

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

В. М. ПЕРШАКОВ, А. О. БЕЛЯТИНСЬКИЙ,
О. В. СТЕПАНЧУК, Р. В. КРОТОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ
В АСПЕКТІ ЗАТОРОВИХ СТАНІВ
ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Монографія

Київ 2015

УДК 656.11
ББК Н53
П 279

Рецензенти:

Є. Б. Угненко – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою вишукувань та проектування доріг і аеродромів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;

А. І. Білеуш – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Інституту Гідромеханіки Національної академії наук України;

О. О. Бакуліч – кандидат технічних наук, професор, декан факультету економіки, менеджменту і права Національного технічного університету.

*Рекомендовано до друку вченою радою
Національного авіаційного університету (протокол № 2 від 18.02.2015 р).*

Дослідження транспортних потоків в аспекті заторових станів
П 279 дорожнього руху: Монографія. -- К. : НАУ, 2015. – 177 с.

ISBN 978-966-2071-01-6

У монографії приведено загальна характеристика та аналіз проблеми математичного моделювання транспортних потоків. Обґрунтовані теоретичні принципи дослідження параметрів транспортного потоку в аспекті заторових станів дорожнього руху. Викладені особливості математичного моделювання транспортного потоку та заторових станів. Приведено методика виявлення, розрахунку та оцінки заторових станів в транспортному потоці.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних фахівців, співробітників науково-дослідних, проектних, будівельних, автодорожніх організацій, а також аспірантів і студентів будівельних вищих навчальних закладів і факультетів.

ПЕРШАКОВ Валерій Миколайович, професор кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Інституту аеропортів Національного авіаційного університету, доктор технічних наук, професор, академік Академії будівництва України.

БЕЛЯТИНСЬКИЙ Андрій Олександрович, заступник директора Інституту аеропортів з наукової роботи, завідувач кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Національного авіаційного університету, академік Транспортної Академії України, академік Інженерної Академії України, член Міжнародної асоціації спеціалістів промислової гідроліки і пневматики, доктор технічних наук, професор.

СТЕПАНЧУК Олександр Васильович, докторант кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Інституту аеропортів Національного авіаційного університету, кандидат технічних наук, доцент.

КРОТОВ Роман Володимирович, аспірант кафедри реконструкції аеропортів та автошляхів Інституту аеропортів Національного авіаційного університету, магістр Автомобільно-дорожнього інституту Державного вищого навчального закладу «Донецький Національний Технічний Університет».

ISBN 978-966-2071-22-1

© В. М. Першаков та ін.
НАУ, 2015

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ АВТОМОБІЛІЗАЦІЇ ТА ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ..... | 8 |
| 1.1. Загальні відомості про сучасний стан автомобілізації..... | 8 |
| 1.2. Закономірності руху транспортних потоків і виникнення заторів..... | 18 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИНИКНЕННЯ ЗАТОРОВИХ СТАНІВ..... | 32 |
| 2.1. Дослідження виникнення заторової ситуації на перетині..... | 33 |
| 2.1.1. Математична модель заторової ситуації на перетині..... | 33 |
| 2.1.2. Визначення заторового часового інтервалу у дозволяючому такті..... | 34 |
| 2.1.3. Визначення кількості непропущених транспортних засобів під час дії дозволяючого такту..... | 36 |
| 2.1.4. Утворення заторової черги на перетині..... | 37 |
| 2.1.5. Визначення довжини заторової черги..... | 40 |
| 2.1.6. Визначення швидкості поширення затору..... | 41 |
| 2.1.7. Визначення положення транспортної одиниці у заторової черзі..... | 44 |
| 2.1.8. Визначення часового інтервалу зникнення заторової черги..... | 45 |
| 2.2. Дослідження виникнення заторової ситуації на перегоні..... | 47 |
| 2.2.1. Математична модель заторової ситуації на перегоні..... | 47 |
| 2.2.2. Визначення допустимої швидкості руху на перегоні..... | 50 |
| 2.2.3. Визначення допустимої інтенсивності руху на перегоні..... | 52 |
| 2.3. Визначення виникнення заторових станів в населеному пункті внаслідок дефіциту довжини вуличне-дорожніх мереж..... | 55 |
| 2.3.1. Визначення потрібної довжини смуг руху дорожньої мережі без перетинів в одному рівні..... | 55 |
| 2.3.2. Визначення потрібної довжини смуг руху регульованої дорожньої мережі..... | 56 |
| 2.3.3. Визначення кількості транспортних засобів, які щогодини перебувають на дорожній мережі населеного пункту..... | 57 |
| 2.3.4. Коефіцієнт забезпеченості населеного пункту дорожньою мережею..... | 58 |
| 2.3.5. Визначення необхідної довжини – забезпеченості населеного пункту дорожньою мережею..... | 59 |
| РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ ТА ЗАТОРОВИХ СТАНІВ..... | 61 |
| 3.1. Задачі експериментального дослідження..... | 61 |
| 3.2. Програма дослідження..... | 62 |

| | |
|--|-----|
| 3.3. Апроксимоване моделювання..... | 63 |
| 3.4. Визначення умов та розрахунок характеристик заторових станів | 63 |
| 3.4.1. Розрахунок основних характеристик затору транспортного потоку на регульованому перетині..... | 64 |
| 3.4.2. Визначення умов та розрахунок основних характеристик затору транспортного потоку на перегоні | 75 |
| 3.4.3. Визначення довжини вуличне-дорожньої мережі населеного пункту | 95 |
| 3.5. Математична обробка результатів експерименту, вибір та аналіз емпіричних функцій | 108 |
| 3.5.1. Апроксимоване моделювання функцій, які описують заторові ситуації на регульованому перетині | 111 |
| 3.5.2. Апроксимоване моделювання функцій, які описують заторові ситуації на перегоні..... | 130 |
| 3.5.3. Апроксимоване моделювання функцій, які описують заторові ситуації в населеному пункті внаслідок браку смуг руху | 147 |
| 3.5.4. Порівняння залежностей, які описують заторові ситуації в дорожньому русі | 162 |
| ВИСНОВКИ | 165 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ | 166 |
| ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ | 172 |

ВСТУП

Економічний розвиток будь-якої країни залежить від стану транспортної системи, розвиток якої веде до позитивних економічних і соціальних наслідків. Комфортне існування людини визначається необхідністю безпосередніх контактів у різних сферах діяльності, а це у свою чергу може викликати необхідність певного виду переміщення людини. Звідси, існуючий транспорт покращує умови проживання населення і сприяє ефективній роботі всіх підприємств і організацій.

Одним із найпоширеніших засобів перевезень у світі є саме автомобільний транспорт. Він посів чільне місце в сучасному житті людей, забезпечуючи великий обсяг перевезень у всіх сферах людської діяльності. Промисловість, будівництво, торгівля, сільське господарство не можуть нормально функціонувати без широкого використання автомобілів. Автомобільні перевезення стали невід'ємною частиною транспортного процесу і взаємодіють з усіма видами транспорту, виконуючи функцію перевізника, а саме: виконуючи підвезення вантажів і пасажирів до залізничних вокзалів, аеропортів, морських і річкових портів і т.п.

Автомобільний транспорт бере участь у виробничому процесі кожного підприємства та є важливим засобом задоволення особистих потреб громадян; за обсягами перевезень пасажирів і вантажів він займає перше місце у транспортному комплексі України і більшості держав світу. До переваг автотранспорту відносяться: мобільність, можливість доставки «від дверей до дверей» та в точно призначений термін. Забезпечуючи економію часу при перевезенні пасажирів і вантажів, він сприяє розвитку продуктивних сил суспільства, розширенню міжнародних зв'язків, залученню в процес суспільного виробництва ресурсів віддалених районів країни.

За структурою світового вантажу- і пасажирообігу на автомобільний транспорт доводиться 8 % вантажообігу, 80 % пасажирообігу від загального світового обсягу (на залізничний – 16 % вантажообігу, 11 % пасажирообігу, на трубопровідний – 11 % вантажообігу, на морський – 62 % вантажообігу, 1 % пасажирообігу, на річковий – 3 % вантажообігу, 1 % пасажирообігу, на повітряний – менш 1 % вантажообігу, 8 % пасажирообігу) [18].

Зрозуміло, що розвиток автомобільного транспорту як із економічного боку, так і з соціального має велике значення для людства. Але разом із надзвичайно великою користю і необмеженим потенціалом під час використання автомобільного транспорту виникає і дуже багато проблем, зокрема пов'язаних із його експлуатацією в населених пунктах. Ці проблеми пов'язані з перенасиченням вулична-дорожньої мережі населених пунктів автомобільним транспортом, що призводить до зниження швидкості руху, виникнення заторів, збільшення затрат часу на переміщення, а отже, призводить до зниження продуктивності роботи автомобільного транспорту, до негативного психологічного впливу на учасників дорожнього руху і мешканців, до збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод, що в свою чергу спричинює травмування і смертельні випадки людей на дорозі.

