



М. М. Жук, В. В. Ковалишин

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-1053> – М. М. Жук

<https://orcid.org/0000-0003-0642-6777> – В. В. Ковалишин



e-mail: mykola.m.zhuk@lpnu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРВАЛІВ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА БАГАТОСМУГОВИХ ДОРОГАХ ЗАЛЕЖНО ВІД ШВИДКОСТІ ТА ПОГОДНИХ УМОВ

Проблема. У сучасних умовах інтенсивного розвитку автомобільного транспорту спостерігається постійне зростання навантаження на міські магістралі, що призводить до ускладнення структури транспортних потоків, збільшення щільності руху та підвищення ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Одним із ключових параметрів, що визначають ефективність функціонування транспортної системи та рівень безпеки дорожнього руху, є інтервали руху між транспортними засобами. Особливого значення набуває врахування впливу погодних умов і швидкостей на зміну цих інтервалів, оскільки вони безпосередньо впливають на поведінку водіїв і характеристики транспортного потоку.

Мета. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни інтервалів руху транспортних засобів на багатосмугових дорогах залежно від швидкості руху та різних погодних умов (сухе або мокре дорожнє покриття), а також визначення залежності фактичного інтервалу між транспортними засобами від мінімально необхідної дистанції.

Методи дослідження. У роботі використано методи натурних спостережень із відеофіксацією транспортного потоку на міській магістралі, методи статистичної обробки експериментальних даних, положення теорії транспортних потоків, а також елементи математичного моделювання для узагальнення отриманих результатів і встановлення функціональних залежностей.

Основні результати дослідження. В результаті проведених досліджень встановлено закономірності зміни інтервалів руху транспортних засобів залежно від швидкісного режиму та погодних умов. Визначено, що за мокрого дорожнього покриття інтервали руху зростають у середньому на 15-22%, що обумовлено зниженням коефіцієнта зчеплення та необхідністю збільшення безпечної дистанції. Водночас зафіксовано перерозподіл транспортного потоку між смугами руху із підвищенням навантаження на середню смугу. Встановлено, що швидкість руху за мокрого покриття є на 10-11% вищою, що може пояснюватися зменшенням щільності транспортного потоку та збільшенням простору для маневрування. Одночасно виявлено, що значна частка транспортних засобів рухається з інтервалами, меншими за мінімально необхідні, що формує потенційно небезпечні режими руху.

Висновки та конкретні пропозиції авторів. Обґрунтовано необхідність врахування погодних умов та швидкостей руху при моделюванні транспортних потоків і плануванні організації дорожнього руху на багатосмугових магістралях. Запропоновано впровадження адаптивних систем управління швидкістю руху з урахуванням погодних умов у реальному часі, а також удосконалення підходів до визначення безпечної дистанції руху з урахуванням фактичної поведінки водіїв. Практична реалізація запропонованих заходів дозволить підвищити рівень безпеки дорожнього руху, зменшити кількість аварійних ситуацій та покращити ефективність функціонування транспортних систем.

Ключові слова: транспортний потік, інтервал руху, швидкість, погодні умови, багатосмугова дорога, безпека руху.

STUDY OF VEHICLE HEADWAYS ON MULTI-LANE ROADS UNDER DIFFERENT SPEED AND WEATHER CONDITIONS

Problem statement. Under modern conditions of intensive development of road transport, there is a steady increase in traffic load on urban highways, which leads to a more complex traffic flow structure, increased traffic density, and a higher probability of accidents. One of the key parameters determining the efficiency of transport system operation and the level of road safety is the headway between vehicles. Particular importance is attached to accounting for the influence of weather conditions and speed on the variation of these headways, as they directly affect driver behavior and traffic flow characteristics.

Purpose. The study aims to identify patterns in vehicle headway variation on multi-lane roads under different speed and different weather conditions (dry or wet road surface) and to quantify the relationship between actual headways and minimum safe following distances.

Methods. The study employs field observations with video recording of traffic flow on an urban arterial, methods of statistical analysis of experimental data, principles of traffic flow theory, and elements of mathematical modeling to generalize the obtained results and establish functional relationships.

Results. The study revealed regularities in the variation of vehicle headways depending on speed regime and weather conditions. It was found that under wet pavement conditions, headways increase on average by 15-22%, which is associated with reduced tire-road adhesion and the need to increase safe following distance. At the same time, a redistribution of traffic flow across lanes was observed, with increased concentration in the middle lane. It was also established that vehicle speeds under wet conditions are 10-11% higher, which may be explained by a decrease in traffic density and an increase in maneuvering space. At the same time, a significant proportion of vehicles were found to operate with headways shorter than the minimum required, resulting in potentially hazardous traffic conditions.

