

УДК 625.72

Н.В.Смірнова

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ВПЛИВ ІНТЕРВАЛІВ ТА ДИСТАНЦІЙ МІЖ АВТОМОБІЛЯМИ У ТРАНСПОРТНОМУ
ПОТОЦІ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Виконано аналіз дистанцій та інтервалів між автомобілями. Виконано моделювання руху транспортних потоків та дослідження його пропускної здатності. Реалізовано уточнення моделі розподілу інтервалів для оцінки можливості виконання обгонів, що необхідно для моделювання транспортних потоків на ділянках доріг з різними дорожніми умовами на двохсмугових дорігах II - IV категорій. Приведені результати моделювання.

Ключові слова: автомобільна дорога, дистанція, інтервал між автомобілями, пропускна здатність, транспортні діаграми.

Рис 4. Табл 2. Форм 6. Літ 10

Н.В.Смірнова

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРВАЛОВ И ДИСТАНЦИЙ МЕЖДУ АВТОМОБИЛЯМИ В
ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Выполнен анализ дистанций и интервалов между автомобилями. Выполнено моделирование движения транспортных потоков и исследование его пропускной способности. Реализовано уточнение модели распределения интервалов для оценки возможности выполнения обгонов, что необходимо при моделировании транспортных потоков на участках дорог с различными дорожными условиями на двухполосных дорогах II - IV категорий. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: автомобильная дорога, дистанция, интервал между автомобилями, пропускная способность, транспортные диаграммы.

N.Smirnova

DEPENDENCE OF HIGHWAY CAPACITY FROM INTERVALS AND DISTANCES
BETWEEN VEHICLES IN A FLOW

The analysis of distances and intervals between cars was performed. Modeling of traffic flow and the research of its capacity was done. The number of intervals sufficient to perform a variety of overtaking maneuvers, integration into transit traffic at crossroads or at merge of the bands and so on, defines speed modes of individual vehicles and traffic in general, determines the capacity of individual road sections including ability to perform such maneuvers. The purpose of this article is to refine the model of intervals distribution to assess the possibility of the overtaking, that is necessary to simulate the traffic flow on the road sections with different road conditions on two-lane roads of II - IV categories. Normalization of minimal visibility of the road, to substantiate the minimal radius of vertical convex curves to justify design decisions when designing roads was performed. In practice these driving distances are considered as an optimal ones, following the criteria of efficiency and safety: large distance reduces the capacity of roads and causing drivers behind you, the desire to go to overtake, making it difficult to move, and less distance leads to the danger of collision with vehicles in their sudden stop. To solve these problems, one usually uses the laws of probability distribution of intervals between cars in the flow. Intervals distribution model refinement implemented to assess the possibility of the overtaking, which is necessary for the simulation of traffic flow on the road sections with different road conditions on two-lane roads of II - IV categories. The results of simulation were represented

Keywords: road, distance, interval, capacity, traffic diagrams.

Постановка проблеми

Актуальність досліджень з моделювання руху транспортних потоків на двохсмугових дорогах II, III, IV категорій, підтверджена аналізом їх протяжності: в існуючій дорожній мережі України протяжність двохсмугових доріг становить 148,1 тис. км або 89,3 %, а багатополюсних 2,6 тис. км або 1,6 %; односмугових доріг V категорії 15,1 тис. км або 9,1 %. Моделювання руху транспортних потоків та дослідження його пропускної здатності неможливо без аналізу дистанцій і інтервалів між автомобілями: дистанції характеризують взаємне положення автомобілів в просторі (вздовж дороги), інтервали - те ж, в часі. Дистанції вимірювати набагато складніше, ніж інтервали. Інтервали між автомобілями в потоці нерівномірні в часі і в просторі. Кількість інтервалів, достатніх для виконання різних маневрів обгону, вбудовування в транзитний потік на перехрестях або при злитті смуг і т.п., визначає швидкісні режими окремих автомобілів і транспортних потоків в цілому, визначає величину пропускної здатності окремих ділянок доріг з урахуванням можливостей виконання зазначених маневрів. У вирішенні цих задач використовуються закономірності розподілу ймовірностей інтервалів між автомобілями в потоці.

