

Горбачов П.Ф., Свічинський С.В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ЩІЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ З ОДНИМ ПОВІЛЬНИМ АВТОМОБІЛЕМ НА ДІЛЯНЦІ ДОРОГИ З ОБМЕЖЕНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ МАНЕВРУВАННЯ

Швидкість руху транспортних засобів є основним параметром, що обумовлює якість обслуговування користувачів транспорту, оскільки можливість її вільного вибору водієм визначає для нього рівень комфорту руху. На цей час загально визнаними у транспортній науці є лише закономірності у значеннях швидкості для вільних умов руху, де вона підкорюється нормальному закону розподілу. Закономірності коливання швидкості в інших умовах залишаються слабо дослідженими. З цієї точки зору представляє інтерес дослідження причин коливання швидкості в умовах руху, протилежних вільним, тобто руху щільної пачки транспортних засобів на односмуговій ділянці дороги, де неможливі обгони та випередження. Розпочати його варто з визначення залежності для розрахунку середньої швидкості щільного транспортного потоку на виході з ділянки з обмеженнями на рух за умови, що порядок розташування транспортних засобів у пачці на вході до ділянки є випадковим. Дана стаття присвячена отриманню шуканої залежності у найпростішій ситуації – коли у потоці наявний лише один повільний автомобіль, що обмежує швидкість інших. Отримання подібної формули створює основу для подальшого вивчення закономірностей у значеннях швидкості руху в щільних умовах і означає можливість наближення до встановлення її першого моменту як однієї із основних характеристик досліджуваної випадкової величини.

Ключові слова: швидкість руху, середня швидкість, транспортний потік, щільність потоку, смуга руху, умови руху, аналітичне моделювання, транспортна система.

ВСТУП

Рух автомобілів по вулично-дорожніх мережах (ВДМ) міст досить давно став предметом уваги багатьох науковців та практиків по всьому світу. Вирішення задач, які стоять перед дослідниками у цій сфері, має спиратися на надійні методи прогнозування транспортних потоків (ТП) та їх характеристик, від якості якого, вочевидь, залежить ефективність рішень, що будуються на результатах прогнозу. Таким чином, удосконалення існуючих та розробка нових методів прогнозування характеристик ТП у теперішній час залишаються актуальними.

Особливе місце серед цих характеристик займає швидкість, яка пов'язує між собою подолану відстань та витрачений на це час. Обидва показники є доволі важливими для пересічних водіїв, котрі у своїй більшості прагнуть прямувати по найкоротшому шляху та мінімізувати загальний час пересування [1]. Окрім цього, згідно з одним з найбільш широко застосовуваних керівництв по визначенню пропускної здатності автомобільних доріг – американському Highway Capacity Manual (HCM) – швидкість є основним показником, який використовується для оцінки рівня обслуговування (Level of Service – LOS) користувачів індивідуального моторизованого транспорту на ділянках ВДМ [2].

Питання визначення швидкості ТП в різних умовах руху на цей час залишається не до кінця вирішеним, а тому дослідження у цьому напрямі мають бути продовжені.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У дослідженнях, присвячених опису взаємозв'язку швидкості автомобілів з умовами їх руху, можна виділити два принципово різних підходи. Перший реалізується у вигляді фундаментальної діаграми (ФД) ТП [3], у якій взаємозв'язок між швидкістю та щільністю потоку представляється певною детермінованою залежністю. На цей час розроблена велика кількість діаграм, часто для опису конкретної локації, які являють собою результати вивчення поведінки ТП у певних умовах руху або з якоюсь іншою конкретно локально актуальною метою [4-7]. Таких моделей настільки багато, що охопити їх усі практично неможливо. До того ж, у цьому нема критичної потреби, адже всі моделі по суті є апроксимацією емпіричних даних [4].

Загальним у цих моделях та у підходах до їх побудови є те, що всі вони не ставлять під сумнів існування стійкого зв'язку між характеристиками ТП. При цьому жодна з моделей не пояснює причин коливання швидкості в одних і тих же умовах, що є характерним для всіх існуючих на цей час наборів емпіричних даних.

