

2.2 Транспортні затори

На сьогоднішній день не існує загальноприйнятого визначення затору (пробки). Карлос Даганзо (Carlos F. Daganzo) [36] вважає, що на вільній дорозі транспортний потік не утворює черг, якщо мале збурення швидкостей, що виникло в певній точці дороги, не поширюється вверх по потоку. І навпаки, якщо обурення швидкостей, що виникло на деякій ділянці, поширюється за його межі, то в транспортному потоці утворюються скупчення і виникають затори.

Зазвичай описуються поодинокі пробки і серія пробок [36].

2.2.1 Поодинокі пробки

Поодинокі затори можуть бути викликані умовами дорожнього руху, наприклад, червоним світлом світлофора, аварією, звуженням і т.п. У такій ситуації умову перевищення припливу в пробку над відтоком виконати легко: наприклад, якщо звуження має пропускну здатність q_{bn} , а приплив q_{in} , то якщо $q_{in} > q_{bn}$, пробка буде рости. Теоретично така поведінка схожа з поведінкою черги, описуваної теорією масового обслуговування, за винятком наявності просторового виміру - пробка росте з хвоста. Таке просторове зростання добре описується теорією кінематичних хвиль.

Емпіричні дані показують, що пробки часто виникають на однорідній ділянці дороги, і виглядають як би "вставленими" в вільний потік. Нехай, наприклад, причиною такої пробки стала аварія, яка самоліквідувалася через деякий час. Розглянемо n , $n \in \mathbb{N}$ транспортних засобів, що стоять один за одним на односмуговій дорозі. У перший момент часу може поїхати перша машина, потім друга і т. п. За цей час в хвіст пробки може прилаштуватися ще кілька машин. Задавши симетричні умови відтоку і припливу автомобілів в пробку, отримаємо область машин на дорозі, що мають нульову швидкість, що зміщується назустріч потоку. З точки зору водія, влаштувався в хвіст - пробка "проходить через нього". Він спочатку зупиняється, а через деякий час може знову продовжити рух. Це стандартне хвильове явище, добре описуване теорією кінематичних хвиль.

2.2.2 Серія пробок

Спостереження показують, що відтік транспортних засобів з пробки становить в середньому один транспортний засіб за дві секунди для однієї смуги руху. Позначимо його через q^* . Тоді пробка буде рости, якщо $q_{in} > q^*$.

Наприклад, якщо вдалині трапиться аварія, то за умов однорідності на виході з цієї аварії значної пробки не утвориться. Дійсно, якщо на виході з першої пробки з'явиться потік q^* , то з другої пробки потік складе ту ж величину q^* . Таким чином виникає питання: чи може потік підтримувати значення вище q^* (т.зв. суперкритичний потік [20]), і якщо так, то як? Відповідь на питання поки не знайдено.

2.2.3 Класифікація фаз потоку

Борис Кернер (Boris S. Kerner) [27] запропонував наступну класифікацію фаз руху транспортного потоку (Рис. 2.5):

1. Вільний потік. Поки дорога не завантажена, водії дотримуються бажаної швидкості, вільно переходячи на сусідні смуги. На цій стадії автомобілі можна порівняти з потоком вільних частинок.
2. Синхронізований потік. Коли дорога стає переповненою, водії втрачають можливість вільно маневрувати і змушені узгоджувати свою швидкість зі швидкістю потоку. Ця стадія подібна потоку води.
3. Широкі переміщуючіся пробки. Тут автомобілі (групи автомобілів) подібні шматочкам льоду, що рухаються в потоці рідини.
4. Старт-стоп рух. При великому скупченні автомобілів рух потоку набуває переривчастий характер. На цій стадії транспортний потік можна уподібнити потоку замерзлої води, автомобілі стають на якийсь проміжок часу як би "приклеєним" до цієї точки дороги.