Крім того, автомобільний транспорт, його експлуатація та використання для різного роду перевезень призводить до погіршення екологічного стану міста і становить пряму загрозу безпеці екосистеми Землі в цілому.

Різке зростання автотранспортних засобів за останні роки в нашій країні призвело до перевантаження окремих ділянок вулична-дорожньої мережі значних і найзначніших міст. Зниження рівня завантаження міських вулиць шляхом оптимізації руху автотранспорту по них можна вирішити різними методами організації дорожнього руху.

При інтенсивна зростаючих темпах автомобілізації гостро постала проблема функціонування саме вулична-дорожньої мережі міст. Для пошуку шляхів вирішення даної проблеми необхідно проаналізувати основні принципи підвищення транспортно-експлуатаційних якостей існуючих автомобільних доріг і міських вулиць, забезпечення безпеки дорожнього руху, підвищення їх пропускної здатності і ефективності функціонування. Для підвищення ефективності роботи транспортних засобів у міському середовищі, швидкості доставки вантажів і перевезення пасажирів, комфортності і безпеки руху, а також для зниження собівартості перевезень необхідне покращення умов їхнього руху на автомобільних дорогах і міських вулицях. Тому все більш актуальними стають питання покращення умов руху автомобільного транспорту на вулична-дорожній мережі міст. Покращення транспортної ситуації

вимагає для свого вирішення якомога повної інформації про закономірності руху автотранспортних засобів у транспортному потоці.

Для пошуку ефективних стратегій управління транспортними потоками у містах, оптимальних рішень з проектування вулична-дорожньої мережі та організації дорожнього руху необхідно враховувати широкий спектр характеристик транспортного потоку, закономірності впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на динамічні характеристики змішаного транспортного потоку.

Теорія транспортного потоку розглядалася дослідниками у різних галузях знань: фізиками, математиками, фахівцями з дослідження операцій, транспортниками, економістами. Значний вклад у дослідженні транспортних потоків зробили Б. Гріншильдс, Г. Поттгофф, Д. Дрю, Г. Грінберг, Л. Пайпс, А. Шул, Р. Олівер, Л. Міллер, Ф. Хейт, А. Мей, В. Лейтцбах, Е. А. Дубелір, А. К. Біруля, Л. А. Кероглу, Н. Ф. Хорошилов, Н. Я. Говорущенко, М. С. Фішельсон, А. А. Поляков, Д. С. Самойлов, Д. А. Вуліс, О. А. Білятинський, В. П. Поліщук, В. І. Гук, В. К. Доля, О. О. Лобашов, Є. О. Рейцен, М. М. Осетрін та багатьох інших.

Накопичено великий досвід дослідження процесів руху, однак загальний рівень досліджень та рівень їхнього практичного використання недостатній. У зв'язку з тим, що транспортний потік нестабільний і багатогранний, отримання об'єктивної інформації про нього є найбільш складним елементом системи управління.

Тому в даній роботі автори розглянули одне з можливих рішень, яке базується на теорії транспортних потоків і дозволяє вимірювати параметри транспортного потоку в аспекті заторових станів дорожнього руху. Викладені особливості математичного моделювання транспортного потоку та заторових станів. Приведено методика виявлення, розрахунку та оцінки заторових станів в транспортному потоці.

Автори вважають своїм обов'язком висловити велику подяку рецензентам: д.т.н., проф. Є. Б. Угненко, д.т.н., проф. А. І. Білеушу, к.т.н., проф. О. А. Бакуліч за допомогу, цінні поради та зауваження при підготовці розділів монографії.

Вступ, розділ 1 написані к.т.н., доц. Степанчуком О.В., розділ 2 - д.т.н, проф. Першаковим В.М., д.т.н., проф. Белятинським А.О., аспірантом Кротовим Р.В., розділ 3 та висновки - д.т.н, проф. Першаковим В.М., аспірантом Кротовим Р.В.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ АВТОМОБІЛІЗАЦІЇ ТА ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

1.1. Загальні відомості про сучасний стан автомобілізації

Автомобільний транспорт зародився на початку ХХ ст. і є найбільш задіяним видом транспорту, що володіє великою маневреністю, швидкістю руху й можливістю доставляти вантажі безпосередньо споживачам. Розвиток транспорту в сучасних умовах пов'язаний із зростанням продуктивних сил будь-якої країни і її зовнішніми зв'язками.

Зростання обсягів виробництва, розвиток інфраструктури, удосконалення транспортних засобів сприяли різкому збільшенню обсягів перевезень, що призвело до значного збільшення кількості транспортних засобів.

З усіх видів транспорту автомобільний транспорт розвивається найдинамічніше. Це зумовлено можливостями його широкого використання, комунікабельністю й надійністю. Транспортну інфраструктуру складають: автотранспортні засоби, дорожня мережа та її елементи, автовокзали, автостоянки, господарчі об'єкти, автозаправні станції і підприємства паливо-забезпечення, дорожньо-ремонтне господарство, підприємства технічного обслуговування і ремонту автомобілів і т. д.

Аналізуючи статистичні дані розвитку автотранспорту, можемо відмітити швидкі темпи його зростання. Кількість автотранспортних засобів у 1900 році в усьому світі нараховувалось 11 тисяч автомобілів, у 1921 – 10922 тисячі, в 1950 – 70388 тисяч, на початку 1957 року – 102827 тисяч, на даний час – 1 143 231 тисяча автомобілів [53].

У період з 1950 по 2014 рр. світовий парк автотранспортних засобів, за різними джерелами, зріс в 16,5 разів. За останні роки (в порівнянні з 1996 р.) приріст автопарку склав 27 %, а чисельність населення збільшилася тільки на 4 %. Зараз у світі нараховується 833342 тис. легкових автотранспортних засобів [52, 53], це 73,9 % від загальної кількості автомобілів. Із загальної кількості легкових автомобілів приблизно 14,5 % знаходиться в США, 7,1 % – в Японії і 20 % – в чотирьох європейських країнах: Німеччині, Франції, Італії і Великобританії [54].

У 2014 році на кожних 1000 чоловік у світі припадало 118 легкових автомобілів. Разом із цим існують значні регіональні відмінності: у деяких країнах показник склав 2–10 автомобілів на 1000 жителів [54], але в деяких країнах цей показник перевищує 500 автомобілів на 1000 мешканців. Це нормальний показник для багатьох європейських країн (табл. 1.1). Рівень автомобілізації (250–300 автомобілів) дані країни досягли ще в 60–70-х роках минулого століття. Україна в порівнянні з іншими країнами має показник у чотири рази менший. Треба відмітити, що на 1000 мешканців в Україні припадає 191 автомобіль, а всього нараховується 8 млн. 700 тисяч автомобілів, що ставить Україну на 69 місце по рівню автомобілізації серед 145 країн [52].

Таблиця 1.1

Рівень автомобілізації в деяких країнах світу

| Країна | Населення, тис. чол. | Кількість легкових автомобілів, тис. шт. | Кількість комерційних автомобілів, тис. шт. | Загальна кількість автомобілів, тис. шт. | Забезпечення авто на 1000 мешканців |
|---------------|----------------------|--|---|--|-------------------------------------|
| У світі | 7043106 | 833342 | 309888 | 1143231 | 162 |
| Бруней | 412 | 120,0 | 240,0 | 360,0 | 873 |
| Пуерто-Ріко | 3652 | 2700,0 | 290,0 | 2990,0 | 819 |
| США | 313874 | 120901,6 | 130595,5 | 251497,1 | 801 |
| Ісландія | 321 | 210,0 | 33,0 | 243,0 | 758 |
| Люксембург | 531 | 350,0 | 39,0 | 389,0 | 733 |
| Австралія | 22724 | 13000,0 | 3 436,0 | 16 436,0 | 723 |
| Кувейт | 3250 | 850,0 | 1 500,0 | 2350,0 | 723 |
| Мальта | 419 | 250,0 | 47,0 | 297,0 | 708 |
| Італія | 59540 | 37078,0 | 4 922,0 | 42000,0 | 705 |
| Фінляндія | 5414 | 3037,0 | 530,0 | 3567,0 | 659 |
| Нова Зеландія | 4433 | 2425,0 | 459,0 | 2884,0 | 651 |
| Литва | 2988 | 1753,0 | 152,0 | 1905,0 | 638 |
| Канада | 34754 | 20750,0 | 995,0 | 21745,0 | 626 |
| Норвегія | 5019 | 2433,0 | 571,0 | 3004,0 | 599 |