Conclusions and practical implications. The necessity of considering weather conditions and speed in traffic flow modeling and traffic management planning on multi-lane roads is substantiated. The implementation of adaptive speed control systems that account for real-time weather conditions is proposed, along with the improvement of approaches to determining safe following distances based on actual driver behavior. The practical implementation of the proposed measures will enhance road safety, reduce the number of traffic accidents, and improve the overall efficiency of transport systems.

Keywords: traffic flow, headway, speed, weather conditions, multi-lane road, traffic safety.

Вступ. Ефективна організація дорожнього руху на багатосмугових автомагістралях є одним із ключових завдань сучасного транспортного планування в умовах зростання автомобілізації та урбанізації. Покращення безпеки руху, зменшення заторів і підвищення ефективності транспортних систем значною мірою залежать від характеристик транспортного потоку, зокрема інтервалів руху між транспортними засобами, які визначають як пропускну здатність дороги, так і рівень аварійності [1-7].

У європейських дослідженнях інтервали руху розглядаються як ключовий параметр мікроскопічних моделей транспортного потоку (ТП), що дозволяє описувати взаємодію транспортних засобів (ТЗ) і прогнозувати нестійкість руху [1]. Встановлено, що інтервали суттєво залежать від швидкості: зі збільшенням швидкості водії схильні зменшувати інтервали, що підвищує ризик аварій, особливо за високої щільності потоку [2]. Водночас оптимізація швидкісного режиму, зокрема шляхом впровадження змінних обмежень швидкості, сприяє стабілізації транспортного потоку та зменшенню варіації інтервалів [3].

Важливим чинником є також погодні умови, які впливають як на інтервали, так і на швидкість руху. Несприятливі умови (дощ, сніг, низькі температури) призводять до збільшення інтервалів [7] та зниження пропускну здатності дороги на 20-30% [4]. Крім того, зниження видимості призводить до нелінійних змін швидкості та інтервалів руху [5]. Значну роль у формуванні інтервалів відіграють і поведінкові характеристики водіїв, що обумовлюють варіативність дистанції між транспортними засобами [6].

Таким чином, інтервали руху формуються під впливом комплексу чинників, серед яких ключовими є швидкісний режим, погодні умови та поведінка водіїв [2, 5, 7-10]. Водночас питання закономірностей зміни інтервалів руху на багатосмугових дорогах за складних умов руху потребує подальшого дослідження.

Мета. Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей впливу погодних умов (сухе або мокре дорожнє покриття) та швидкостей на інтервали руху транспортних засобів на багатосмугових дорогах. Особлива увага приділяється визначенню взаємозв'язків

між параметрами транспортного потоку (швидкістю, інтенсивністю та складом потоку) і навколишнім середовищем, що формують поведінку водіїв.

Досягнення поставленої мети передбачає комплексне дослідження характеристик транспортного потоку та поведінкових особливостей водіїв у системі «водій – автомобіль – дорога – середовище», що дозволяє оцінити вплив стану дорожнього покриття (сухе або мокре) на безпеку та ефективність руху.

Для досягнення мети вирішуються такі основні завдання:

- аналіз сучасних підходів до дослідження інтервалів руху транспортних засобів на багатосмугових проїзних частинах залежно від швидкості та погодних умов (сухе або мокре дорожнє покриття);
- планування експериментальних досліджень на ділянці багатосмугової дороги за раніше згаданих умов;
- проведення натурних досліджень транспортного потоку з використанням відеофіксації та подальшої обробки даних;
- встановлення залежностей між швидкістю руху, станом дорожнього покриття (сухе або мокре) та інтервалами руху.

Методи дослідження. У цьому дослідженні використано комплексний підхід, який поєднує натурні експериментальні спостереження, методи статистичного аналізу та аналітичне моделювання параметрів транспортного потоку. Подібний підхід широко застосовується у сучасних європейських та українських дослідженнях транспортних потоків, де поєднання натурних досліджень і математичних моделей дозволяє отримати більш достовірні результати [11-15].

Умови проведення досліджень. Експериментальні дослідження проводилися за двох типових умов:

- за сухого дорожнього покриття;
- за мокрого дорожнього покриття (під час дощу).

Такий підхід дозволяє оцінити вплив погодних умов на параметри транспортного потоку, що підтверджується сучасними дослідженнями, які вказують на значний вплив атмосферних факторів на швидкість руху та інтервали між транспортними засобами [4, 7].

Методи обробки та аналізу даних. Обробка експериментальних даних здійснювалася із застосуванням методів математичної статистики. Для кожної серії спостережень визначалися: середні значення інтервалів та швидкостей руху,

розподіл транспортного потоку по смугах, частка різних типів транспортних засобів.

Результати дослідження. Натурні дослідження проводилися в робочі дні тижня з понеділка по п'ятницю в ранковий піковий період з 7:30 до 9:00 на регульованій магістральній вулиці міста Львова (вул. Наукова, Франківський район), яка має три смуги руху в кожному напрямку. Дослідження за мокрого дорожнього покриття проводились в вівторок та середу. За інших днів тижня була суха сонячна погода.