Через це більш перспективним представляється підхід, у якому швидкість руху розглядається як випадкова величина [8]. Більшість досліджень у рамках цього підходу відносяться до вільного ТП,

для якого підтвердженою можна вважати гіпотезу про нормальний закон розподілу швидкості автомобілів [9-11]. Такий результат цілком пояснюється нічим не обмеженим індивідуальним вибором водіями найбільш комфортної швидкості для певних дорожніх умов та інших параметрів руху. При ускладненні умов руху мода розподілу зміщується вліво і приводить до більшої відповідності коливань швидкості законам розподілу з правою асиметрією, а саме логнормальному, гама, Вейбула та подібних [12, 13].

У роботі [8] зроблена спроба встановлення аналогічних закономірностей у дуже складних умовах руху, які виникають при значному звуженні проїзної частини або перед міськими регульованими перехрестями. Було встановлено, що чим більш обмеженими стають умови руху, тим більше розподіл швидкості наближається до показникового закону [8]. Такі результати є цілком природними, оскільки скалярна швидкість не може бути негативною. Даний факт не дуже впливає на критерії згоди при статистичному підборі нормального закону під набори даних з високою середньою швидкістю, але змушує відмовлятися від нього при її зниженні в ускладнених умовах руху. Для опису всього діапазону швидкостей в роботі [8] запропоновано використовувати гама-розподіл, оскільки показниковий закон є окремим, а нормальний – граничним випадками цього доволі гнучкого з точки зору опису емпіричних даних закону розподілу [8].

Цікавим результатом спостережень у зазначеній роботі стало наближення щільності розподілу швидкості до монотонно спадаючої форми у складних умовах руху, хоча при постійному русі без зупинок вона не може починатися з нуля, як це характерно для показникового розподілу. Нульова швидкість означає припинення процесу руху і, виходячи з матеріалів роботи [8], у автора виникали питання з врахуванням цього явища, які були подолані за допомогою застосування спеціального методу збору і обробки інформації. З цієї інформації можна попередньо заключити, що у складних умовах руху без зупинок щільність розподілу швидкості ТП може виглядати як монотонно спадаюча функція з деяким позитивним зсувом графіку щільності вправо від нуля.

Це припущення може стати корисним наприкінці дослідження швидкості автомобілів у складних умовах руху за умови, що його результатом буде отримання виду закону розподілу швидкості. Станом же на зараз всі згадані вище спроби встановлення законів розподілу швидкості руху не змогли прояснити причин їх виникнення і не наблизили дослідників до повного розуміння процесів руху ТП у різних умовах, так як побудовані виключно на обробці статистичного матеріалу.

Для подолання цього недоліку варто дослідити такі ситуації руху ТП, у яких спостерігається зрозумілий взаємний вплив автомобілів у потоці один на одного. Це дозволить формалізувати процес руху та застосувати до визначення швидкості ТП апарат аналітичного моделювання. У майбутньому подібний підхід надасть можливість не лише описати існуючі закономірності, а ще й пояснити причини їх виникнення, що є однією з основних задач наукової діяльності.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Знання закономірності розподілу швидкостей транспортних засобів (ТЗ) у вільних умовах руху створює певний потенціал для поглиблення знань у сфері прогнозування поведінки ТП, оскільки описує один із двох його крайніх станів – повної свободи, коли вибір швидкості руху кожним його учасником не залежить від поведінки інших учасників. При цьому важливість вивчення саме швидкості руху як однієї з основних характеристик ТП не повинно піддаватись сумнівам, оскільки для водіїв можливість рухатися в потрібному напрямку з бажаною швидкістю є головним показником комфорту поїздки [2, 14].

Тому наступний крок у напрямку дослідження швидкості ТП доцільно зробити, поставивши за мету розгляд потоку у протилежному крайньому стані – коли вплив його учасників один на одного при виборі швидкості руху є максимальним. Це можливо тоді, коли зовнішні умови не накладають жодних обмежень на рух автомобілів, і водії можуть вільно обирати швидкість руху, якщо їм не заважають автомобілі інших водіїв.