©Н.В.Смірнова

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У будь-якій точці дороги і в будь-який момент часу інтервали між автомобілями випадкові. Простіше було б моделювати рух потоку при постійних інтервалах. Саме такий традиційний підхід в існуючих публікаціях при розрахунках пропускної здатності при проектуванні доріг. При цьому вважають, що всі автомобілі потоку рухаються з постійною швидкістю і з постійними дистанціями і інтервалами [4,7].

Така «колонна» модель потоку абсолютно не відповідає структурі потоку при інтенсивностях менше пропускної здатності. Реальний потік при таких інтенсивностях неоднорідний за швидкостями і нерівномірний у часі і в просторі. Крім того, при постійних інтервалах лише в окремі рідкісні дні організованого руху колон однорідних автомобілів поліпшується регулярність потоку, однак повної синхронності руху автомобілів не відзначається.

Метою цієї статті є уточнення моделі розподілу інтервалів для оцінки можливості виконання обгонів, що необхідно для моделювання руху транспортних потоків на ділянках доріг з різними дорожніми умовами на ділянках двохсмугових доріг II - IV категорій.

Види дистанцій і інтервалів в потоці

Моделювання руху транспортних потоків та дослідження його пропускної здатності неможливо без аналізу дистанцій і інтервалів між автомобілями: дистанції характеризують взаємне положення автомобілів в просторі (вздовж дороги), інтервали - те ж, в часі. Дистанції вимірювати набагато складніше, ніж інтервали.

Для аналізу дистанцій необхідно на плані дороги миттєво зафіксувати потік автомобілів (наприклад, на аерознімку); для аналізу інтервалів досить фіксувати секундоміром моменти перетину автомобілями контрольного створу, перпендикулярного осі дороги на обраному ділянці. При інтенсивності потоку Q авт/год середній інтервал між автомобілями $t_{cp}=3600/Q$ с. При відомій кількості автомобілів на ділянці 1 км - щільності потоку R (авт/км) середня дистанція $l_{cp}=1000/R$ м.

Мінімально безпечні дистанції l_0 та інтервали t_0 , рис. 1, формуються при щільному проходженні автомобілів один за одним.

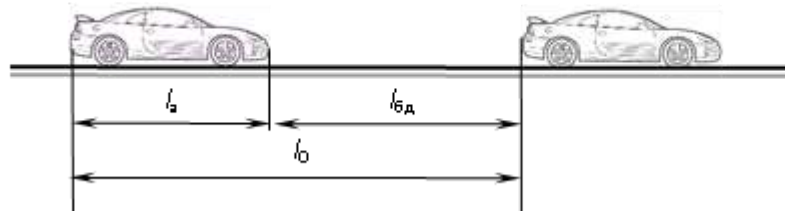


Рис.1. Статичний l_a і динамічний l_0 габарити автомобіля.

Мінімально безпечну дистанцію l_0 називають динамічним габаритом - це як би віртуальна довжина автомобіля при русі, що включає статичний габарит l_a і зазор безпеки - мінімально безпечну дистанцію $l_{бд}$.

Водій повинен дотримуватися $l_{бд}$ для забезпечення безпечного руху за що їхав, і може її зменшувати лише при маневрах зміни смуги для виконання обгону. Величина $l_{бд}$, головним чином, залежить від швидкості руху, часу реакції водія і зчпних властивостей проїзної частини. Якщо в міру наближення до попереду йде автомобілю фактична дистанція до нього стає менше величини $l_{бд}$, обраної раніше водієм, то він змушений знижувати швидкість і тим самим коригувати $l_{бд}$ для забезпечення безпечного руху. Зі зменшенням швидкості величина $l_{бд}$ скорочується і досягає мінімальної дистанції запасу $L_{зап}$ в заторах. Тому максимальну щільність потоку можна визначити величиною $R_{max} = 1000/(l_a + L_{зап})$ авт/км. Згідно з рекомендаціями безпечного водіння відстань $L_{зап}$ до переднього автомобіля має бути не менше 1-1.5 м, а між автобусом або тролейбусом і вантажним автомобілем великої вантажопідйомності - не менше 3-4 м.