Для забезпечення однорідності вибірки застосовано критерії відбору даних. До аналізу включалися лише транспортні засоби, що рухались у встановленому напрямку без впливу маневрів (перестроювання, обгін, гальмування перед перехрестям).

Аналіз проводився за умов інтенсивності транспортного потоку 900-1000 авто/год та частки легкових автомобілів понад 80%, що дозволило забезпечити порівнянність результатів.

Слід зазначити, що дослідження виконано на одній ділянці багатосмугової міської магістралі, що може обмежувати можливість узагальнення отриманих результатів на інші типи доріг або транспортні умови.

Разом з тим, вибір цієї ділянки обумовлений її типовістю для міських багатосмугових магістралей та високою інтенсивністю руху, що відповідає підходам, які використовуються у європейських та українських дослідженнях транспортних потоків [2-5, 16-17].

Збір даних здійснювався методом відеоспостереження, який є одним із найбільш ефективних інструментів дослідження мікроскопічних характеристик транспортного потоку [1, 5]. Відеокамера була встановлена таким чином, щоб забезпечити повне охоплення всіх смуг руху досліджуваної ділянки.

Подібні методи збору даних широко застосовуються у дослідженнях транспортних потоків у країнах Європи [3, 6] та України [18-19], зокрема при аналізі поведінки водіїв і характеристик руху.

Фотофіксація проведення експериментальних замірів за різних умов по вулиці Наукова міста Львова наведена на рисунку 1.

Досліджувана ділянка характеризується наявністю трьох смуг руху в кожному напрямку, шириною смуги 3,75 м та асфальтобетонним покриттям у хорошому технічному стані. Вимірювання проводились на відстані 75 м після регульованого перехрестя з вулицею Тролейбусна, що дозволило виключити вплив світлофорного регулювання на результати дослідження.

а)



б)



Рисунок 1 – Фотофіксація проведення експериментальної частини по вулиці Наукова поблизу перехрестя з вулицею Тролейбусна: а) за сухого дорожнього покриття; б) за мокрого дорожнього покриття

Збір даних здійснювався за допомогою відеофіксації [11], яка забезпечувала охоплення всіх смуг руху. Отримані відеоматеріали були використані для визначення параметрів транспортного потоку за різних погодних умов.

На першому етапі дослідження інтервалів руху транспортних засобів було проаналізовано основні показники транспортного потоку за умов сухого та мокрого дорожнього покриття. Виконано порівняльний аналіз основних характеристик транспортного потоку за різних погодних умов. Представлення отриманих даних у табличній формі (табл. 1) дозволяє більш наочно оцінити вплив погодних умов на розподіл транспортних засобів по смугах руху та структуру транспортного потоку.

Аналіз представлених даних показує, що погодні умови не мають суттєвого впливу на загальну інтенсивність транспортного потоку, яка залишається в межах від 900 до 1000 авто/год.

Водночас спостерігається значний перерозподіл транспортних засобів між смугами руху: за мокрого покриття зменшується використання правої смуги (на 7%) і зростає навантаження на середню та ліву смуги.

Встановлено, що середня смуга є домінуючою в обох випадках, проте її роль посилюється за несприятливих погодних умов. Крім того, зменшення частки вантажного транспорту та громадського транспорту на крайніх смугах свідчить про зміну поведінки водіїв, які надають перевагу більш стабільним траєкторіям руху.

Таким чином, результати підтверджують, що погодні умови суттєво впливають на структуру транспортного потоку та розподіл транспортних засобів по смугах руху, що необхідно враховувати при моделюванні та організації дорожнього руху на багатосмугових магістралях.

Таблиця 1

Основні характеристики транспортного потоку за різних погодних умов

Показник	Сухе покриття	Мокре покриття
Сумарна інтенсивність транспортного потоку під час проведення досліджень, авто/год	900-1000	
Частка 1-ї смуги, %	25	18
Частка 2-ї смуги, %	57	61
Частка 3-ї смуги, %	18	21
Частка вантажних ТЗ і громадського транспорту (1-ша смуга), %	46	39
Частка вантажних ТЗ і громадського транспорту (2-га смуга), %	13	11
Частка вантажних ТЗ і громадського транспорту (3-тя смуга), %	-	3

Наступним кроком був аналіз інтервалів та швидкостей руху між транспортними засобами за різних умов. Рух у щільному транспортному потоці характеризується підвищеними вимогами

до уваги водія та залежністю від поведінки транспортного засобу-лідера, що ускладнює прогнозування змін швидкісного режиму. Вибір безпечної дистанції визначається швидкістю

руху, характеристиками транспортних засобів, а також станом дорожнього покриття та погодними умовами. На основі експериментальних даних виконано оцінку фактичних інтервалів руху та побудовано їх розподіли за інтенсивності в межах від 900 до 1000 авто/год при частці легкових автомобілів понад 80% (рис. 2).