При цьому максимальний вплив один на одного автомобілі будуть чинити тоді, коли вони рухатимуться по ділянці дороги на мінімальній дистанції. При різних швидкостях руху це взагалі-то можливо лише в один момент часу або в одному місці, оскільки більш швидкі автомобілі в процесі руху будуть постійно збільшувати дистанцію, якщо за ними слідує більш повільні автомобілі.

Ще однією умовою, при якій буде спостерігатися максимальний взаємний вплив автомобілів один на одного, є неможливість здійснення ними маневрів обгону або випередження. Такі здавалось би неординарні умови регулярно виникають, коли автомобілі, залишаючи регульовані перехрестя, в'їжджають на односмугові ділянки, що досить часто трапляється у міських ВДМ протягом високозавантажених періодів доби [15]. При обробці статистичних даних про рух автомобілів у

подібних умовах у роботі [15] також було відзначено неординарне явище, яке полягає у зниженні середньої швидкості ТП при зростанні інтенсивності руху на зазначених ділянках. Дане явище цікаве тим, що черга автомобілів завжди роз'їжджається вільною ділянкою ВДМ, і тому єдиною причиною зниження швидкості у такому випадку є взаємний вплив автомобілів один на одного. Це додатково спонукає до його поглибленого вивчення з метою отримання аналітичної залежності для визначення середньої швидкості руху автомобілів у таких умовах.

Слід зазначити, що подібні умови можуть виникати не лише на міських регульованих перехрестях, а також в інших місцях автодоріг. Прикладами можуть служити: тимчасове або постійне звуження проїжджої частини до однієї смуги на багатосмуговій дорозі з ТП, інтенсивність якого перевищує пропускну спроможність смуги руху; обмеження руху на автомобільних дорогах з аналогічними наслідками; тощо. Ключовими ознаками виникнення розглянутих ситуацій є створення за різними причинами в деякому місці на дорозі щільної групи автомобілів (для її позначення у подальшому буде використовуватися поняття «пачка автомобілів»), які в деякий момент часу рухаються на мінімальній дистанції між ними при тому, що після цього моменту подальший рух пачки здійснюється по вільній смузі руху, на якій, однак, неможливі обгони або випередження.

У цьому процесі вплив автомобілів один на одного полягає у тому, що потенційно більш швидкі автомобілі вимушені рухатися зі швидкістю слідуючого перед ним автомобіля. Саме цей вплив може слугувати поясненням явища, відзначеного в роботі [15], тому що зростання інтенсивності ТП означає збільшення загальної кількості повільних автомобілів на ділянці, які затримують більш швидких учасників ТП в умовах неможливості їхнього випередження або обгону.

Вплив повільних автомобілів на середню швидкість ТП у досліджуваних умовах буде тим більше, чим ближче до початку пачки розташовуються повільні автомобілі, оскільки це збільшує кількість автомобілів, які вимушені рухатися зі швидкістю, меншою за бажану. Тому для постановки задачі важливим є задання порядку розташування автомобілів у пачці. З огляду на те, що процес її формування як на міських регульованих перехрестях, так і в інших аналогічних місцях за умови відсутності цілеспрямованого впливу на нього є апіорі випадковим, то природним тут є припущення про рівну ймовірність для кожного автомобіля опинитися на будь-якому місці у пачці.

Ще однією умовою для коректної постановки задачі є достатня для розгону автомобілів до бажаної швидкості довжина односмугової ділянки з вільними, за виключенням обгонів і випереджень, умовами руху на ній. Іншими словами, середню швидкість ТП необхідно оцінювати на такій відстані від місця створення пачки, яка би давала можливість всім автомобілям, яким не заважають більш повільні учасники руху з пачки, набрати бажану швидкість.

Першим кроком на шляху отримання загальної залежності для розрахунку середньої швидкості щільного ТП на односмуговій ділянці без можливості обігнати або випередити повільні автомобілі, має стати аналіз найпростішої гіпотетичної ситуації, при якій розглядається пачка автомобілів, що складається з автомобілів, які бажають їхати з однаковою найбільшою можливою для них швидкістю, за виключенням одного – повільного автомобіля, рисунок 1.