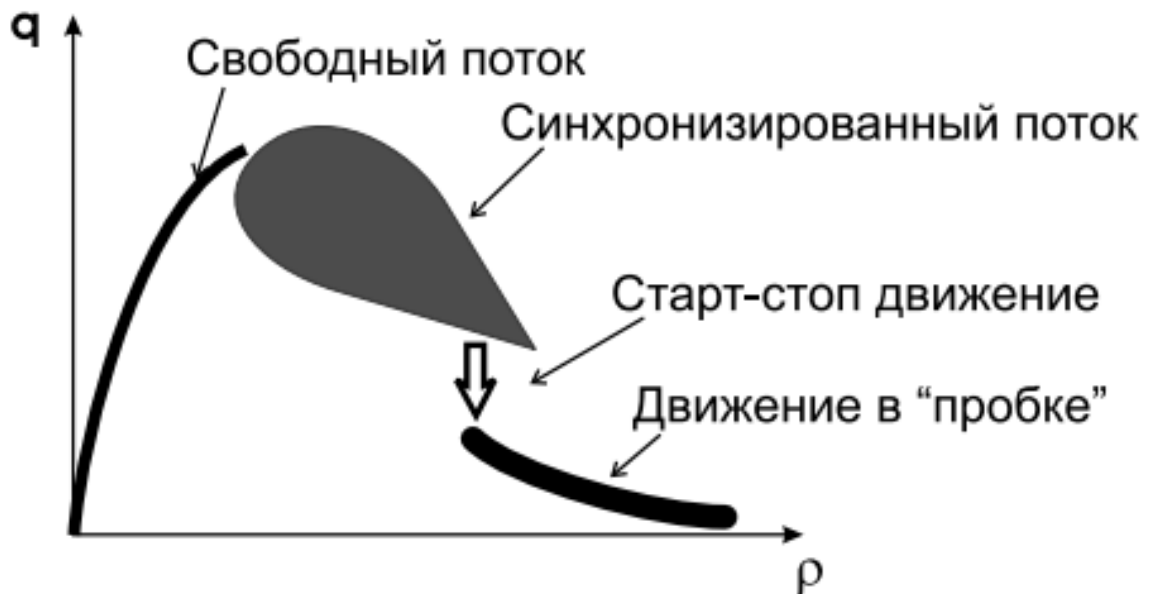


Рис. 2.5 Фазові стани потоку на багаторядних магістралях

Таким чином, при малих і дуже високих щільностях спостерігається кореляція між потоком і щільністю, а для проміжних щільностей певної гілки на фундаментальній діаграмі не існує через сильну залежність від специфіки конкретної дорожньої мережі. Неодноразово намагалися пояснити ці особливості [20]. Роботи про "перетворення λ -форми фундаментальної діаграми" (Koshi et. Al., 1983), "гістерезису" (Treiterer і Myers, 1974), "теорії катастроф" (Persaud і Hall, 1989), "падіння пропускної здатності" (Hall і Agyemang-Duah, 1991) і т. п., вказують на можливість існування суперкритичних потоків (Рис.2. 6). Інші дослідження (Hall et. Al., 1992; Windover і Cassidy, 2001) показують, що такі вимірювання викликані геометричною будовою дороги (наприклад, наявністю звуження).