Закінчення табл. 1

| | | | | | |
|-----------|--------|---------|---------|---------|-----|
| Японія | 127561 | 59421,0 | 16705,0 | 76126,0 | 597 |
| Австрія | 8430 | 4584,0 | 426,0 | 5010,0 | 594 |
| Іспанія | 46761 | 22248,0 | 5233,0 | 27481,0 | 588 |
| Швейцарія | 7997 | 4255,0 | 420,0 | 4675,0 | 585 |
| Франція | 65677 | 31600,0 | 6538,0 | 38138,0 | 581 |
| Беларусь | 9464 | 2900,0 | 460,0 | 3360,0 | 355 |
| Росія | 143178 | 38748,0 | 6637,0 | 45385,0 | 317 |
| Казахстан | 16791 | 3850,0 | 690,0 | 4540,0 | 270 |
| Україна | 45593 | 7300,0 | 1400,0 | 8700,0 | 191 |
| Ефіопія | 91729 | 82,0 | 60,0 | 142,0 | 2 |

Процес автомобілізації найбільших міст Західної Європи, що почався в 50-ті роки минулого сторіччя, проходив практично за однією закономірністю для усіх країн: лінійний ріст кількості автомобілів до рівня 300-350 авт./1000 жителів, потім уповільнення зростання та стабілізація при 550 ± 50 авт./1000 жителів [2].

Багато спеціалістів-транспортників притримуються думки, що існує визначена межа насиченості індивідуальними автомобілями, при досягненні якої рівень автомобілізації стабілізується і проходить тільки ротація парку [60]. У роботах [24,29,58,59] прийнято, що показник – 600 легкових автомобілів на 1000 жителів, який вже досягнуто в різних країнах (16% світового населення і 78 % світового автомобільного парку), – не є межею. Існує думка, що при таких показниках до повної насиченості ще далеко, тому що починає відбуватися процес, який отримав назву *multy-motorisation* (користування сім'єю декількома легковими автомобілями). При цьому у національному звіті США для Світового дорожнього конгресу [24, 58] за результатами аналізу багаторічного тендеру зроблений висновок, що країна вступила у фазу насиченості. У цілому в розвинутих країнах проходить зниження темпів росту автомобільного парку, який в останні роки складає 1–2 %. У Північній Америці вже достатньо довго спостерігається ріст чисельності сімей, які мають два автомобілі і більше. У США їх доля вже досягла 58 % [59]. У Західній Європі ріст чисельності середнього класу і його благополуччя супроводжується аналогічними процесами. Так, наприклад, в Іль-де-Франс (агломерація Парижу) у 1991 році 75 % домогосподарств мали один автомобіль, а 20 % – два і більше [24]. Такі тенденції спостерігалися і у Великобританії, наприклад, за період

1992–2000 роки відбулася зміна: кількість домогосподарств без автомобілів знизилась з 32 до 26 %; доля господарств з одним автомобілем залишилася сталою – 45 %, а доля домогосподарств з двома автомобілями і більше збільшилась із 24 % до 27 %; середня кількість автомобілів, яка приходить на одне домогосподарство збільшилась з 0,86 до 1,04 [24].

Особливо цікавою для нас є динаміка зростання автомобільного парку в містах країн Східної Європи та прогнозовані показники, що приймаються фахівцями цих країн. Темпи зростання автомобільного парку в містах Східної Європи, звичайно, вищий, ніж у містах Західної Європи. Так, зростання парку Парижа становило 1 %, Варшави – 7 % [24], а зростання парку автомобільного транспорту для України в середньому складає 4,8 %, хоча у 2008 р. цей показник складав – 6,9 % [14] (рис. 1.1). Слід зазначити, що у країн Східної Європи збільшення частки поїздок, що здійснюються з використанням легкового автомобіля, виявилось менше, ніж зростання автомобільного парку. Україна проходить той самий етап розвитку і формування автомобільного парку, який 30–50 років тому пройшли розвинуті країни світу.

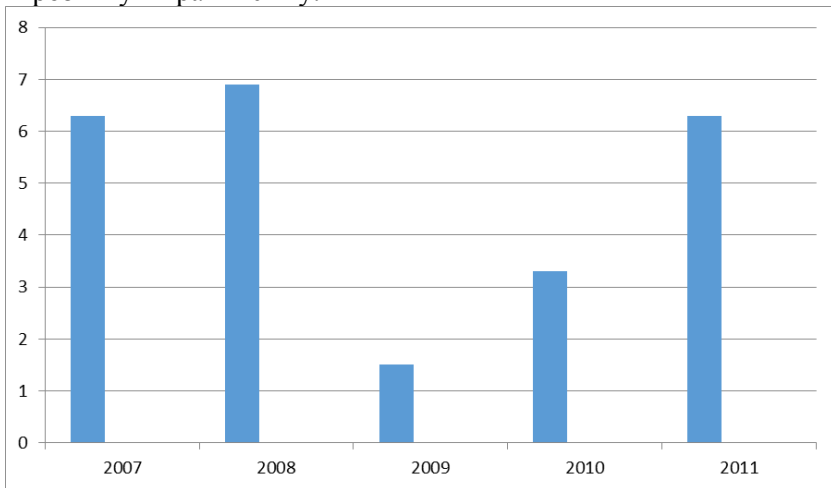


Рис. 1.1. Зростання автомобільного парку України в період 2000–2014 рр., у %

В Україні інтенсивний ріст парку транспортних засобів розпочався в 1990-х роках і стабільно продовжується. Цей процес пря-

мий і безпосередньо пов'язаний із набуттям економічної свободи громадянами України, свободи щодо вибору місця проживання і прикладення праці. Це в свою чергу призвело до швидкого росту автомобілізації, що підтверджує бажання українців до підвищення мобільності та якості життя. Автомобіль став не лише засобом переміщення, а й підтвердженням статусу життя, символом благополуччя і успішності в житті.

Згідно даних Державної служби статистики України [14], видно, що Україна стоїть на шляху глобальної автомобілізації. При цьому цей процес проходить, в основному, за кошти населення, без прямого впливу держави.

Такий швидкий ріст відбувається, головним чином, за рахунок збільшення кількості легкових автомобілів (рис. 1.2), яких зареєстровано на 2014 р. – 7,3 млн. [54]. На тисячу українців нині припадає 160 легкових автомобілів, що в 3,5 рази нижче рівня розвинутих країн.

За поданими даними [51], у різних областях України кількість автомобілів на тисячу населення відрізняється в рази. Лідують місто Київ та Київська область 343 і 255 авто на 1000 жителів відповідно. На третьому місці – Запорізька область з показником 246 авто, на четвертому місці, з кількістю 227 автомобілів на 1000 жителів, – Волинська область. П'яту сходинку зайняла Кіровоградська область, на шостому – Рівненська з показником 204 авто, на сьомому – Дніпропетровська – 203 автомобіля на 1000 жителів, на восьмому – Одеська і на дев'ятому місці – Харківська область. У Донецькій та Херсонській областях цей показник нижчий, ніж у середньому по країні, відповідно 179 та 164 авто на 1000 жителів. А в усіх інших західних областях (Чернівецькій, Закарпатській, Львівській, Тернопільській та Івано-Франківській) кількість автомобілів на 1000 жителів не дотягує до середнього рівня по країні. Найменша кількість автомобілів на 1000 жителів в Україні – у Чернігівській та Львівській областях, відповідно – 131 і 103 авто на 1000 жителів, що практично втричі менше, ніж у Києві.

У світовій практиці прийнято наступну класифікацію країн з рівнем автомобілізації:

- низький рівень – менше 50 автомобілів /1000 мешканців;
- середній рівень – 50–300 автомобілів /1000 мешканців;
- високий рівень – понад 300 автомобілів /1000 мешканців [39].

Згідно ДБН 360–92**, пропускну здатність мережі вулиць, до-ріг і транспортних перетинів та число місць зберігання автомобілів треба визначати, виходячи з рівня автомобілізації. Так, на 1000 чоловік повинно припадати 280–350 легкових автомобілів (включаючи 4–5 таксі, 2–3 прокатних і 3–4 відомчих автомобілів) та 25–40 вантажних автомобілів, у залежності від складу парку [13].