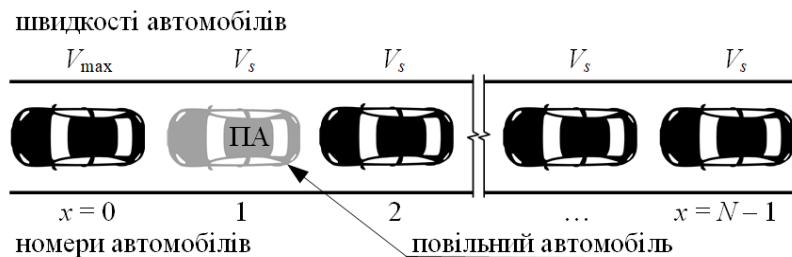


Рисунок 1 – Досліджуваний ТП з одним повільним автомобілем у пачці

Розгляду саме такої ситуації присвячена дана стаття.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З урахуванням наведеного у попередньому розділі опису задачі та висунутих припущень, формальна постановка задачі виглядає наступним чином:

-нехай N автомобілів у випадковому порядку щільним потоком в'їжджають на смугу руху, на якій неможливі маневри обгону та випередження;

-нехай номер першого у потоці автомобіля дорівнює 0. Тоді кожен автомобіль з ймовірністю $1/N$ може мати номер $[0; N-1]$;

-нехай усі водії, крім одного, бажають їхати з максимально дозволеною швидкістю V_{\max} , а водій того самого одного – повільного автомобіля (ПА) – їде зі швидкістю V_s , $0 < V_s < V_{\max}$.

Необхідно визначити якою буде середня швидкість автомобілів \bar{V} на виїзді зі розглянутої смуги руху.

Оскільки обгони на ній неможливі, а дистанція між автомобілями на початку ділянки мінімальна і не може бути скорочена за рахунок різниці у швидкості двох послідовних автомобілів, то швидкість автомобілів із потоку, які їдуть за ПА, дорівнюватиме його швидкості V_s , а автомобілів перед ним – швидкості V_{\max} . Внаслідок цього середня швидкість такого потоку визначається тим, на якому місці в потоці опиниться ПА. Якщо нумерація позицій автомобілів у потоці починається з нуля, а ПА займає позицію x , то середня швидкість потоку на виїзді зі смуги руху дорівнюватиме

$$\bar{V}_x = \frac{x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s}{N}, \quad (1)$$

де x – позиція ПА в потоці: якщо ПА є першим у потоці, то $x = 0$; якщо другим, то $x = 1$; якщо третім, то $x = 2$ і т.д.

Тут слід зазначити, що вираз у чисельнику дробу у формулі (1), тобто $[x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s]$, є сумою швидкостей усіх автомобілів у потоці в тому випадку, коли ПА займає в потоці позицію x , і дана позиція визначає значення індексу при швидкості \bar{V}_x . Тоді, з урахуванням рівномірного розміщення ПА в потоці, шукана \bar{V} визначатиметься як середня з усіх \bar{V}_x , $x \in [0; N-1]$, кожна з яких реалізується з ймовірністю $1/N$:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \bar{V}_x = \frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} (x \cdot V_{\max} + (N - x) \cdot V_s). \quad (2)$$

Тепер сума швидкостей усіх автомобілів у потоці стала елементом – одним доданком – суми всіх варіантів розміщення ПА, і якщо ввести позначення для різниці швидкостей

$$\Delta_s = V_{\max} - V_s, \quad \Delta_s > 0, \quad (3)$$

то вираз (2) можна переписати в іншому вигляді:

$$\bar{V} = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{x=0}^{N-1} x \cdot (V_s + \Delta_s) + \sum_{x=0}^{N-1} (N - x) \cdot V_s \right] = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{x=0}^{N-1} (x \cdot V_s + (N - x) \cdot V_s) + \sum_{x=0}^{N-1} x \cdot \Delta_s \right]. \quad (4)$$

Після розкриття квадратних дужок можна перетворити доданки з них. Так як у дужках першого доданку формули (4) містяться подібні доданки, він спочатку приводиться до вигляду $\frac{1}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} N \cdot V_s$

або $\frac{V_s}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} N$. А так як $\sum_{x=0}^{N-1} N = N^2$, то він отримує кінцевий від V_s .