Результати дослідження показали, що інтервали між транспортними засобами на

багатосмуговій магістралі за мокрого дорожнього покриття є більшими ніж за сухого стану покриття на 15%. Тобто водії за складніших умов руху починають дотримуватись більшої дистанції руху, що спричинено метою підвищення власної безпеки.

Статистичні дані інтервалів руху між ТЗ на магістральній вулиці за різних умов наведені у таблиці 2.

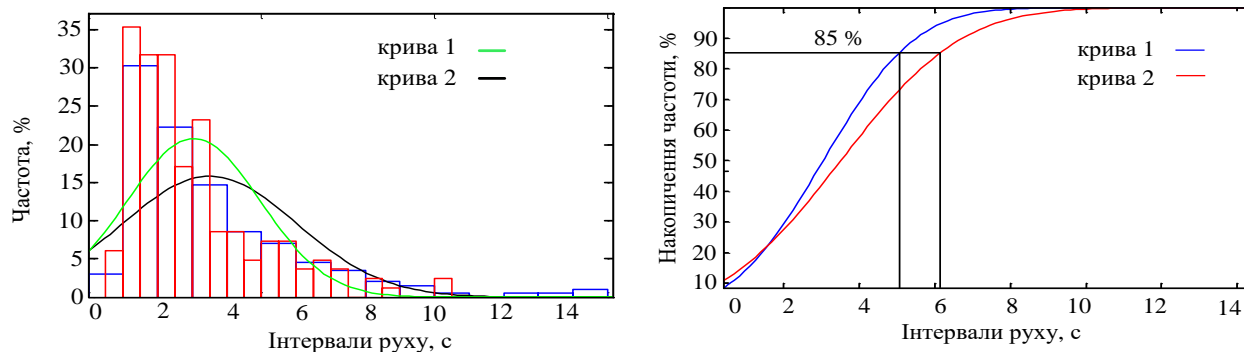


Рисунок 2 – Розподіли інтервалів руху між автомобілями: а)гістограма; б) кумулята; 1 – за сухого дорожнього покриття; 2 – за мокрого дорожнього покриття

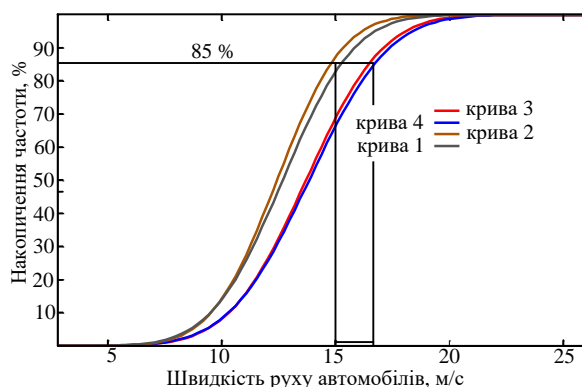
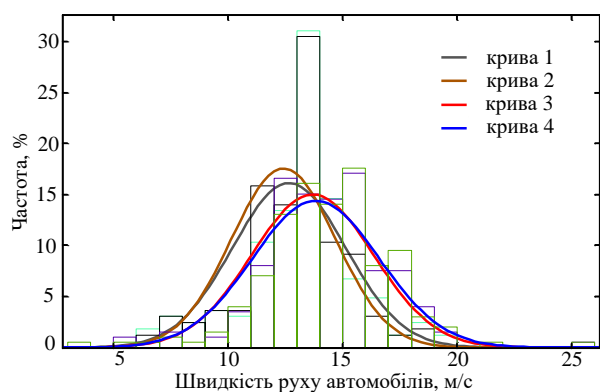
Таблиця 2

Статистичні дані інтервалів руху між ТЗ на магістральній вулиці за різних умов

Інтервали руху за різного стану дорожнього покриття	Статистичні показники			
	Математичне очікування, с	Мінімальне значення, с	Максимальне значення, с	Середнє квадратичне відхилення, с
Сухе	3,04	0,54	10,44	1,92
Мокре	3,51	0,71	14,25	2,51

Аналіз швидкостей руху за різних умов також є дуже важливим для оцінки швидкісного режиму. На основі експериментальних даних побудовано розподіли швидкостей руху (рис. 3) для автомобілів-лідерів і транспортних засобів, що рухаються позаду, за інтенсивності в межах від 900 до 1000 авто/год та частки легкових автомобілів понад 80%.

Встановлено, що за мокрого дорожнього покриття швидкості руху транспортних засобів є вищими порівняно із сухими умовами. При цьому швидкості автомобілів, що рухаються позаду, як за сухого, так і за мокрого покриття, є дещо меншими від швидкостей автомобілів-лідерів.