Як бачимо, по рівню автомобілізації Україна має середній рівень, що на даний час не належить до небезпечної межі. Але така ситуація неоднакова по всій території України. Так, у великих і найкрупніших містах, ця межа є близькою до критичної. Значна концентрація населення в містах і приміській зоні призвела до перевантаження вулично-дорожньої мережі великих і найкрупніших міст транспортними засобами.

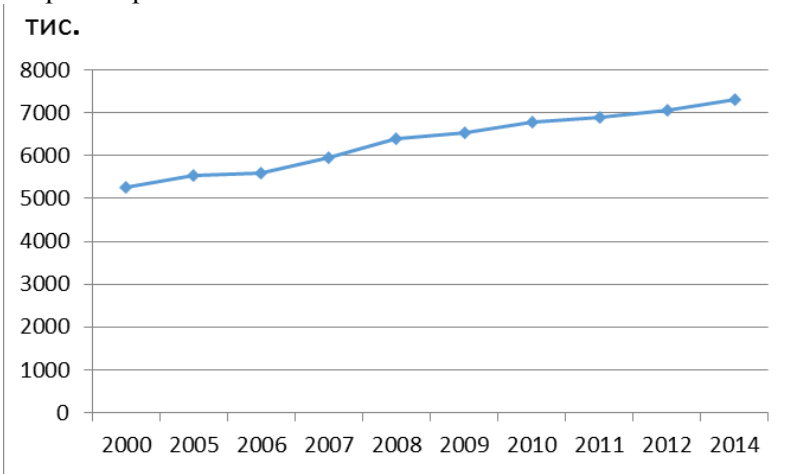


Рис. 1.2. Темпи росту кількості легкових автомобілів в Україні

Різні темпи зростання автомобільного парку в регіонах України обумовлені рядом факторів, зокрема відмінностями економічних і соціальних умов у регіонах. Особливістю є високий темп росту рівня автомобілізації у великих і найважливіших містах, що перевищує середні показники в країні. Навантаження на вулично-дорожню мережу міста прямо пропорційне кількості мешканців, рівню їх автомобілізації та загальній рухливості економічно активної частини населення. Якщо ріст кількості мешканців міста опосередковано впливає на завантаження транспортної мережі населено-

го пункту, то збільшення механізованих автомобільних засобів та їхня рухливість безпосередньо визначають та задають нові умови її функціонування.

В якості характерного прикладу можна привести динаміку зростання парку автомобілів у м. Києві, в якому у 2000 році було зареєстровано 368,8 тис. легкових автомобілів. За 2001–2011 роки парк легкових автомобілів зріс на 339,9 тис. од. і складає 708,7 тис. од., при цьому середній річний ріст парку становив 8 % [11]. Загальна кількість автомобільного парку і прогноз її росту наведений на рис. 1.3.

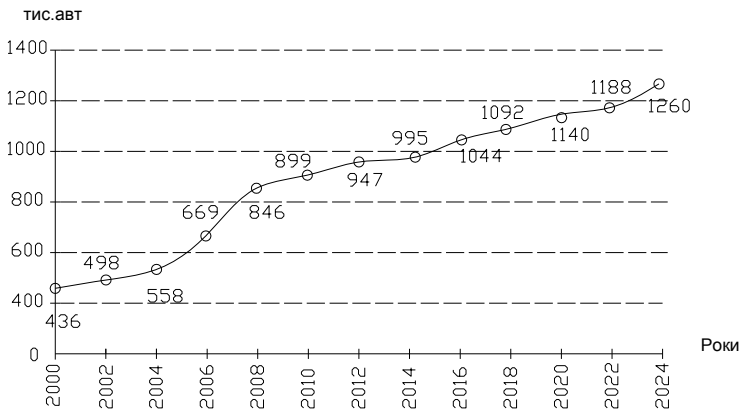


Рис. 1.3. Динаміка зростання кількості автомобільного транспорту в м. Києві

Зростання кількості парку легкового автомобільного транспорту в певній мірі можна пояснити тим, що на даному етапі розвитку транспортної галузі в Україні транспорт загального користування не може повністю задовольнити потреби громадян, тому це призводить до збільшення кількості легкових автомобілів на дорогах України, особливо у великих містах.

За останнє десятиліття мешканців сучасного міста все більше стали хвилювати дві проблеми, що заперечують одна іншу [47]:

1. Забезпечення особистого простору;
2. Швидке мобільне життя в міському середовищі.

Разом ці задачі вирішуються при застосуванні індивідуального автомобіля. При збереженні свободи вибору в переміщенні, особистого простору і комфорту автомобіль забезпечує максимальну

мобільність і швидкість реалізації об'єктивних потреб міських жителів. Індивідуальний транспорт, який повинен бути ефективним засобом, що покращує якість життя, перетворився у свою повну протилежність і є однією з основних причин, що викликає глобальну кризу [11]. Поряд із індивідуальним значний вплив на міське середовище має масовий пасажирський та вантажний транспорт. Треба відмітити, що міський автомобільний транспорт створює необхідні умови для ефективної роботи всіх підприємств і організацій, а також покращує умови проживання населення. Він забезпечує можливості життєдіяльності міста як цільної системи з його адміністративними, господарськими, культурно-просвітницькими та іншими функціями.

Міський автомобільний транспорт – комплекс різних видів транспорту, які здійснюють перевезення населення і вантажів на території міста і найближчої приміської зони.

Обсяг транспортної роботи по перевезенню вантажів і пасажирів залежить від величини населеного пункту. Із зростанням кількості населення міста збільшується територія і дальність перевезень. Із збільшенням радіусу розселення зменшується пішохідне переміщення і збільшується кількість поїздок на транспорті. Збільшення роботи транспорту по перевезенню пасажирів залежить від кількості населення міста. У місті з населення 1млн. мешканців розмір роботи пасажирського транспорту в 40–50 разів більше, ніж у місті з населенням 100 тис. чоловік [46].

Бурхливий процес автомобілізації з кожним роком охоплює все більше число країн, постійно збільшується автомобільний парк, кількість людей, що задіяні у сфері дорожнього руху. Ріст автопарку й обсягу перевезень веде до збільшення інтенсивності руху, що в умовах міст з історично сформованою забудовою призводить до виникнення транспортної проблеми. Але особливий гостро вона виявляється у вузлових пунктах вулична-дорожньої мережі. Тут збільшуються транспортні затримки, утворюються черги і затори, а це викликає зниження швидкості сполучення, невиправдані перевитрати палива і підвищене зношування вузлів і агрегатів транспортних засобів.

Разом із тим, збільшення кількості автомобілів власного користування не впливає на збільшення довжини автомобільних доріг, що за останні роки суттєво не змінилася.

Однією із основних підсистем, що забезпечує ефективну роботу автомобільного транспорту, є дорожня мережа та її елементи, головним завданням якої є забезпечення безперервного, безпечного та зручного руху транспортних засобів.

Загальна довжина автомобільних доріг у світі – 24 млн. км, а їхня щільність – 180 км на 100 км² території [53].

Довжина автомобільних шляхів світу за період 1960-2014 рр. зросла майже у два рази і складає 70 % від загальної довжини транспортної мережі. Транспортні мережі інших видів транспорту складають 20 % – повітряні, що збільшилися з 3,3 до 12,1 млн. км за цей період; 5 % припадає на залізничні шляхи, довжина яких навпаки характеризується незначною тенденцією до скорочення з 1,32 до 1,02 млн. км. Найбільш широка мережа автомобільних доріг у США (6463 тис. км), країнах ЄС (5000 тис. км) та Китаї (2283 тис. км) [18].

Динаміку зміни довжини доріг загального користування в Україні наведено в табл. 1.2 [11], а введення в дію автомобільних доріг загального користування наведено в табл. 1.3 [14]. Поряд із протяжністю автомобільних доріг велику зацікавленість виявляє також показник щільності. Так, у Бельгії щільність мережі автодоріг становить 4800 км на 1000 км² території, в Японії – 3100, у Нідерландах – 3050, у Німеччині та Франції – 1800 км на 1000 км², у США він становить 700 км на 1000 км² території, в Бразилії – 230, у Канаді та Австралії – 90–100, в Росії – 34, у Китаї – 200 км, в Україні – 275 на 1000 км² [52].

Таблиця 1.2.

Довжина шляхів сполучення загального користування України, тис.км

| За роками | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2014 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Довжина автомобільних доріг | 169,3 | 169,1 | 169,4 | 169,5 | 169,5 | 169,5 | 169,6 |

Таблиця 1.3.