Режим руху потоку з дистанціями, рівними динамічному габариту l_0 - це режим пропускної здатності з інтенсивністю Q_{max} . Зрозуміло, що пропускної здатності відповідає щільність потоку $R_m = 1000/l_0$. Так як величина l_0 залежить від швидкості, то Q_{max} і відповідна

її щільність потоку R_m також залежать від швидкості потоку.

При щільності потоку R менше R_m (або відповідно при інтенсивності менше Q_{max}), рис 2, дистанції між автомобілями більше динамічних габаритів за рахунок вільних дистанцій L_{cv} .

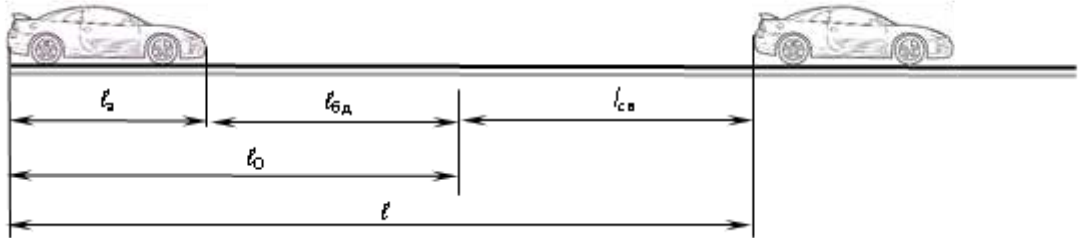


Рис. 2. Дистанції при інтенсивності потоку менше пропускнув здатності.

У загальному випадку дистанція між автомобілями - це сума динамічного габариту l_0 і вільної дистанції L_{cv} . При відомих середніх значеннях l_0 і L_{cv} щільність потоку

$$R = 1000 / (l_0 + l_{cv}) \text{ авт/км або } r = 1 / (l_0 + l_{cv}) \text{ авт/м.} \quad (1)$$

Кожній дистанції в просторі відповідає інтервал в часі по відомій залежності (приймаючи постійної швидкості v проходження дистанції) $t = l / v$, з тими ж індексами: мінімально безпечний інтервал t_{00} , динамічний габарит t_0 , вільний інтервал t_{cv} і т.д. Надалі прийнято, що для будь-якого автомобіля в будь-якій точці дороги і в будь-який момент часу лише вільний інтервал t_{cv} є випадковою величиною; всі інші властиві автомобілю інтервали (і відповідні дистанції) функціонально залежать від швидкості та показників дорожніх умов.

Залежність мінімально безпечної дистанції від швидкості і дорожніх умов

Динамічний габарит l_0 найчастіше [1] оцінюють за відстанню S_0 , яке проходить автомобіль до повної зупинки перед перешкодою:

$$S_0 = S_p + S_T + S_3, \quad (2)$$

де S_p - шлях, пройдений за час реакції водія,

S_T - шлях гальмування,

S_3 - запас.

Такі оцінки використовують для нормування мінімальної відстані видимості дороги, для обґрунтування мінімальних радіусів вертикальних опуклих кривих, для обґрунтування конструктивних рішень при проектуванні доріг і т.п. По суті, такий же підхід покладено в основу експертних розрахунків при розслідуванні ДТП [1, 6]:

$$S_0 = S_p + S_2 + S_3 + S_4, \quad (3)$$

де S_2 - шлях, пройдений за час запізнювання спрацьовування гальмівної системи,

S_3 - шлях, пройдений за час наростання уповільнення від нуля до максимального j_{max} ,

S_4 - шлях руху юзом з максимальним уповільненням j_{max} .