а)

б)

Рисунок 3 – Розподіли швидкостей руху: а) гістограма; б) кумулята; 1 – за сухого дорожнього покриття автомобіля-лідера; 2 – за сухого дорожнього покриття другого автомобіля; 3 – за мокрого дорожнього покриття другого автомобіля; 4 – за мокрого дорожнього покриття автомобіля-лідера

Статистичні дані швидкостей руху ТЗ на магістральній вулиці за різних умов наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Статистичні дані швидкостей руху на магістральній вулиці за різних умов руху

Стан дорожнього покриття	Швидкості	Статистичні показники			
		Математичне очікування, м/с	Мінімальне значення, м/с	Максимальне значення, м/с	Середнє квадратичне відхилення, м/с
Сухе	Швидкість руху автомобіля-лідера	12,37	6,11	19,17	2,23
	Швидкість руху другого автомобіля	12,62	5,83	20,27	2,44
Мокре	Швидкість руху автомобіля-лідера	13,72	4,99	26,36	2,66
	Швидкість руху другого автомобіля	13,84	3,33	26,36	2,77

Аналізуючи кумулятивні криві розподілу інтервалів та швидкостей руху між автомобілями за забезпечення 85% можна зробити такі висновки:

- інтервал руху між ТЗ за сухого дорожнього покриття становить 5,06с, за мокрого – 6,19с, що більше на 22%;
- середня швидкість ТЗ за сухого дорожнього покриття становить 15м/с, за мокрого – 16,67м/с, що більше на 11%.

Залежність інтервалів руху ТЗ від їх швидкості на багатосмуговій магістралі за різних умов наведено на рисунку 4.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що мінімальні значення інтервалів руху між транспортними засобами за умов мокрого

дорожнього покриття спостерігаються в діапазоні швидкостей 10-17 м/с і становлять 3,3-3,8 с. За аналогічних швидкісних умов для сухого покриття інтервали руху знаходяться в межах 2,7-3,4 с, що є меншим приблизно на 22% порівняно з умовами мокрого дорожнього покриття.

Порівняння отриманих результатів із класичними дослідженнями у сфері теорії транспортних потоків, що наведені у роботах [7, 16, 19], показало, що фактичні інтервали руху в сучасних умовах є в середньому приблизно вдвічі більшими. Це може бути пов'язано зі зміною поведінкових характеристик водіїв, підвищенням вимог до безпеки руху, а також зростанням інтенсивності транспортних потоків і неоднорідності їх складу [1, 6].

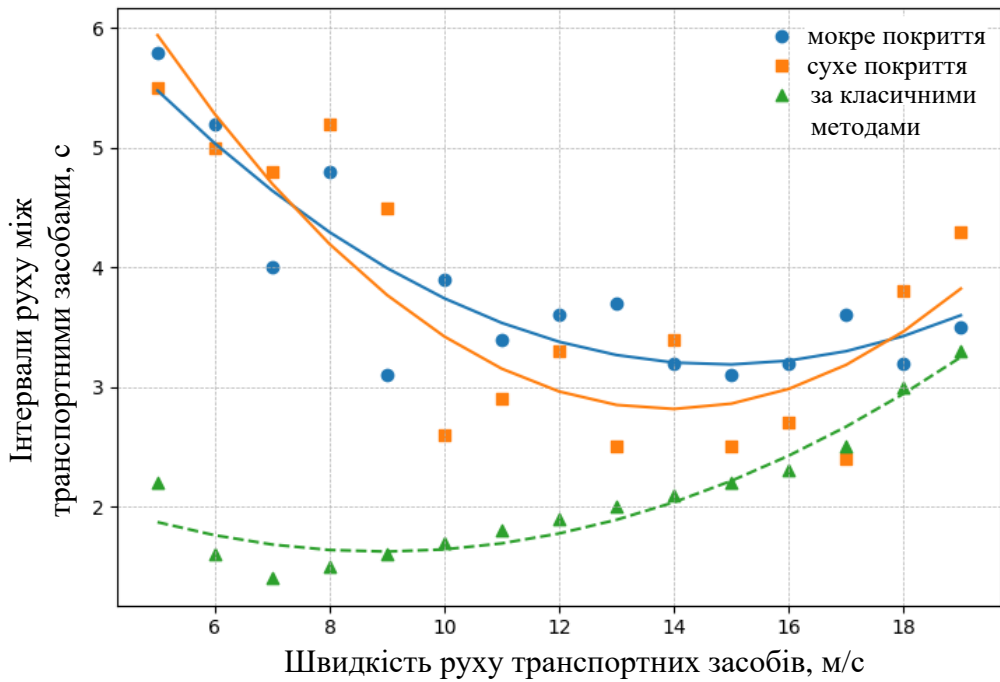


Рисунок 4 – Залежність інтервалів руху ТЗ від їх швидкості на багатосмуговій магістралі за різних умов

Для оцінки відповідності фактичних залежності між фактичним інтервалом між інтервалів руху умовам безпечної дистанції за транспортними засобами та мінімально різних швидкісних режимів виконано аналіз необхідною дистанцією (рис. 5).