Довжина автомобільних доріг України, як були введені в дію, км

| За роками | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2013 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| Довжина | 101 | 100 | 159 | 111 | 20 | 8 | 93 |

Аналізуючи стан розвитку вулично-дорожньої мережі на прикладі міста Києва, треба відмітити, що за цей період значних змін не відбулося. На сьогоднішній день загальна довжина вулично-дорожньої мережі складає 1630 км. Порівнюючи з 2003 роком, коли довжина магістральних вулиць складала 620 км, то в 2011 році – це лише 625 км, серед них магістралі загальноміського значення – 270,7 км, магістралі районного значення – 354,3 км [11]. У період з 2003 по 2014 роки кількість автомобільного транспорту збільшилася приблизно на 400 тисяч автомобілів, а довжина магістральних вулиць на п'ять кілометрів.

Загальний пробіг автомобільного транспорту розподіляється по вулично-дорожній мережі нерівномірно [46]. Основна його кількість 55–70 % припадає на магістральні вулиці загальноміського значення, на магістральні вулиці районного значення приходить 20–30 % пробігу, а на долю вулиць і доріг місцевого значення всього лише 10–15 % пробігу автомобілів.

Щільність магістральної мережі в місті Києві складає 2,13 км/км² [31]. За рівнем насиченості території дорожньо-транспортною мережею Київ істотно поступається більшості європейських столиць і великим світовим містам (у Москві – 4,4 км/км², Лондоні – 9,3 км/км², Нью-Йорку – 12 км/км², Парижі – 15,0 км/км²).

Вочевидь, розвиток вулично-дорожньої мережі відстає від реальних потреб міста. Більшість магістралей має проїзну частину з чотирма смугами руху (середня ширина проїзної частини магістральних вулиць дорівнює 18 м). Геометричні параметри багатьох магістралей не відповідають діючим державним будівельним нормам.

Інтенсивне збільшення автомобільного транспорту в містах України за останні 10–15 років призвело до непередбачених наслідків. Вулично-дорожня мережа виявилася неспроможною одночасно й ефективно пропускати таку кількість транспортних засобів, які є в місті.

В останні роки транспорт зазнав комбінованого впливу такого фактору, як розширення міських агломерацій, результатом чого стало розширення житлової забудови і переміщення населення із центральних частин міста на окраїни, що в свою чергу призвело до збільшення частоти і дальності поїздок, кількості приватних автомобілів, налагодження внутрішніх і зовнішніх зв'язків виробництва і розширення ринку реалізації продукції.

Усі ці фактори викликали глибокі зміни в розподілі транспортної роботи міських і міжміських перевезень, а також транзитних перевезень між державами.

За останні роки все більш очевидною стала тенденція зростання кількості транспортних потоків на вулично-дорожній мережі міст України. Таке зростання автотранспорту призводить до його накопичення на міських та позаміських шляхах і за своєю насиченістю сягає меж пропускної спроможності, а це в свою чергу призводить до затримок, «заторів», виникнення аварійних ситуацій, забруднення навколишнього середовища внаслідок згорання палива.

У цьому світлі розгляд проблем, пов'язаних із рівнем росту автотранспортної мережі, передбачає пошук та обґрунтування нових методів та засобів для підвищення безпеки автоперевезень, їхньої ефективності та екологічності. Серед засобів вирішення існуючих проблем можна розглядати удосконалення транспортних комунікацій та оптимальну організацію міського руху, а також проведення нових фундаментальних досліджень на основі теорії транспортних потоків, згідно якої відстежуються внутрішні особливості транспортних потоків, їхня закономірність та причинно-наслідкові зв'язки.

1.2. Закономірності руху транспортних потоків і виникнення заторів

Із розвитком автомобілізації протягом десятиліть у світі накопичувався досвід забезпечення безпеки, ефективності і зручності дорожнього руху в містах і на автомобільних дорогах методами організації дорожнього руху із застосуванням відповідних технічних засобів. Цей процес буде тривати і далі відповідно до розвитку техніки і технології наземного транспорту, а також дорожнього і міського будівництва.

Наукові дослідження і практична інженерна діяльність в області організації руху дозволили нагромадити широкий комплекс вимог до дорожнього будівництва і специфічних інженерних розв'язків, що дозволяють одержати бажаний ефект при масовому русі транспортних засобів і пішоходів.

На автомобільних дорогах одночасно здійснюється рух багатьох однотипних автомобілів, що відрізняються технічним станом та їхньою завантаженістю. Цими автомобілями керують водії різного віку, різної кваліфікації, яким притаманні певні індивідуальні особливості керування автомобілем, причому автомобілі керуються

більш чи менш вільним бажанням водія, маневри кожного із автомобілів можуть розглядатися як вірогідні події. Однак, у випадках, що відбуваються на вулицях великих міст або на швидкісній дорозі, дуже часто можна спостерігати велику кількість автомобілів, що рухаються в групі, підкоряючись необхідним вимогам, встановленим конкретними умовами, характерними для певної сукупності транспортних засобів, які рухаються по визначеній ділянці дороги руху. Сукупність автомобілів, які рухаються на дорогах, створюють транспортні потоки.

Транспортний потік, що рухається по вулично-дорожній мережі, складається з багатьох автомобілів, які мають різні початкові та кінцеві пункти руху.

У кожному транспортному потоці відбувається взаємодія між автомобілями:

- встановлюються інтервали між автомобілями, величина яких залежить від швидкості руху, індивідуальних особливостей водія і дорожніх умов;

- виконуються обгони транспортних засобів, які їдуть з меншою швидкістю, транспортними засобами, що рухаються з більшою швидкістю;

- здійснюється гальмування автомобілів і їхня зупинка при виникненні на дорозі заторів.

Усе це (встановлення інтервалів, обгони, гальмування) створює перешкоди руху, знижує пропускну здатність, збільшує час, який необхідний для здійснення запланованого рейсу, підвищує витрати пального і т. п.

Управління складними об'єктами, якими є транспортні потоки, функціонування яких проходить під впливом зовнішнього середовища, є досить складним процесом. Розробка і дослідження ефективності різних методів управління транспортними потоками вимагають знання закономірностей поведінки транспортних потоків на вулично-дорожній мережі: розподілення інтервалів між транспортними засобами у потоці у заданому перерізі і часу проїзду по заданому перегону та ін.

Головним завданням під час управління транспортних потоків є вимога організувати дорожній рух так, щоб задоволення автомобільних потреб, що постійно зростають, проходило з мінімальними людськими та екологічним втратами. На сьогодні перевантаження

транспортних мереж є однією з соціально-економічних проблем, яка виникла в багатьох розвинених країнах світу. Ось через що докладне вивчення причин, що викликають виникнення дорожніх заторів, стало необхідним.

Ефективне регулювання транспортними потоками можливе лише на основі розуміння природи процесів, що виникають у них.

Завантаження дороги безпосередньо впливає на ступінь зручності руху автомобіля по дорозі, на ефективність використання автомобільного транспорту і витрату пального.

Залежно від завантаження дороги розрізняють кілька характерних режимів транспортних потоків, пов'язуючи з ними поняття про рівні зручності руху.

Режим руху характеризується швидкістю автомобілів (поодиноких і всього потоку), інтервалами між автомобілями в потоці, тобто щільністю потоку, кількістю обгонів та їхніми траєкторіями, режимами прискорення і гальмування.

Розрізняють такі режими (транспортні потоки) [8]:

Вільний потік – це поодинокі автомобілі, які, рухаючись на дорозі один за одним, не впливають на умови руху, тобто практично не створюють взаємних перешкод. Кожний водій позбавлений необхідності координувати керування своїм автомобілем з діями водіїв інших автомобілів. При цьому швидкість вільного руху визначається виключно елементами траси й індивідуальними якостями водіїв. Умови роботи водія задовільні. Обґрунтовуючи вимоги до окремих елементів доріг раніше якраз і виходили з цих умов.

Частково пов'язаний потік. Рух на дорозі здійснюється окремими групами автомобілів із різними динамічними якостями. Такі автомобілі рухаються на близькій відстані один за одним, внаслідок чого тихохідний передній автомобіль затримує задні швидкохідні автомобілі до того часу, поки не виникне можливість здійснити обгін із виїздом на зустрічну смугу. Після цього швидкохідний автомобіль рухається із швидкістю поодинокого автомобіля доти, доки не наздожене іншу групу.

У частково пов'язаному потоці відчувається взаємний вплив автомобілів, проте інтервали між ними такі, що водії окремих автомобілів мають змогу маневрувати всередині потоку. У зв'язку з цим знижуються середні швидкості автомобілів і ускладнюється керування ними; вважається, що умови роботи водія нормальні.