При проектуванні доріг гальмівний шлях розраховують з тієї умови, що кінетична енергія mv^2 на початку гальмування повністю витрачається на роботу $S_T \Sigma P$ сил опору руху на шляху гальмування, що дає $S_T = v^2 / (2g(\phi + i + f))$. При експертизі ДТП шлях юза S_4 , як некерованого руху із заблокованими колесами, у формулі (3) розраховують з умови равноуповільненого руху до зупинки з уповільненням j_{max} , що дає $S_4 = v^2 / (2 j_{max})$. Величину розрахункового максимального уповільнення j_{max} при ДТП оцінюють з рівності сили інерції $m j_{max}$ і сили зчеплення коліс з проізною частиною ϕG (m і G - маса і вага автомобіля), що дає $j_{max} = \phi g$.

Практикуемі оцінки динамічного габариту l_0 щодо остановочного шляху S_0 лише частково відповідають ситуації руху автомобілів у потоці:

по-перше, а) залежності (2) і (3) засновані на повному використанні зчпних властивостей

проїзної частини і максимальному уповільненні автомобіля (випадок екстреного гальмування), б) при русі в потоці при взаємодії з іншими автомобілями водій практично завжди використовує службове гальмування з частковим використанням зчепних властивостей і уповільненням j в 2-5 разів менше максимально можливого j_{\max} .

по-друге, а) залежності (2) і (3) передбачають повну зупинку автомобіля, б) при русі в потоці повна зупинка передбачена тільки за межами транзитної смуги руху або в екстрених випадках ДТП, або при щільності потоку, близької до насиченої (затору).

по-третє, а) залежно (2) перешкода нерухома, б) при русі в потоці водій реагує на рухомий попереду автомобіль і на режим його руху, і, в першу чергу, на «стоп - сигнали», керовані попереду рухомим водієм; якщо передній автомобіль гальмує, то і наступний за ним - теж, тобто автомобілі гальмують спільно.

З урахуванням викладеного, для оцінки величини динамічного габариту l_0 досліджуємо масовий випадок, коли автомобіль наздогнав той автомобіль, що їде попереду, і, для безпечного руху, водій прийняв дистанцію $l_{\delta 0}$ від бампера свого автомобіля до заднього бампера автомобіля, що їде попереду. Таким чином, при швидкості v (м/с) динамічний габарит

$$l_0 = l_a + l_{\delta d} = l_a + vt_{\delta d} \quad (4)$$

Величину безпечної дистанції $l_{\delta 0}$ (рівний $vt_{\delta 0}$) водій приймає такою, щоб не пропустити момент гальмування автомобіля, що їде попереду, тобто, водій реагує на «стоп-сигнали» так, щоб не запізнитися з необхідним гальмуванням. Згідно такої загальноприйнятої практики водіння час руху по відрізу динамічного габариту - це мінімально безпечний інтервал t_0 в часі між автомобілями в потоці, тобто,