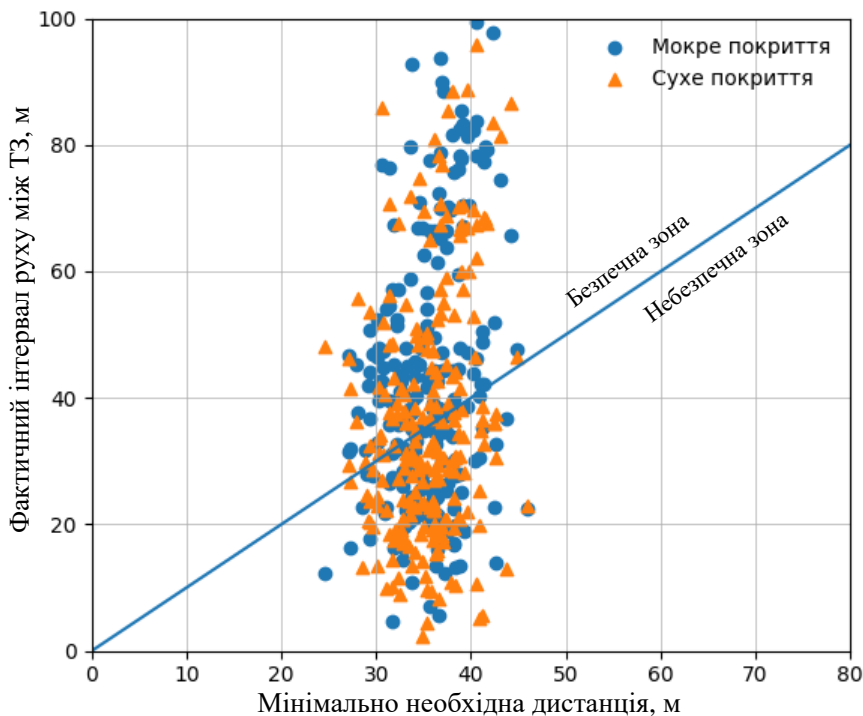


Рисунок 5 – Залежність фактичного інтервалу між транспортними засобами від мінімально необхідної дистанції

Отримані експериментальні дані для умов сухого та мокрого дорожнього покриття були нанесені у вигляді точкової діаграми, а також побудовано лінію рівності, що відповідає умові безпечного руху. Такий підхід дозволяє візуально

визначити області безпечних та потенційно небезпечних режимів руху.

Аналіз розподілу значень відносно лінії рівності (межі безпечного руху) показує, що лише частина водіїв дотримується мінімально необхідної дистанції.

За умов мокрого дорожнього покриття приблизно 30-35% водіїв забезпечують безпечні інтервали руху (точки розташовані вище або поблизу лінії безпеки), тоді як решта рухаються з інтервалами, меншими за мінімально необхідні, що свідчить про підвищений рівень ризику.

За умов сухого дорожнього покриття частка водіїв, які дотримуються безпечної дистанції, є дещо вищою і становить орієнтовно 35-40%, тоді як решта водіїв транспортних засобів рухаються у потенційно небезпечному режимі.

Обговорення результатів досліджень.

Отримані результати дослідження свідчать про суттєвий вплив погодних умов та стану дорожнього покриття на параметри транспортного потоку, зокрема інтервали та швидкості руху транспортних засобів. Встановлено, що за умов мокрого дорожнього покриття інтервали між транспортними засобами зростають у середньому на 15-22% порівняно із сухими умовами, що узгоджується з сучасними дослідженнями [1, 4].

Водночас виявлено, що швидкість руху транспортних засобів за мокрого покриття є дещо вищою (на 10-11%), що є нетиповим результатом і може пояснюватися особливостями організації руху на досліджуваній ділянці, зокрема відсутністю значних обмежень швидкості та характером транспортного потоку. Це також може свідчити про недостатню адаптацію водіїв до змін дорожніх умов, що потенційно підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Аналіз розподілу транспортного потоку показав, що погодні умови не впливають суттєво на загальну інтенсивність руху, однак викликають перерозподіл транспортних засобів між смугами. Зокрема, за мокрого покриття зростає частка транспортних засобів на середній та лівій смугах, що свідчить про прагнення водіїв обирати більш безпечну траєкторію руху.

Отримані результати дослідження свідчать, що за умов мокрого дорожнього покриття спостерігається збільшення інтервалів руху між транспортними засобами, що зумовлено прагненням водіїв компенсувати підвищений рівень ризику. Водночас встановлено, що зростання інтервалів супроводжується підвищенням швидкостей руху транспортних засобів, що може пояснюватися зменшенням щільності транспортного потоку та збільшенням простору для маневрування. У результаті відбувається перерозподіл параметрів транспортного потоку, при якому зниження щільності частково компенсується зростанням швидкості руху.