Пов'язаний потік. Рух відбувається великими групами автомобілів. Швидкість руху диктується переднім автомобілем. Відчувається значний взаємний вплив автомобілів один на одного. Обгони здійснюються поодинокими автомобілями. Складність і ризик виконання цього маневру залежить від інтенсивності руху. Погіршуються як комфортабельність руху, так і умови роботи водія.

Щільний, або насичений, потік – це більш складна структурна форма транспортного потоку, для якого характерні однакові швидкості й приблизно однакові відстані між прямуючими один за одним автомобілями, немає можливості обгону, тобто рух кожного автомобіля потоку пов'язаний із діями попереднього автомобіля. Швидкість руху різко знижується. В місцях погіршення дорожніх умов можуть виникати затори. Умови роботи водія напружені.

Через відмінності в умовах руху для кожного із зазначених режимів виникає потреба в застосуванні для їхнього опису різноманітних закономірностей теорії транспортних потоків. Оскільки інтенсивність руху коливається в різні дні й години доби на одній і тій самій ділянці дороги, то режими руху також змінюються.

На транспортний потік впливає цілий ряд факторів [10, 40, 41] (рис. 1.4.), але й він зі свого боку впливає на навколишній світ кількісно і якісно, причому для опису цього випадку можна використовувати різні прийоми, в основному матеріальні. Створення різних моделей транспортного потоку, в які переводять дійсні ситуації визначеної транспортної проблеми, що включає в себе характеристики транспортного засобу, водія дороги, приладів для регулювання транспорту або навколишнього середовища дороги, у вигляді визначених символів і співвідношень, відбуваються таким чином, щоб моделі відтворювали дійсність.

Оскільки умови руху автомобілів для кожного з розглянутих режимів різні, вони описуються різними закономірностями теорії транспортних потоків. Для вирішення цієї проблеми протягом останніх шістдесяти років було створено чимало теорій і моделей. Багато вчених робили спроби зробити математичний опис транспортного потоку. Результатом цього став широкий спектр моделей, що описують аспекти функціонування автотранспортного потоку. Вивчення характеристик транспортного потоку та їх закономірних змін призвело до створення теорії транспортних потоків. Численні гіпотези теорії руху моделі транспортних потоків на різних ділян-

ках базуються на розгляді спрощених схем (моделей) і діляться на групи [8]:

1. Теорії, що ґрунтуються на *динамічних моделях* потоків автомобілів. Вони дають змогу досліджувати при різних швидкостях відстані між автомобілями, що прямують один за одним по одній смугі. Автомобілі рухаються без обгонів. Одержані результати поширюються на весь потік. Ці моделі описують пов'язаний щільний або насичений транспортний потік.

2. Теорії, що ґрунтуються на *ймовірнісних моделях*. За цими теоріями, процеси, що відбуваються в транспортному потоці, розглядаються як випадкові, аналізується рух двох зустрічних потоків, враховуючи можливості обгонів. Імовірнісні моделі дають змогу точніше враховувати реальні умови руху на дорозі.

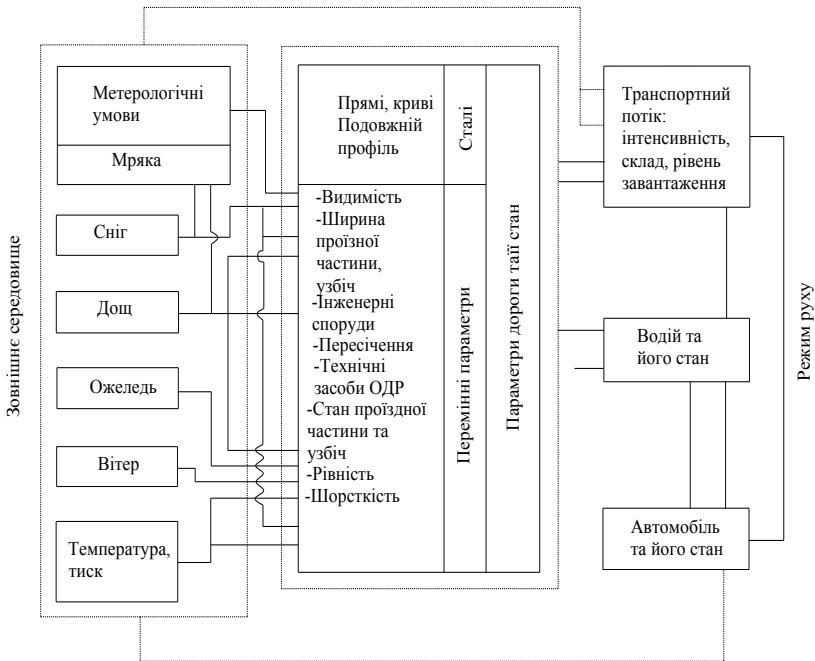


Рис. 1.4. Фактори, що впливають на транспортний потік

Імовірнісні моделі масового обслуговування (теорії черг) застосовують для розв'язання питань взаємодії потоків середньої інтен-

сивності, коли ще можливі обгони автомобілів, що рухаються по різних смугах.

Обґрутовуючи вимоги до доріг, найчастіше використовують просту динамічну модель, яка допускає рух автомобілів із однаковими швидкостями і на однакових відстанях один від одного.

Досконаліша теорія «рух за лідером», за якої в межах транспортного потоку відстані між автомобілями не є постійними.

3. Проведення аналогії між рухом транспортного потоку і течією в руслі в'язкої рідини спричинило появу «гідродинамічної моделі». Ця модель дає змогу досліджувати швидкості згущування і розрідження транспортних потоків при виникненні на їхньому шляху перешкоди, автомобілі рухаються з постійною швидкістю.

Рух по дорозі потоку автомобілів є своєрідним несталим процесом, в якому взаємне розташування і швидкості автомобілів увесь час міняються. Тому режим руху потоку може бути охарактеризований тільки середніми статистичними показниками. Причому, середня швидкість залежить від щільності ρ .

Основними характеристиками транспортного потоку, що описують його кількість і якість є: інтенсивність руху, склад транспортного потоку, швидкість руху, щільність потоку, часовий інтервал слідування, дистанція між транспортними засобами.

Залежність інтенсивності і щільності називається основною діаграмою стану транспортного потоку (рис. 1.5.) і може бути виражена [8]:

$$\lambda q = qV(q). \quad (1.1)$$

На графічному відображенні функції λq видно, що основна діаграма транспортного потоку відображає багато його властивостей, а саме: значення максимальної інтенсивності λ_{\max} дорівнює максимальній пропускній здатності ρ_{\max} ; щільність, що відповідає максимальній пропускній здатності, вважається оптимальною щільністю q_0 , а швидкість – оптимальною швидкістю V_0 . Основна діаграма не є конкретною, але разом з тим вона є критерієм успіху будь-якої теорії транспортного потоку.

Математичний аналіз такого роду залежностей детально виконав Ф. Хейт [45]. Межі застосування (по інтенсивності потоку) рівнянь проаналізовані В. В. Сильяновим [37]. Енергетичний підхід запропонований Д. Дрю [15]. Але треба відмітити, що жодна із запропонованих аналітичних залежностей основної діаграми тран-

спортного потоку не може задовільно відображати зв'язок щільності, швидкості і інтенсивності при широкому діапазоні зміни реальних дорожніх умов.

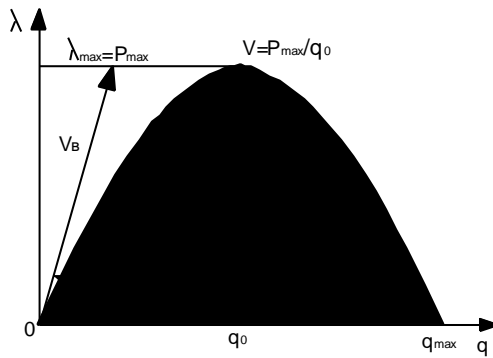


Рис. 1.5. Основна діаграма транспортного потоку

Ця обставина може бути пояснена наступним чином. Автомобільний потік можливо описати тільки достатньо гнучкою математичною моделлю. При цьому модель потоку повинна мати достатню кількість варійованих величин, змінюючи які можна отримати результати, які задовольняють відображення дійсної картини руху автомобілів у різних дорожніх умовах.

Через основну діаграму транспортних потоків можна встановити деякі загальні ознаки виникнення затору. Затори бувають нерегулярні і регулярні.

Нерегулярні затори не піддаються прогнозуванню, вони спричиняються тихохідними транспортними засобами, погодними умовами, випадковими дорожньо-транспортними подіями, що зумовлює різке зменшення швидкості або взагалі зупинку руху. Внаслідок дорожньо-транспортної події виникає затор і автомобілі, що наближаються до цього місця зменшують швидкість. Цей процес описується формулою ударної хвилі. Основну діаграму транспортного потоку при нерегулярному заторі наведено на рис. 1.6.

