1848
25	16,2	1944
30	16,7	2004
35	16,1	1932
40	16,6	1992
45	16,5	1980
50	16,0	1920
55	16,6	1992
60	16,2	1944

Графічне зображення зміни потоку насичення для виділеної смуги поворотного напрямку від радіуса траєкторії руху потоку за даними імітаційного моделювання подано на рис. 3.

Експериментальні значення потоку насичення правоповоротного транспортного потоку, що рухається з виділеної смуги, збільшуються в разі збільшення радіуса траєкторії у діапазоні від 5 до 15 м.

Для значень радіуса траєкторії більше 15 м потік насичення майже не залежить від радіуса траєкторії руху поворотного транспортного потоку.

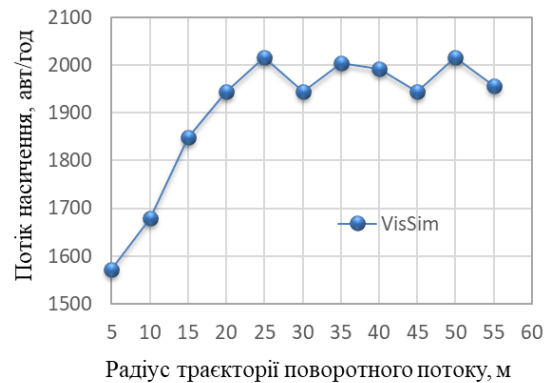


Рис. 3. Залежність потоку насичення від радіуса траєкторії руху потоку за даними імітаційного моделювання

Такий тип експериментальної залежності більше відповідає емпіричній формулі Ф. Вебстера, але отримані під час моделювання значення майже на всьому інтервалі радіусів є більшими. Необхідно також зазначити, що експериментальні значення відповідають методиці HCM2010 лише для малих значень радіуса (приблизно 5–10 м).

### Висновки

Під час імітаційного моделювання в програмі PTV VISSIM було визначено, що для виділених смуг руху поворотного потоку значення потоку насичення майже не залежать від радіуса траєкторії руху поворотного транспортного потоку, коли його значення більше ніж 15 м. Якщо значення радіуса траєкторії руху менше 15 м, відбувається зменшення потоку насичення.

Таким чином, у процесі розрахування параметрів світлофорного регулювання здійснювати корегування потоку насичення для виділених поворотних потоків доцільно лише для перехрестя з відносно малими радіусами закруглення проїзної частини. В інших випадках відповідний

корегувальний коефіцієнт потоку насичення можна не використовувати або визначити його як постійний, як це рекомендовано в посібнику HCM 2000.

### Література

1. Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation. Federal Highway Administration. September. 2005. 1. Available at: [https://ops.fhwa.dot.gov/congestion\\_report/](https://ops.fhwa.dot.gov/congestion_report/).
2. Луцкін Є. С., Сєрьогіна Н. В. Основні проблеми та можливості розвитку дорожньо-транспортної інфраструктури України. Вісник ОДАБА. 2016. № 63. С. 223–229.
3. HCM 2010: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board of the National Academies/ Washington D.C., 2010. Available at: <https://www.pdfdrive.com/highway-capacity-manual-2010-e157782591.html>.
4. Webster F. B. Cobbe. Traffic signals. *Road Research Technical Paper. 1966.* № 56. 112 p.
5. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / Tepley S., Allingham D. I., Richardson D. B., Stephenson B. W. Toronto: Institute of Transportation Engineers, District, 2008. 230 p.
6. Kerstin Lemke. The new German Highway Capacity Manual (HBS 2015). *Transportation Research Procedia. 2016.* Volume 15. Pp. 26–35. doi:10.1016/j.trpro.2016.06.003.
7. WisDOT Vissim Vehicle Fleet Study. *Wisconsin Department of Transportation. 2020.* Available at: <https://wisconsindot.gov/dtsdManuals/traffic-ops/programs/analysis/vissimstudy.pdf>.
8. Sistuk V., Monastyrskyi Y. Comparative study of VISSIM and HCM technique LOS determination as exemplified by T-shape and partial cloverleaf interchanges. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, 28–29 May 2019.* Ternopil, 2019.
9. A data-driven approach to calibrate microsimulation models based on the degree of saturation at signalized intersections / Mahmoud Arafat, Sajidur Rahman Nafis, Eazaz Sadeghvaziri, Fahmid Tousif *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.* Volume 8, November 2020. Doi:10.1016/j.trip.2020.100231.
10. Abhishek Singh, Bindiya Patel. Calibration of Simulation Models using the VISSIM Software – A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).* 2021. Volume 08. Issue: 09.
11. Vinayaka B., Rahul L. K. Saturation and Delay Model Microsimulation Using Vissim – A Case Study. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* ISSN: 2278-0181. 2016. Vol. 5. Issue 06. Doi: 10.17577/IJERTV5IS060790.

12. Buck H. Sebastian, Mallig Nicolai, Vortisch P. Calibrating Vissim to Analyze Delay at Signalized Intersections. *Transportation Research Record. 2017.* Volume 2615 (1). Doi: 10.3141/2615-09.