Другий доданок спочатку набуває вигляду $\frac{\Delta_s}{N^2} \sum_{x=0}^{N-1} x$, а так як сума членів простої арифметичної

прогресії, що починається з 0, дорівнює $\frac{N(N-1)}{2} = \frac{N^2 - N}{2}$ [16], то остаточний вираз для шуканої середньої швидкості набуде вигляду

$$\bar{V} = V_s + \frac{N-1}{2N} \Delta_s. \quad (5)$$

Отримана таким чином шукана формула для розрахунку швидкості автомобілів на виїзді з односмугової ділянки дороги, коли у потоці є один ПА, а всі інші автомобілі бажають їхати з однаковою найбільшою можливою для них швидкістю, відображає її середнє значення при нескінченній кількості випробувань.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Залежність (5) буде давати добре наближення до емпіричної середньої при кількості спостережень, яка перевищує кількість автомобілів у пачці N у декілька разів.

Оскільки практичний інтерес представляють собою випадки з відносно невеликою кількістю N , експериментальна перевірка цієї залежності виглядає цілком можливою. Перешкодою тут є лише те, що у реальності буде вкрай складно знайти пачку автомобілів зі швидкостями, принципово представленими за допомогою рисунку 1, а тому результативнішим тут виглядає імітаційний експеримент, хоча і він вимагатиме специфічних налаштувань.

Формула (5) показує, що навіть один ПА може значно знижувати середню швидкість пачки, яка за його наявності не може перевищувати V_s більш ніж на половину різниці між швидкостями Δ_s , оскільки множник перед Δ_s асимптотично наближається до $1/2$ при $N \rightarrow \infty$. Це вже на даному кроці моделювання може вважатися попереднім поясненням явища, виявленого у роботі [15], та свідчить про доцільність розвитку дослідження, виконаного у даній статті.

Перспективним напрямом для цього є його розширення за рахунок розгляду ситуацій з більшою кількістю ПА у пачці. Виведення для них формул, аналогічних до формули (5), надасть можливість отримання загальної залежності з індивідуальними значеннями бажаної швидкості для всіх учасників руху, що відповідає відомому для вільних умов нормальному закону розподілу.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день сформувався два різних підходи до опису залежності швидкості автомобілів від умов руху. Перший полягає у побудові ФД ТП, і для її опису існує дуже багато моделей. Загальним у них є те, що існування стійкого зв'язку між характеристиками ТП не ставиться під сумнів, але при цьому жодна з моделей не пояснює причин коливання швидкості в одних і тих же умовах, що властиве всім існуючим на цей час наборам емпіричних даних.

З огляду на це, більш перспективним виглядає другий підхід, у якому швидкість руху розглядається як випадкова величина. У рамках цього підходу підтвердженою можна вважати гіпотезу про нормальний закон розподілу швидкості автомобілів у вільних умовах руху. Що стосується швидкості автомобілів у складних умовах руху, то станом на зараз всі спроби встановлення закономірностей її розподілу не змогли прояснити причин їх виникнення і не розкрили сутність процесів руху ТП у різних умовах, так як побудовані виключно на обробці статистичного матеріалу.

Для подолання цього недоліку доцільно дослідити швидкість ТП в умовах, протилежних вільним – коли вплив учасників потоку один на одного при виборі швидкості руху є максимальним, тобто у щільному ТП на односмуговій ділянці без можливості обігнати або випередити повільні автомобілі. У даній статті отриманий аналітичний вираз для розрахунку середньої швидкості щільного ТП у зазначених умовах руху, для найпростішої ситуації – коли у ТП наявний лише один автомобіль, що обмежує швидкість інших учасників руху.

Отримана модель створює основу для подальшого аналітичного моделювання цього процесу в більш складних ситуаціях, з більшою кількістю ПА у пачці. Це є найбільш перспективним напрямом розвитку цього дослідження задля отримання загальної залежності середньої швидкості ТП у таких умовах і пояснення причин її коливання взагалі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bejerano Y., Cidon I. Efficient location management based on moving location areas. *Proceedings IEEE INFOCOM 2001: Conference on Computer Communications: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society* (Anchorage, AK, USA, 22-26 April 2001). Anchorage: IEEE, 2001. Vol.1. P. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2001.916681>.

2. Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Volume 1: Concepts / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. 330 p.

3. Daganzo C.F. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1994. Vol. 28, Issue 4. P. 269–287. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7).
4. Bramich D.M., Menéndez M., Ambühl L. Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23, No. 9. P. 14104–14127. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3142255>.
5. Абрамова Л.С., Капінус С.В. Визначення балансу між параметрами дорожнього руху. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 91–97. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/48940/1/5149-10226-1-SM.pdf>.
6. Капінус С.В. Розробка моделей прийняття рішень у системах управління дорожнім рухом : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.22.01 / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2018. 22 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/e5d5ae4b-0148-4978-b0c8-79b2198367e8>.
7. Пустюльга, С., Придюк, В., Самостян, В. Багатовимірні геометрична модель функціонування транспортного потоку на перевантаженій ділянці дорожньої мережі. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2019. Вип. 1(12). С. 135–145. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.66>.
8. Ву Дик Мінь. Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра філософії: 275 Транспортні технології (за видами) / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2021. 205 с.
9. KHAN, J.A., TARRY, S.R. Speed spot study by comparing time mean speed and space mean speed: A case study. *International Journal of Advanced Science and Research*. 2018, 3(1), p. 97–102. ISSN 2455-4227. Available from: <https://www.allsciencejournal.com/assets/archives/2018/vol3issue1/3-1-59-588.pdf>.
10. HAQUE, N.N., HALDER, S., ISLAM, A., NAG, R., ALAM, R.B., HASSAN, M. Traffic Speed Study. Technical Report, Ahsanullah: AUST, 2013. Available from: <https://doi.org/10.13140/2.1.5069.3923>.
11. RSA. Free speed survey 2011 (Urban and Rural). Ballina: Road Safety Authority, 2012. Available from: https://www.rsa.ie/docs/default-source/road-safety/r4.1-research-reports/speed/free-speed-survey-2011.pdf?Status=Master&sfvrsn=ba80d98a_3
12. Sarkar D.R., Kumar P. An investigation of traffic speed distributions for uninterrupted flow at blackspot locations in a mixed traffic environment. *IATSS Research*. 2024. Vol. 48, Issue 2. P. 180–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.03.004>.
13. Mondal S., Gupta A. Speed distribution for interrupted flow facility under mixed traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. Vol. 570. Paper No. 125798. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125798>.
14. Chung C.C., Gartner N. Acceleration Noise as a Measure of Effectiveness in the Operation of Traffic Control Systems : working paper. Cambridge: Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, 1973. 41 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/5329/OR-015-73.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
15. Шевченко В.В. Визначення раціональних параметрів координованого управління дорожнім рухом на міських магістралях : дис.на здобуття наук. ступеня д-ра філософії: 275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті) / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2023. 224 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/a3f86476-55b5-4ebf-81fb-c1f08859a70a>.
16. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review* / [Revised Edition]. Mineola, New York: Dover Publications, 2000. 1152 p.

REFERENCES

1. Bejerano, Y., & Cidon, I. (2001) Efficient location management based on moving location areas. In *Proceedings IEEE INFOCOM 2001: Conference on Computer Communications*: Vol. 1 (pp. 3–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2001.916681>.
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Highway Capacity Manual 6th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. Volume 1: Concepts*.
3. Daganzo, C.F. (1994). The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4), 269–287. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7).