Регулярні затори спричиняються незадовільними дорожніми умовами: недостатньою видимістю, крутим підйомами, горизонтальними кривими малого радіуса, а також примиканнями з'їздів до дороги при значній кількості автомобілів, що виїжджають на неї.

Основну діаграму транспортного потоку при регулярному заторі наведено на рис. 1.7.

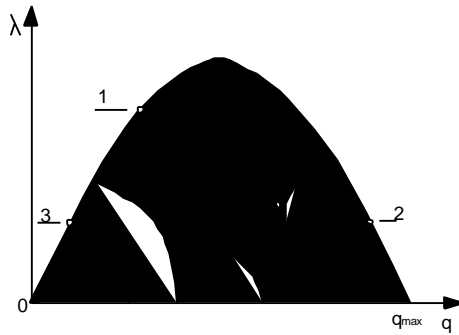


Рис. 1.6. Основна діаграма транспортного потоку в разі нерегулярного затору:

- 1 – умови вище фронту ударної хвилі; 2 – умови нижче фронту ударної хвилі;
- 3 – умови нижче місця ДТП; 4 – умови, за яких тангенс кута дорівнює швидкості ударної хвилі

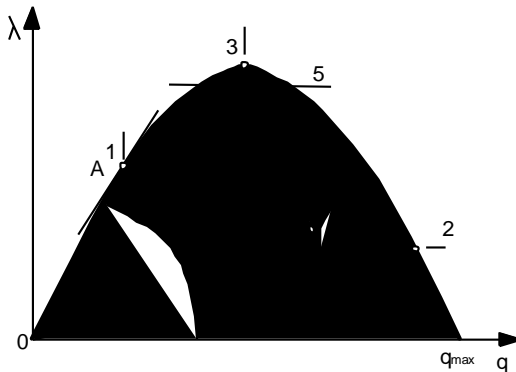


Рис.1.7. Основна діаграма транспортного потоку в разі регулярного затору:

- 1 – умови вище затору; 2 – умови перед затором; 3 – умови після затору;
- 4 – тангенс кута β дорівнює швидкості ударної хвилі; 5 – тангенс кута нахилу в точці А дорівнює швидкості кінематичної хвилі

Перед ділянкою з незадовільними дорожніми умовами виникає затор і рух стає нестабільним. Рух стає нестабільним, коли щільність q потоку перевищує щільність потоку q_0 . Для ефективно роботи дороги або вулично-дорожньої мережі треба, щоб щільність

була дещо меншою за оптимальну щільність. Цій умові відповідає деяке зменшення пропускної здатності й зростання швидкості. Наявний при такому режимі рух певний резерв пропускної здатності забезпечує стабільність транспортного потоку. На основі діаграми можна дати визначення нормальних і складних дорожніх умов [8, 39].

Нормальними дорожніми умовами є такі, що дають змогу автомобілям рухатися зі швидкістю $V > V_0$ при щільності потоку $q < q_0$.

Якщо транспортний потік змушений рухатися з обмеженою швидкістю $V < V_0$, а щільність його зростає до $q > q_0$, то ділянки доріг, на яких здійснюється такий рух, слід відносити до ділянок зі складними дорожніми умовами.

Щільність потоку і швидкість руху за нормальних дорожніх умов слід розглядати як функції інтенсивності.

За складних дорожніх умов основними показниками слід вважати швидкість руху, обмеження якого спричинює ущільнення потоку $q > q_0$ і відповідає обмеженню пропускної здатності потоку.

Проведений аналіз характеристик руху [8, 39, 40] дає можливість встановити, що за нормальних дорожніх умов основним показником, який визначає час та інші характеристики транспортного потоку, є пропускна здатність дороги, що може зростати до ρ_{\max} .

Пропускна здатність автомобільних доріг є складною і неоднозначною характеристикою дороги. На величину пропускної здатності впливає багато факторів, серед яких можна виділити: дорожні умови, характеристики транспортного потоку, психофізіологічні особливості водія, рівень кваліфікації водіїв, технічний стан транспортних засобів, погодні умови, час доби, соціальні фактори і т.д. Усі ці фактори тісно пов'язані між собою. Величина пропускної здатності визначається співвідношенням тих чи інших факторів, які мають випадковий характер. Оскільки зміна всіх перерахованих факторів приводить до зміни швидкості руху й щільності потоку автомобілів, ці два показники впливають на величину пропускної здатності автомобільної дороги.

Пропускна здатність дороги характеризується максимальною інтенсивністю у частково пов'язаному режимі з деякими зниженнями швидкості порівняно зі швидкістю поодинокого автомобіля.

Інтенсивність руху на дорозі різко змінює стан транспортного потоку. Для характеристик різних станів потоку і умов руху

В. Сильянов [37] увів поняття коефіцієнту завантаження рухом, під якими розуміє відношення інтенсивності руху λ до пропускної здатності ділянки дороги:

$$Z = \frac{\lambda}{\rho_{\max}}. \quad (1.2)$$

Розрізняють чотири рівні зручності табл. 1.4. Автомобілі в транспортному потоці залежно від наповнення, стану проїжджої частини, швидкості автомобілів можуть рухатися в певних межах своїх швидкісних можливостей.

Таблиця 1.4

Рівні завантаження дороги і рівні зручності

| Рівень зручності руху | Інтенсивність руху на смузі авт./год | Стан транспортного потоку | Умови руху автомобілів | Коефіцієнт завантаження | Швидкість потоку відносно швидкості одиночного автомобіля | Умови роботи водія |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|---|-------------------------|---|--------------------|
| А | 360 | Вільний | Взаємних перешкод немає | Менше 0,2 | 0,9... 1,0 | Легкі |
| Б | 900 | Частково пов'язаний | Утворення груп автомобілів, часті обгони | 0,20...0,45 | 0,7..0,9 | Нормальні |
| В | 1200 | Пов'язаний | Групи автомобілів збільшуються. Між ними зберігаються інтервали. Умови обгону ускладнюються | 0,45...0,70 | 0,55...0,70 | Утруднені |
| Г | 1600 | Насичений | Утворюється суцільний потік автомобілів, швидкість значно зменшується. Можливі затори | 0,7...1,0 | 0.40...0.55 | Напружені |

У роботі [47] в залежності від щільності руху наведено п'ять видів транспортних потоків. За основний параметр, що характеризує відповідний стан транспортного потоку, була прийнята швидкість руху. Кожному стану відповідають певні умови руху (табл.1.5).

За даними таблиці 1.5. у роботі [47] були побудовані графіки (рис.1.8, 1.9) залежності швидкості транспортного потоку від його щільності для автомобільної дороги, яка має дві і три смуги руху. За наведеними графічними залежностями можна визначити, з якою швидкістю буде рухатися транспортний потік.

Таблиця 1.5.

Стан транспортного потоку в залежності від швидкості і щільності руху

| Стан транспортного потоку | Число смуг руху в обох напрямках | | | |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | 4 | | 6 | |
| | Щільність, авт./км | Швидкість, км/год | Щільність, авт./км | Швидкість, км/год |
| I | 0-22 | 78-80 | 0-36 | 83-85 |
| II | 22-50 | 64-78 | 36-72 | 73-83 |
| III | 50-100 | 28-64 | 72-150 | 31-73 |
| IV | 100-140 | 12-28 | 150-210 | 14-31 |
| V | 140-200 | 5-12 | 210-300 | 4-14 |

Професор В. І. Гук вважає [12], що рівні зручності, передбачені В. Сильяновим у той час, коли рівень автомобілізації був нижче 100 авт. на 1000 мешканців, і в потоці переважали вантажні автомобілі, складаючи 50–70 %, на сьогодні є неактуальними. У даний час склад і чисельність транспортних потоків різко помінялися і досягли міжнародного рівня, тому раціональніше використовувати градацію рівнів обслуговування, прийняту в американській практиці.

Транспортники США запропонували характеризувати певну комфортність руху в потоці рівнем обслуговування, рівнем наявного сервісу [50].

Рівень обслуговування А: вільний рух автомобілів у транспортному потоці при щільності q до 6 авт./км.

Рівень обслуговування В: комфортний рух автомобілів у потоці при щільності $q = 6 - 12$ авт./км.

Рівень обслуговування С: стабільний стан, але вже статичний рух у потоці при щільності $q = 13 - 18$ авт/км.