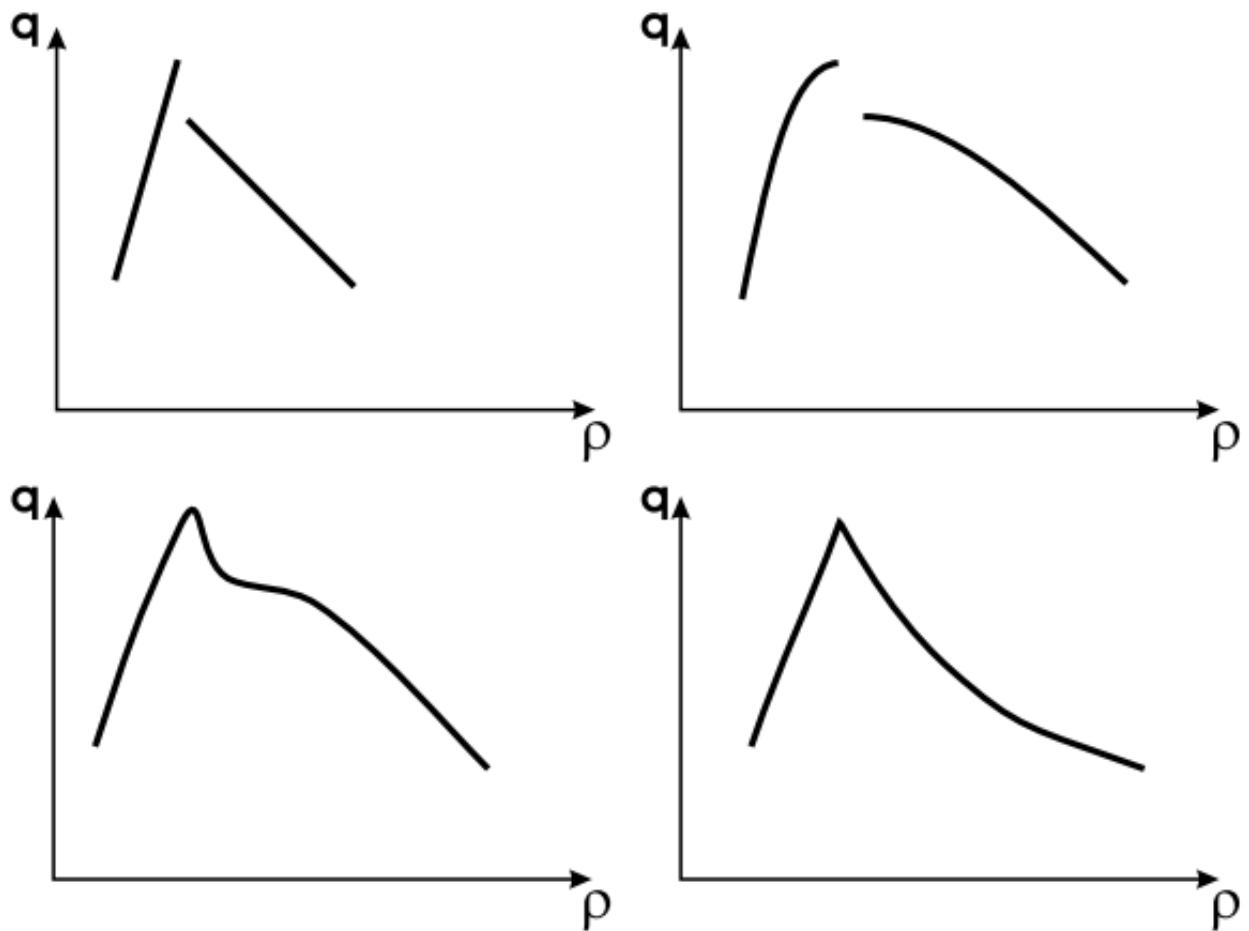


Рис. 2.6 Теоретичні апроксимації емпіричної фундаментальної діаграми

Однак залишається незрозумілим, як можуть виникати затори, тобто як потік, що знаходиться у вільному режимі, розпадається і переходить в змішаний - вільно-заторний (старт-стоп рух). З одного боку, аналіз показує, що часто є зовнішні причини. З іншого боку, експерименти з їздою по колу показали спонтанний розпад потоку [35]. В цьому експерименті водіїв просили їхати з максимальною швидкістю. У таких штучних умовах для розпаду потоку було потрібно близько 10 хвилин.

Для синхронізованого режиму руху не зрозуміло, чи викликаний сильний розкид даних наявністю з'їздів-в'їздів, або він має статистичну природу, наприклад, через взаємодію різних типів автомобілів і різних манер водіння.

2.2.4 Причина затору - геометричні особливості дороги

Даганзо в роботі [36] висуває гіпотезу про те, що причина пробок криється в "вузьких місцях" - звуженнях і розширеннях дороги, як постійних, так і тимчасових. Вони є причиною утворення, росту і поширення черг на дорогах. Даганзо визначає кілька типів "вузьких місць":

- Активні "вузькі місця". Між двома ділянками дороги є активне "вузьке місце", якщо висхідний транспортний потік перевантажений (викликає черзі), а спадний є вільним. Виявлення активних "вузьких місць" на ділянках дороги ефективно для запобігання транспортних пригод.
- Злиття. Теорія для "зливаючихся" вузьких місць стверджує, що максимально стійкий потік, що виходить із злиття, існує тільки тоді, коли умови для низхідного потоку являються завантаженими. Ця риса називається ємністю (capacity). Якщо сума вхідних потоків перевищує місткість злиття, вихідний потік заповнює ємність злиття повністю, а решта потоку формує чергу. Черга зростає як по одному, так і по кількох під'їздах до злиття. Експерименти показують, що на одних ділянках потік стає переповненим через 10 хв, а на інших - не буває переповненим.
- Розширення. Різновид кількох активних "вузьких місць" на дорозі. Якщо потік, що 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 розсмоктуватися з дисципліни буфера - "першим увійшов першим вийшов" (FIFO) - таким чином, що будуть накопичуватися і затримуватися транспортні засоби, які повинні їхати по іншій гілці розширення дороги. Подібна ситуація може мати місце і тоді, коли один з під'їздів широкий.
- Інші типи вузьких місць. Заторну активність можна виявити на вертикальних і горизонтальних викривленнях дороги ("гірки" і прогини), в тунелях, на похилих ділянках і інших місцях зміни характеристик і однорідності дороги. Затори викликаються також

тимчасовими зовнішніми причинами, такими як ДТП, відволікаюча увага водія активність близько дороги і навіть інформаційні щити.