Порівняння отриманих результатів із класичними моделями [1, 4] показало, що фактичні інтервали руху в сучасних умовах є

значно більшими. Це може бути пов'язано як із покращенням динамічних характеристик транспортних засобів, так і зі зміною поведінкових особливостей водіїв, підвищенням вимог до безпеки та зростанням неоднорідності транспортного потоку. Зазначені особливості підтверджують необхідність уточнення класичних підходів до опису транспортних потоків із урахуванням сучасних умов їх функціонування.

Особливу увагу привертає аналіз залежності між фактичним інтервалом та мінімально необхідною дистанцією, який показав, що значна частина транспортних засобів рухається з інтервалами, меншими за безпечні. Це свідчить про наявність значної кількості потенційно небезпечних режимів руху, особливо за несприятливих погодних умов, що підтверджує результати попередніх досліджень у сфері безпеки дорожнього руху.

Висновки. Серед головних висновків даного наукового дослідження слід виділити:

- у результаті аналізу сучасних наукових підходів встановлено, що інтервали руху транспортних засобів є ключовим параметром транспортного потоку, який визначається взаємодією швидкісного режиму, інтенсивності руху, складу транспортного потоку та умов навколишнього середовища;

- за результатами натурних експериментальних досліджень підтверджено, що погодні умови, зокрема стан дорожнього покриття (сухе або мокре), суттєво впливають на формування інтервалів руху транспортних засобів на багатосмугових дорогах (за мокрого покриття вони зростають у середньому на 15-22%);

- швидкість руху транспортних засобів за мокрого покриття є на 10-11% вищою, що пояснюється зменшенням щільності транспортного потоку та збільшенням простору для маневрування;

- фактичні інтервали руху транспортних засобів у сучасних умовах є більшими в середньому вдвічі порівняно з класичними теоретичними значеннями;

- значна частка транспортних засобів рухається з інтервалами, меншими за мінімально необхідні, що створює потенційно небезпечні умови руху.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування погодних умов (сухе або мокре дорожнє покриття) і поведінкових чинників при моделюванні транспортних потоків та організації дорожнього руху, а також доцільність впровадження адаптивних систем управління швидкістю.

Список літератури:

1. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. Berlin: Springer, 2017. 637 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4>
2. Knoop V., Hoogendoorn S. Free Flow Capacity and Queue Discharge Rate: Long-Term Changes. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2022. 2676(7), P.483-494. <https://doi.org/10.1177/03611981221078845>
3. Papageorgiou M., Kosmatopoulos E., Papamichail I. Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2008. Vol. 16, No. 4. P. 415–433. <https://doi.org/10.3141/2047-05>
4. Bergel-Hayat R., Debbarh M., Antoniou C., Yannis G. Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accident Analysis & Prevention*. 2013. Vol. 60. P. 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
5. Pavlou D., Christodoulou G., Yannis G. The impact of weather conditions and driver characteristics on road safety on rural roads. *Transportation Research Procedia*. Volume 72, 2023, Pages 4081-4088. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.369>
6. Helman S., Reed N. Validation of the driver behaviour questionnaire using behavioural data from an instrumented vehicle and high-fidelity driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*. Volume 75, February 2015, Pages 245-251 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.008>
7. Форнальчик Є. Ю., Могила І. А., Трушевський В. Е., Гілевич В. В. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія / за ред. Є. Ю. Форнальчика. Львів, 2018. 236 с.
8. Romanowska A., Budzyński M. Investigating the Impact of Weather Conditions and Time of Day on Traffic Flow Characteristics. *Weather, Climate, and Society*. Volume 14 (2022) Issue 3. Page(s): 823–833. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0012.1>
9. Chen X., He Z., Liu H. X. Analysis of traffic flow characteristics under different weather conditions. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 1–19.
10. Коваленко О. В., Гнатюк І. С. Вплив погодних умов на параметри транспортного потоку в міських умовах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2021. Вип. 109. С. 45–52.
11. Coifman V. Improved velocity estimation using video data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2015. Vol. 78. P. 1–15.
12. Calvert S. C., Schakel W. J., van Lint J. W. C. Will automated vehicles negatively impact traffic flow? *Journal of Advanced Transportation*. 2017 Vol. 2020. Article ID 3089743. <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>
13. van Wageningen-Kessels F., van Lint H., Hoogendoorn S., Vuik K. Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. Volume 4, Issue 4, December 2015, Pages 445-473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
14. Kesting, A., & Treiber, M. Calibrating Car-Following Models by Using Trajectory Data: Methodological Study: Methodological Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2088(1). 2008. P 148-156. <https://doi.org/10.3141/2088-16>
15. Bjornskau T. The effects of weather conditions on road safety. *Accident Analysis & Prevention*. 2021. Vol. 150. Article 105927.
16. Пащенко Ю. Є., Доля В. К. Дослідження параметрів транспортних потоків на багатосмугових дорогах. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2020. № 2 (47). С. 112–120.
17. Кузьмін О. І., Бойко В. В. Аналіз безпечної дистанції між транспортними засобами в умовах інтенсивного руху. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2022. № 3 (7). С. 25–32.
18. Лобода О. М., Савченко І. В. Оцінка впливу швидкісного режиму на безпеку дорожнього руху. *Наукові нотатки*. 2023. Вип. 74. С. 89–95.
19. Мельник Р. В., Іваненко С. О. Моделювання транспортних потоків у міських умовах. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Луцьк, 2021. № 2 (16). С. 134–140.