Рівень обслуговування D: характеризує перехід до нестабільного руху, виникають групи із автомобілів, що поволі рухаються, щільність потоку $q = 19 - 31$ авт/км.

Рівень обслуговування E: умови руху незадовільні, насичений потік на рівні пропускної здатності, стан руху нестабільний, щільність потоку $q = 32 - 50$ авт/км.

Рівень обслуговування F: максимально насичений транспортний потік рухається повільно, швидкість потоку $V_i < 0,5V_0$, щільність потоку $q = 51 - 100$ авт/км.

Головними завданнями у забезпеченні відповідного рівня зручності руху транспортних засобів по ВДМ міст є мінімізація затримок транспорту і підвищення її пропускної спроможності та безпеки руху.

Верхньою межею пропускної спроможності ділянки дороги або перехрестя є показник, який визначає допустиму інтенсивність, щільність руху і швидкість транспортного потоку.

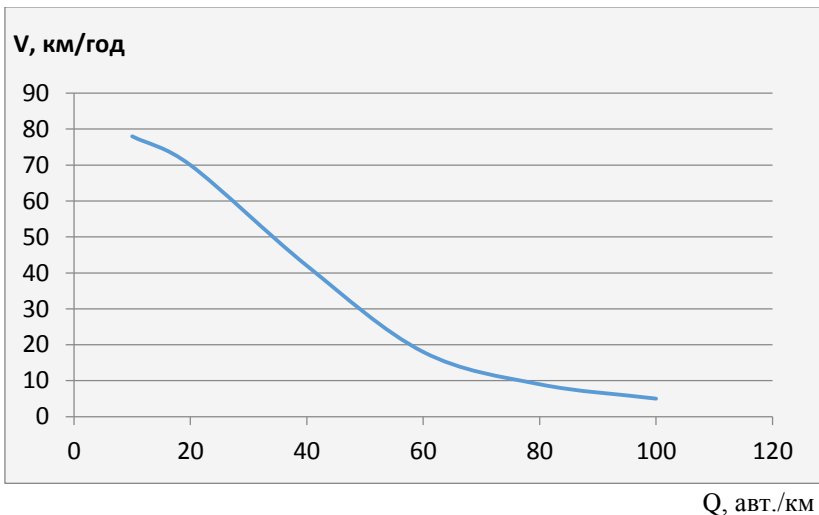


Рис.1.8. Графік залежності швидкості транспортного потоку від його щільності для автомобільної дороги, яка має дві смуги руху.

Ефективність функціонування вулично-дорожньої мережі базується на використанні двох параметрів: «дорожньої роботи» і часу руху транспортних засобів по ній. Дорожня робота - це кількість транспортних засобів, що проїхали по одній смузі руху через заданий переріз дороги за довготривалий проміжок часу.

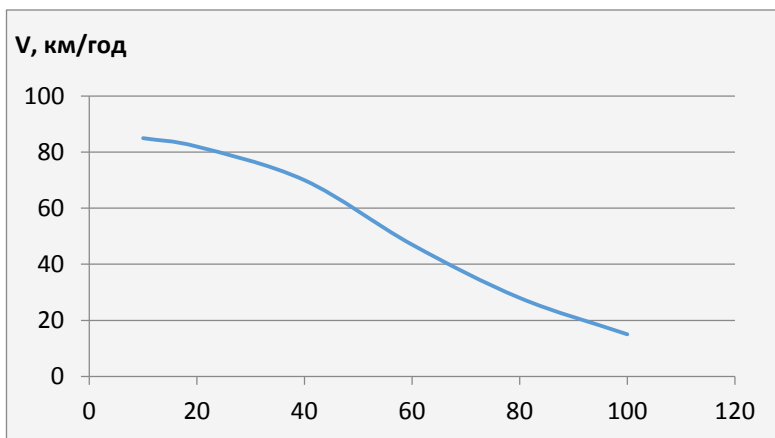


Рис.1.9. Графік залежності швидкості транспортного потоку від його щільності для автомобільної дороги, яка має три смуги руху.

Забезпечення максимальної ефективності використання проїзної частини або перехрестя полягає у верхньому потенціалі проїзної частини чи перехрестя і початкової стадії утворення заторового стану. Початок заторового стану виникає тоді, коли потенціал проїзної частини і перехрестя повністю використаний. Незначне перевищення рівня пропускної спроможності створює початок заторового стану.

Заторові ситуації виникають тому, що вулично-дорожня мережа не здатна забезпечити пропуск великих потоків автотранспорту.

Рух автомобілів при великому скупченні транспортних засобів набуває переривчастого характеру. Причинами формування старт-стоп руху та заторів у щільному потоці вважаються нестійкості в русі – коливання швидкостей, викликані неоднорідностями дороги або затримкою в реакції водіїв, коли дистанція між транспортними засобами стає нижче критичного значення [55, 56].

У роботі [7, 49, 60] висунуто гіпотезу про те, що причина заторів криється у «вузьких місцях» – звуженнях і розширеннях дороги як постійних, так і тимчасових. Вони є причиною утворення, зростання і поширення черг на дорогах. Існує кілька типів «вузьких місць», поблизу яких формуються затори [7]:

- *активні «вузькі місця».* Між двома ділянками дороги є активне «вузьке місце», якщо висхідний транспортний потік перевантажений (викликає черги), а низхідний є вільним. Виявлення активних «вузьких місць» на ділянках дороги є ефективним для запобігання дорожньо-транспортних подій (рис. 1.10, *а*);

- *злиття.* Якщо сума вхідних транспортних потоків перевищує місткість злиття, висхідний потік заповнює злиття повністю, а решта потоків формує чергу. Черга зростає як на одному, так і на кількох під'їздах до злиття (рис. 1.10, *б*);

- *розширення.* Якщо потік, який перетинає одну з гілок розширення, перевищує його пропускну здатність протягом деякого часу, то в загальному під'їзді до розширення може вирости черга. Якщо цей під'їзд вузький, черга повинна зникати за принципом буфера – «першим увійшов, першим вийшов» – таким чином будуть накопичуватися і затримуватися транспортні засоби, які повинні їхати по іншій гілці розширення дороги. Наприклад, на перехресті автомобілі, які очікують можливості повороту наліво, створюють перешкоду для автомобілів, які проїжджають прямо, і утворюється затор (рис. 1.10, *в*). Подібна ситуація може мати місце і тоді, коли один із під'їздів широкий (рис. 1.10, *г*).

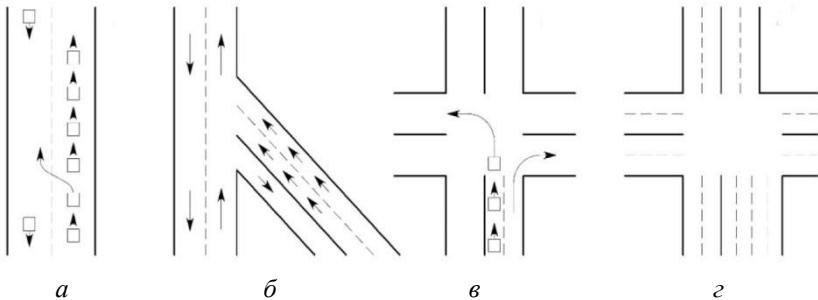


Рис. 1.10. «Вузькі місця» дорожньої мережі – місця розташування заторової активності:

а – активні «вузькі місця»; *б* – злиття; *в*, *г* – розширення

У роботі [7] стан транспортного потоку, у тому числі й заторів, визначається наступними міркуваннями:

- поведінка транспортного потоку визначається звуженнями і розширеннями дороги, причому ці поняття трактуються доволі широко;
- основний об'єкт дослідження – черги (їхні властивості, структури, поведінка тощо), які виникають поблизу звужень;
- для прийнятних прогнозів поведінки потоку досить побудувати групу простих моделей звуження дороги;
- затримка транспортного засобу в заторовій черзі залежить від часу, за який автомобіль проїхав би через затор у разі відсутності черги, і від поведінки потоку в межах заторової ділянки, тобто, час затримки не залежить від структури черги.

Транспортні затори, які виникають на магістральних вулицях вуличної мережі значних міст, як правило швидко розповсюджуються на прилеглі ділянки вулиць і також там паралізують рух транспортних засобів. Треба відмітити, що однією із головних задач системи ефективності функціонування вулично-дорожньої мережі є запобігання виникнення транспортних заторів. Тому організація дорожнього руху виділяє три основні задачі:

- попередження виникнення заторового стану на перегонах і перехрестях вулично-дорожньої мережі;
- виявлення заторових ситуацій та їхня локалізація;
- попередження поширення затору на сусідні ділянки вуличної мережі.