### References

1. Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation. Federal Highway Administration. September. 2005. 1. Available at: [https://ops.fhwa.dot.gov/congestion\\_report/](https://ops.fhwa.dot.gov/congestion_report/).
2. Lutskin Ye. S., Serohina N. V. Osnovni problemi ta mozhlyvosti rozvytku dorozhno-transportnoi infrastruktury Ukrainy. *Visnyk ODABA. 2016.* № 63. S. 223–229. [in Ukrainian].
3. HCM 2010: Highway Capacity Manual. Transportation Research Board of the National Academies/ Washington D.C., 2010. Available at: <https://www.pdfdrive.com/highway-capacity-manual-2010-e157782591.html>.
4. Webster F. B. Cobbe. Traffic signals. *Road Research Technical Paper. 1966.* № 56. 112 p.
5. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Third Edition / Tepley S., Allingham D. I., Richardson D. B., Stephenson B. W. Toronto: Institute of Transportation Engineers, District, 2008. 230 p.
6. Kerstin Lemke. The new German Highway Capacity Manual (HBS 2015). *Transportation Research Procedia. 2016.* Volume 15. Pp. 26–35. doi:10.1016/j.trpro.2016.06.003.
7. WisDOT Vissim Vehicle Fleet Study. *Wisconsin Department of Transportation. 2020.* Available at: <https://wisconsindot.gov/dtsdManuals/traffic-ops/programs/analysis/vissimstudy.pdf>.
8. Sistuk V., Monastyrskyi Y. Comparative study of VISSIM and HCM technique LOS determination as exemplified by T-shape and partial cloverleaf interchanges. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, 28–29 May 2019.* Ternopil, 2019.
9. A data-driven approach to calibrate microsimulation models based on the degree of saturation at signalized intersections / Mahmoud Arafat, Sajidur Rahman Nafis, Eazaz Sadeghvaziri, Fahmid Tousif *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.* Volume 8, November 2020. Doi:10.1016/j.trip.2020.100231.
10. Abhishek Singh, Bindiya Patel. Calibration of Simulation Models using the VISSIM Software – A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).* 2021. Volume 08. Issue: 09.
11. Vinayaka B., Rahul L. K. Saturation and Delay Model Microsimulation Using Vissim – A Case Study. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* ISSN: 2278-

0181. 2016. Vol. 5. Issue 06. Doi: 10.17577/IJERTV5IS060790.
- 12.12. Buck H. Sebastian, Mallig Nicolai, Vortisch P. Calibrating Vissim to Analyze Delay at Signalized Intersections. *Transportation Research Record*. 2017. Volume 2615 (1). Doi: 10.3141/2615-09.

**Рябушенко Олександр Васильович**, к.т.н., доц. каф. організації та безпеки дорожнього руху, riabushenko79@ukr.net, тел. +38 066-858-36-51,  
**Просвірнін Олександр Васильович**, студент гр. ТД-51-22 тел. +38 067-992-96-52, prosvirnin2001@gmail.com,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна.

### Simulation of turning traffic at a controlled intersection

**Abstract. Problem.** Optimizing the parameters of traffic light regulation can reduce delays and queues of vehicles, increase the throughput of intersections, and thus increase the quality of the functioning of the city's transport network. This question is especially relevant for Ukraine, because in these conditions it is impossible to carry out a significant modernization of the city's transport network, but within the framework of the post-war reconstruction of the city, it is possible to carry out the improvement of the geometric parameters of the intersection. However, among all the factors that affect the throughput of a regulated intersection, in the scientific literature and normative documents, insufficient attention is paid to the geometrical parameters of the intersection itself.

**Goal.** The geometric parameters of the intersection first of all affect the characteristics of the movement of the selected rotating streams, and through this - the saturation of the stream. Therefore, it is of interest to simulate the movement of turning traffic at an intersection and compare the results with empirical models. **Methodology.** To estimate the permeability of the selected turning lanes, the

correction of the ideal saturation flow is most often used with coefficients, the values of which are either calculated depending on the geometric parameters of the intersection (for example, F. Webster's methodology), or are taken as constant (Posibnik HCM 2000). The flow saturation value for the selected turning lane was also calculated taking into account the minimum safe distance of the vehicles in the traffic flow. It is shown that these methods give different values of flow saturation. **Results.** To check the degree of influence of the rotary flow traffic radius on the flow saturation of the selected traffic, simulation modeling of the robot of the conditional adjustable intersection was carried out in the program PTV VISSIM. The parameters of the model were chosen in such a way that a sufficiently long queue was released before the stop line. In the process of imitation, after turning on the green signal, the virtual detector fixed the number of cars that passed through the dedicated right-turn lane.

**Practical value.** The results showed that for selected turning lanes, the saturation flow increases with an increase in the radius of the turning flow trajectory, which corresponds to the classical formula of F. Webster, when the radius value is up to 15 m. Therefore, adjusting the saturation flow for selected turning flows is appropriate this time. When the flow moves along a path with a larger radius, the saturation flow does not depend on the geometry of the intersection.

**Key words:** controlled intersection, traffic flow, saturation flow, traffic trajectory, simulation modeling.

**Ryabushenko Olexander**, Ph.D., Assoc. prof., Dep. of Traffic Management and Road Safety, riabushenko79@ukr.net, tel. +38 066-858-36-51,  
**Prosvirnin Olexander**, student gr. TD-51-22, tel. +38 067-992-96-52, prosvirnin2001@gmail.com, Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.