$$t_0 = l_a / v + t_{\delta d} \quad (5)$$

Величину безпечного інтервалу $t_{\delta 0}$ і безпечної дистанції $l_{\delta 0}$ оцінимо також згідно відомим рекомендаціям з практики безпечного водіння і одночасного (з урахуванням реакції на «стоп-сигнали») гальмування з переднім автомобілем, наприклад, [3]. При сухому покритті (коефіцієнт зчеплення шини з дорожнім покриттям $\varphi = 0,4-0,6$) рекомендується «тримай дистанцію в метрах, рівну половині швидкості в кілометрах» [10], тобто приймати $l_{\delta 0} = v \cdot 3,6/2$ і тоді $t_{\delta 0} = l_{\delta d} / v \approx 2$ с; при забрудненому і мокрому покритті ($\varphi = 0,2-0,3$) рекомендується «тримай дистанцію в метрах, рівну швидкості в кілометрах»), тобто $t_{\delta 0} \approx 4$ с; при слизькому покритті, ожеледі ($\varphi = 0,05-0,15$) «тримай дистанцію, рівну подвоєною швидкості в кілометрах»), тобто $t_{\delta 0} \approx 8$ с. Уявімо ці рекомендації у вигляді таблиці 1, в якій не заповнені осередки для не реальних швидкостей при брудному і мокрому покритті і ожеледі. Ці рекомендації відповідають гіперболічній залежності від коефіцієнта зчеплення φ інтервалу $t_{\delta 0} = l_{\delta 0} / v$ - часу руху з безпечної дистанції, тобто:

$$t_{\delta 0} \approx 1 / \varphi \quad (6)$$

В останній колонці табл. 1, в дужках наведені значення коефіцієнта зчеплення, точно відповідні гіперболічній залежності (6).

Таблиця 1

Залежність безпечної дистанції від коефіцієнта зчеплення

Коефіцієнт зчеплення	Безпечна дистанція, м в залежності від швидкості, км/год									Інтервал $t_{\delta 0}$, с Всі швидкості
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
0,4-0,6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	1,8 (0,55)
0,2-0,3	20	40	60	80	100	120	140			3,6 (0,28)
0,05-0,15	40	80	120	160						7,2 (0,14)

У практиці водіння зазначені дистанції вважаються оптимальними за критеріями

©Н.В.Смірнова

ефективності та безпеки руху: а) більша дистанція знижує пропускну здатність доріг і викликає у водіїв, що рухаються ззаду, бажання піти на обгін, що ускладнює рух, б) при меншій дистанції з'являється небезпека наїзду на транспортні засоби при їх раптовій зупинці.

Звертається увага на загальновідомість і достовірність значення інтервалу $t_{\text{бд}} = 1,8$ с для сухого покриття (перший рядок $t_{\text{бд}}$ в табл. 1). Саме ці умови, прийняті як оптимальні для однорідного потоку легкових автомобілів у всіх посібниках з розрахунками пропускну здатності і їм відповідає її максимальна величина $3600/1,8 = 2000$ авт/ч. З погіршенням зчпних властивостей пропускну здатність знижується назад пропорційно коефіцієнту φ і ступеня неоднорідності потоку.

Транспортні діаграми і пропускну здатність

Викладені особливості формування дистанцій і інтервалів в потоці прийняті як вихідні для побудови транспортних діаграм (залежностей інтенсивності потоку Q від його щільності R) та розрахунків пропускну здатності двосмугових доріг при різних зчпних властивостях проїзної частини [3].

Вихідними даними прикладу моделювання стаціонарного режиму служать характеристики швидкості вільного руху, в табл. 2, в якій:

склад потоку: вантажні (за вантажопідйомністю: малої - Гм, середньої - Гс, великої - Гб.), автопоїзди: АП - автомобілі з причепами, АПП - автомобілі з напівпричепами, автобуси Ам - малі, Ас - середні, Аб - великі; легкові: Лм - малі, Лс - середні, Лб - великі);

мінімальна V_{min} і максимальна V_{max} швидкості вільного руху в групі;

середньоквадратичні відхилення швидкості вільного руху в групі, оцінені за правилом «три сигма», $\text{СКО} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}})/6$.

Транспортний потік істотно неоднорідний, моделювання виконувалося для типової дороги III категорії тому пропускну здатність смуги руху набагато менше максимального значення 2000 авт/год навіть при великих коефіцієнтах зчеплення.

Всі транспортні діаграми при коефіцієнті зчеплення від 0,1 до 0,7, наведені на рис. 2, показують істотне зниження пропускну здатності з погіршенням зчпних властивостей проїзної частини дороги.