2.2.5 Затримки транспортних засобів

Більшість теорій стверджують, що затримки транспортних засобів залежать від двох компонент: від часу, протягом якого автомобіль проїхав би через заторне місце при відсутності черги і від поведінки потоку в межах заторної ділянки. Тобто практично, час затримки не залежить від структури черги і, отже, керуючі дії потрібно спрямовувати не на чергу, а на самі заторні ділянки [36].

2.2.6 Численні стійкі стани і хаос

В літературі не вдається знайти результатів систематичних досліджень властивостей транспортного потоку засобами нелінійної динаміки, однак, є певна кількість публікацій, які відображають зв'язок понять хаосу і транспортного потоку. У 1961 році І. Пригожиним і співавторами (див. [37, 38, 30]) вперше була сформульована кінетична модель транспортного потоку у вигляді наступного диференціального рівняння:

$$\partial_t f + \partial_x(fv) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{int} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel}. \quad (56)$$

Дане рівняння, як і рівняння (4), є рівнянням нерозривності, що виражає закон збереження автомобілів, але вже в фазовому просторі, тобто щільності розподілу автомобілів по координаті та швидкості. Складові в лівій частині описують зміну фазової щільності і за рахунок кінематичного перенесення, в той час як складові в правій частині описують процес миттєвих змін швидкостей автомобілів за рахунок, так званих, процесів взаємодії та релаксації.

Згідно Пригожини, під взаємодією двох автомобілів на дорозі розуміється подія, при якій більш швидкий автомобіль наздоганяє повільніший. При цьому водій швидкого автомобіля або здійснює обгін, або знижує свою швидкість до швидкості попереду їдучого автомобіля. Швидкості автомобілів в потоці не

корельовані до і після взаємодії, тобто вірна гіпотеза "автомобільного хаосу" (за аналогією з "молекулярним хаосом").

Емпіричні аргументи на користь хаосу в потоці транспорту можна знайти в роботах Кернера і Реборна (Kerner, Rebhorn, 1997) і Кернера (Kerner, 1999). У них було показано, що локальні пробки можуть існувати поки зберігаються їхні характеристичні властивості протягом декількох годин. Тобто, перешкода на мікрорівні в транспортному потоці може привести утворення пробок [27, 39].

Рейнхард Кюне (Reinhard D. Ku"hne) [40] проаналізував можливе рівняння моменту для транспортного потоку виду:

$$\partial_t v + v \partial_x v = -\frac{c_0^2}{\rho} \partial_x \rho + \frac{1}{\tau} (V(\rho) - v) + v \partial_x^2 v, \quad (57)$$

доповнене для повноти системи рівнянням безперервності:

$$\partial_t \rho + \partial_x (\rho v) = D \partial_x^2 \rho. \quad (58)$$

Для цього рівняння однорідне рішення (v, ρ) (v_0, ρ_0) нестабільно для близьких до максимальних щільностей потоку транспорту при відповідному виборі параметрів. Використовуючи методи нелінійної динаміки Р. Кюне і ін. [41, 42, 43] визначили безліч фіксованих точок стійкості і нестійкості та граничні цикли, які означають, що транспортний потік при близькій до максимальної щільності, функціонує на дивному аттракторі.

В роботі [36] стверджується, що можна побудувати прості мережі з джерелами, стійкими по відношенню до вихідних потоків. Така стійкість може зберігатися в двох випадках:

- при насиченій на всьому протязі дороги конфігурації, коли деякі черги поширюються проти джерел, і тим самим, блокують потоки, що відходять від них;
- при ненасиченій конфігурації черг, що дозволяє всім джерелам безперешкодно об'єднувати свої потоки.

Крім того, в таких типах мереж тимчасове збурення може постійно змінювати стан насичення мережі. Виникаючі зміни можуть "за ланцюговою реакцією" викликати подальші зміни. Поведінка транспортного потоку в переповнених мережах зі зв'язаними заторними ділянками є за своєю природою

хаотичною. Цей факт і неможливість на сьогоднішній день точно передбачити деякі основні початкові дані (наприклад, маршрут, обраний водієм) змушує переосмислити роль прогнозуючих моделей [36].