References:

1. Treiber, M., & Kesting, A. (2017). Traffic flow dynamics: Data, models and simulation. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4>
2. Knoop, V. L., & Hoogendoorn, S. P. (2022). Free flow capacity and queue discharge rate: Long-term changes. *Transportation Research Record*, 2676(7), 483–494. <https://doi.org/10.1177/03611981221078845>
3. Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., & Papamichail, I. (2008). Effects of variable speed limits on motorway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(4), 415–433. <https://doi.org/10.3141/2047-05>
4. Bergel-Hayat, R., Debbarh, M., Antoniou, C., & Yannis, G. (2013). Explaining the road accident risk: Weather effects. *Accident Analysis & Prevention*, 60, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.006>
5. Pavlou, D., Christodoulou, G., & Yannis, G. (2023). The impact of weather conditions and driver

- characteristics on road safety on rural roads. *Transportation Research Procedia*, 72, 4081–4088. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.369>
6. Helman, S., & Reed, N. (2015). Validation of the driver behaviour questionnaire using behavioural data from an instrumented vehicle and high-fidelity driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 75, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.12.008>
 7. Fornalchyk, Y. Y. (Ed.). (2018). *Upravlinnya dorozhnim rukhom na rehol'ovanykh perekhrestyakh u mistakh* [Traffic management at signalized intersections in cities] [in Ukrainian]. Lviv [in Ukrainian].
 8. Romanowska, A., & Budzyński, M. (2022). Investigating the impact of weather conditions and time of day on traffic flow characteristics. *Weather, Climate, and Society*, 14(3), 823–833. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-22-0012.1>
 9. Chen, X., He, Z., & Liu, H. X. (2020). Analysis of traffic flow characteristics under different weather conditions. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 8(1), 1–19.
 10. Kovalenko, O. V., & Hnatiuk, I. S. (2021). *Vplyv pohodnykh umov na parametry transportnoho potoku v mis'kykh umovakh*. [Influence of weather conditions on traffic flow parameters in urban environments] *Automobile Roads and Road Construction*, 109, 45–52 [in Ukrainian].
 11. Coifman, B. (2015). Improved velocity estimation using video data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 1–15.
 12. Calvert, S. C., Schakel, W. J., & van Lint, J. W. C. (2017). Will automated vehicles negatively impact traffic flow? *Journal of Advanced Transportation*, 2017, Article 3082781. <https://doi.org/10.1155/2017/3082781>
 13. van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Hoogendoorn, S., & Vuik, K. (2015). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
 14. Kesting, A., & Treiber, M. (2008). Calibrating car-following models by using trajectory data: Methodological study. *Transportation Research Record*, 2088(1), 148–156. <https://doi.org/10.3141/2088-16>
 15. Bjørnskau, T. (2021). The effects of weather conditions on road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 150, 105927.
 16. Pashchenko, Y. Y., & Dolia, V. K. (2020). *Doslidzhennya parametriv transportnykh potokiv na bahatosmuhovykh dorohakh*. [Study of traffic flow parameters on multilane roads]. *Bulletin of the National Transport University*, 2(47), 112–120 [in Ukrainian].
 17. Kuzmin, O. I., & Boiko, V. V. (2022). Analysis of safe distance between vehicles under heavy traffic conditions (in Ukrainian). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7), 25–32 [in Ukrainian].
 18. Loboda, O. M., & Savchenko, I. V. (2023). *Otsinka vplyvu shvydkisnoho rezhymu na bezpeku dorozhn'oho rukhu*. [Assessment of the impact of speed regimes on road safety]. *Scientific Notes*, 74, 89–95 [in Ukrainian].
 19. Melnyk, R. V., & Ivanenko, S. O. (2021). *Modelyuvannya transportnykh potokiv u mis'kykh umovakh*. [Modeling of traffic flows in urban conditions]. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 2(16), 134–140 [in Ukrainian].

© М. М. Жук, В. В. Ковалишин, 2026.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 27.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.