4. Bramich, D.M., Menéndez, M., & Ambühl, L. (2022). Fitting Empirical Fundamental Diagrams of Road Traffic: A Comprehensive Review and Comparison of Models Using an Extensive Data Set. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14104–14127. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3142255>.
5. Abramova, L., & Kapinus, S. (2018). Balance determination between parameters of road transport. *Municipal economy of cities. Series: «Engineering science and architecture»*, 140, 91–97. <https://eprints.kname.edu.ua/48940/1/5149-10226-1-SM.pdf>.
6. Kapinus, S. (2018). *Development of decision-making models in road traffic control systems* [PhD dissertation abstract, Kharkiv National Automobile and Highway University]. ElArKhADI. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/ecd5ae4b-0148-4978-b0c8-79b2198367e8>.
7. Pustiulha, S., Prydiuk, V., & Samostian, V. (2019). A multidimensional geometric model of the functioning of the transport stream on a section of the road network. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 1(12), 135–145. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.66>.
8. Vũ Đức Minh. (2021). *Improvement of traffic management efficiency in transport zones of a city* [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. KhNAHU. https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/Захисти_PhD/Дисертація_Міннь.pdf.
9. Khan, J.A., & Tarry, S.R. (2018). Speed spot study by comparing time mean speed and space mean speed: A case study. *International Journal of Advanced Science and Research*, 3(1), 97–102. <https://www.allsciencejournal.com/assets/archives/2018/vol3issue1/3-1-59-588.pdf>.
10. Haque, N.N., Halder, S., Islam, A., Nag, R., Alam, R.B., & Hassan, M. (2013). *Traffic Speed Study* (Technical Report). AUST. <https://doi.org/10.13140/2.1.5069.3923>.
11. Road Safety Authority. (2012). *Free speed survey 2011 (Urban and Rural)*. RSA. https://www.rsa.ie/docs/default-source/road-safety/r4.1-research-reports/speed/free-speed-survey-2011.pdf?Status=Master&sfvrsn=ba80d98a_3.
12. Sarkar, D.R., & Kumar, P. (2024). An investigation of traffic speed distributions for uninterrupted flow at blackspot locations in a mixed traffic environment. *IATSS Research*, 48(2), 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.03.004>.
13. Mondal, S., & Gupta, A. (2021). Speed distribution for interrupted flow facility under mixed traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 570, Paper 125798. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125798>.
14. Chung, C.C., & Gartner, N. (1973). *Acceleration Noise as a Measure of Effectiveness in the Operation of Traffic Control Systems* (Working Paper). Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology. <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/5329/OR-015-73.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
15. Shevchenko, V. (2023). *Determination of rational parameters of progressive traffic control on urban highways* [PhD dissertation, Kharkiv National Automobile and Highway University]. ElArKhADI. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/items/a3f86476-55b5-4ebf-81fb-c1f08859a70a>.
16. Korn, G.A., & Korn, T.M. (2000). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review* (Revised Ed.). Dover Publications. <https://ru.scribd.com/document/530807645/Mathematics-Handbook-for-Scientists-and-Engineers>.

P. Horbachov, S. Svichynskyi. The average speed of a dense traffic flow with one slow-moving vehicle on a road section with limited manoeuvring opportunities

Vehicle speed is the main parameter that defines the quality of service for private transport users since a driver's ability to choose it freely determines the comfort level when travelling in urban road networks. In present transport science, only the regularities in speed values in free flow conditions, where the speed variable fits with the normal distribution, are well-researched and generally recognised. The distribution of speed in other traffic conditions remains poorly studied. From this point of view, it is relevant to study the reasons for speed fluctuations in traffic conditions opposite to free flow, i.e., the movement of a dense vehicle platoon on a single-lane section of a road where overtaking and passing are impossible. This study should begin with determining the formula for calculating the average speed of a dense traffic flow at the exit of a section with the mentioned traffic restrictions, provided that the order of vehicles in the platoon at the entrance to the section is random. This article is devoted to obtaining the desired formula in the simplest situation – when there is only one slow-moving vehicle in the flowing platoon that limits the speed of the other vehicles. Obtaining such a formula establishes the basis for further research on the regularities in the traffic speed values in dense traffic conditions. It means that it is possible to approach the estimation of the

first moment – mean – which is one of the main characteristics of the studied random variable.

Keywords: traffic speed, average speed, traffic flow, flow density, traffic lane, traffic conditions, analytical modelling, transport system.

ГОРБАЧОВ Петро Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

СВІЧИНСЬКИЙ Станіслав Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

Peter HORBACHOV, DSc in Transport Systems, Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: gorbachov.pf@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8180-4072.

Stanislav SVICHYNSKYI, PhD in Transport Systems, Associate Professor at Transport Systems and Logistics Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, e-mail: stas_svichinsky@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8549-1712.

DOI 10.36910/automash.v2i23.1526