Таблиця 2

Вихідні дані щодо вільного руху

	Всі	Гм	Гс	Гб	АП	АПП	Ам	Ас	Аб	Лм	Лс	Лб
%	100	2	3	4	5	6	7	8	9	20	14	22
V_{min}	км/год	50,0	50,0	40,0	40,0	40,0	50,0	50,0	60,0	70,0	70,0	80,0
V_{max}	км/год	70,0	70,0	65,0	65,0	65,0	80,0	70,0	90,0	100,0	120,0	150,0
V_{cp}	км/год	60,0	60,0	52,5	52,5	52,5	65,0	60,0	75,0	85,0	95,0	115,0
СКО	км/год	3,3	3,3	4,2	4,2	4,2	5,0	3,3	5,0	5,0	8,3	11,7

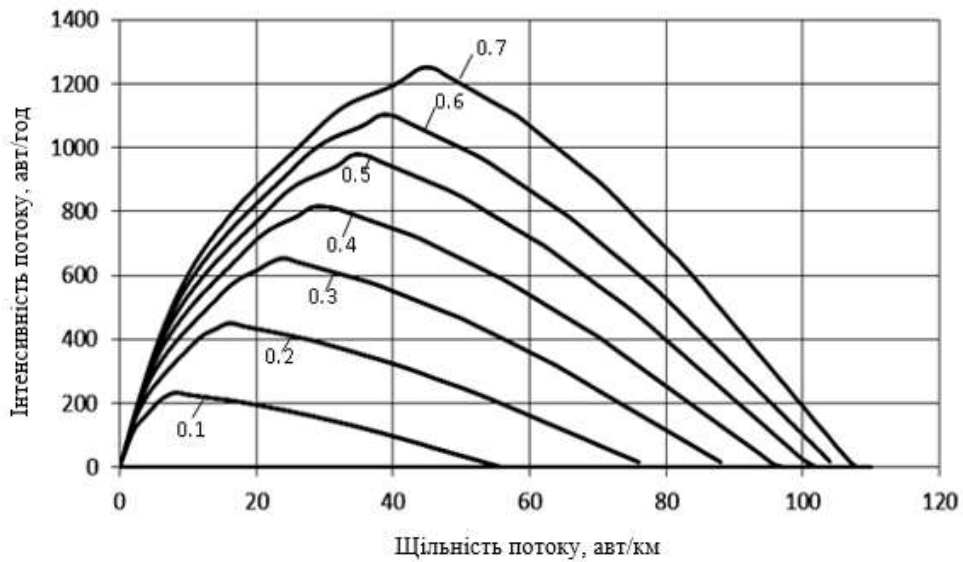


Рис.3. Транспортні діаграми при стаціонарному режимі потоку. Цифри - коефіцієнти зчеплення.

Побудовані за результатами моделювання в даному прикладі залежності середньої швидкості потоку від його інтенсивності, рис. 4, ілюструють суттєву зміну і цієї залежності, і пропускної здатності із зміною коефіцієнта зчеплення.

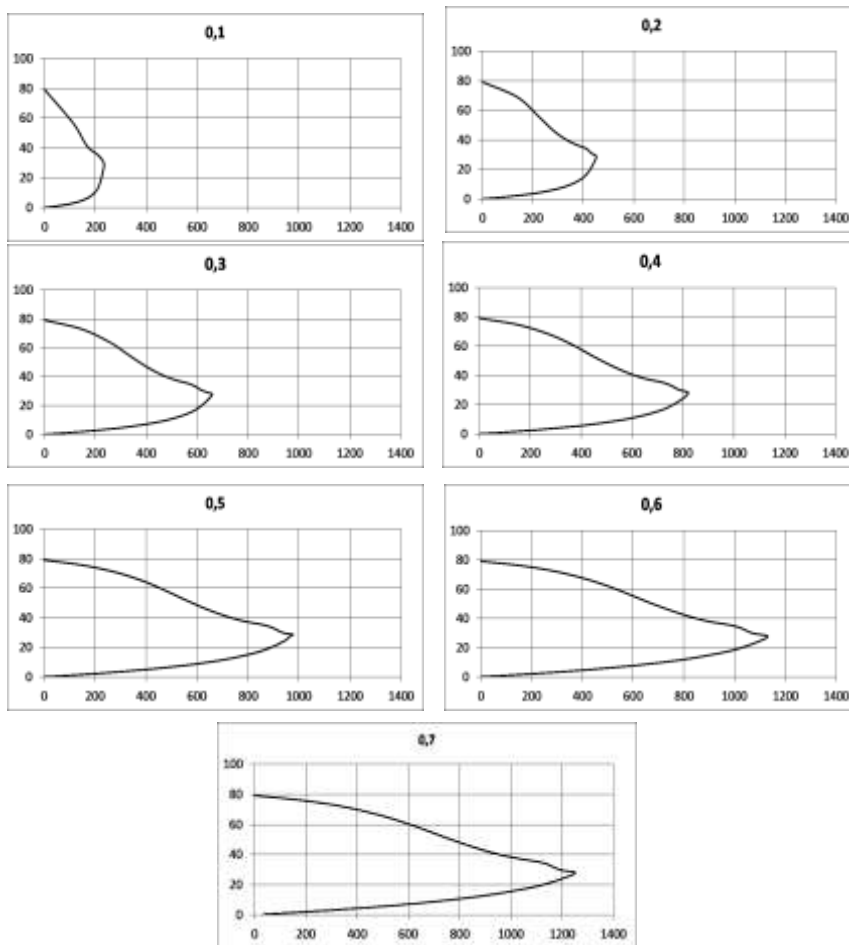


Рис.4. Залежність швидкості (по вертикалі км/год) від інтенсивності потоку (по горизонталі авт/год) для коефіцієнтів зчеплення від 0,1 до 0,7.

©Н.В.Смірнова

Висновки

Виконано аналіз дистанцій та інтервалів між автомобілями. Виконано моделювання руху транспортних потоків та дослідження його пропускну здатності.

Реалізовано уточнення моделі розподілу інтервалів для оцінки можливості виконання обгонів, що необхідно для моделювання руху транспортних потоків на ділянках доріг з різними дорожніми умовами на двохсмугових дорогах II - IV категорій.

Побудовано транспортні діаграми для різних коефіцієнтів зчеплення протягом життєвого циклу автомобільної дороги.

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.
2. Безбородова Г.Б. Моделирование движения автомобиля. / Безбородова Г.Б., Галушко В.Г. – Киев: Высшая школа, 1978. - 168 с.
3. Бельский А.Е. Расчеты скоростей движения на автомобильных дорогах / Бельский А.Е. – М.: Транспорт, 1966. – 122 с.
4. Гук В.І. Транспортні потоки: теорія та її застосування в урбаністиці / Гук В.І., Шкодовський Ю.М. – Харків, Золоті сторінки, 2009, – 202 с.
5. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Дрю Д. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
6. Илларионов В.А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / Илларионов В.А. – Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.
7. Пальчик А.М. Транспортні потоки. / Пальчик А.М. – К., НТУ, 2010 – с. 171.
8. Поліщук В.П. Теорія транспортного потоку: методи і моделі організації дорожнього руху / Поліщук В.П., Дзюба О.П. – Навчальний посібник. – К.: НТУ, 2007. –158 с.
9. Филиппов В.В. Моделирование транспортных потоков на дорогах II – IV категорий: монография / Филиппов В.В., Смирнова Н.В. – М.: ХНАДУ, 2014. – 200 с.
10. Циганков Е.С. Золоті правила безпечного водіння / Циганков Е.С. – Вид-во « Ексмо».

Стаття надійшла до редакції 12.04.2014