

Міністерство освіти і науки України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

ЗАПОРОЖЦЕВА ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 625.711.3: 656.1

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИНЦИПІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ  
СПРОМОЖНОСТІ БАГАТОСМУГОВИХ АВТОМАГІСТРАЛЕЙ

Спеціальність 05.22.11 – Автомобільні шляхи та аеродроми

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Гук Валерій Іванович**,  
Харківський національний університет будівництва  
і архітектури, завідувач кафедри містобудування  
та урбаністики, м. Харків

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Белятинський Андрій Олександрович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри реконструкції  
аеропортів та автошляхів, м. Київ;

кандидат технічних наук, доцент  
**Завальний Олександр В'ячеславович**  
Харківський національний університет міського  
господарства ім. О. М. Бекетова,  
доцент кафедри міського будівництва, м. Харків.

Захист відбудеться «26» травня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого (Петровського), 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого (Петровського), 25.

Автореферат розісланий «25» квітня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доцент, кандидат технічних наук



Р.В. Смолянук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У нашій країні кожного року збільшується кількість легкових і вантажних автомобілів. Із зростанням їх кількості підвищується інтенсивність руху на автомобільних дорогах, особливо на підходах до великих міст. Транзитна особливість розташування України вказує на необхідність будівництва багатосмугових автомагістралей.

Закономірності руху транспортних засобів на багатосмугових автомагістралях мають ряд особливостей, що обумовлюється станом транспортних потоків і дорожніми умовами на цих ділянках доріг.

Дослідження, що проведені в нашій країні і за кордоном, присвячені визначенню техніко-експлуатаційних показників, та мають значні розбіжності в рівнях пропускної спроможності смуг руху від 1200 авт/год до 2500 авт/год і вже до 3600 авт/год. Залишається безліч невирішених задач, пов'язаних з особливостями взаємодії автомобільного транспорту та автомагістралей. Невизначена необхідна нормативна база для доріг та автомагістралей, де основою є рівень добової інтенсивності, а не їх пропускна спроможність в час «пік». В той же час, сучасне збільшення транспортних перевезень супроводжується якісним перетворенням автомобільного руху з одиночного в масовий процес, який характеризується безперервним рухом на автомагістралях щільних транспортних потоків, що досягли по своїй насиченості межі пропускної спроможності. Причому, в часи «пік», часто мають випадки перенасичення руху, яке супроводжується значними непродуктивними затримками, заторами, високим рівнем аварійності, забрудненням навколишнього середовища, відчутною перевитратою енергетичних ресурсів.

Покращення умов руху транспортних засобів, екологічності автомобільного руху і підвищення безпеки за рахунок розширення проїзної частини вимагає значної реконструкції доріг, що існують, та будівництва нових сучасних автомагістралей зі складними інженерними спорудами і перетинами в різних рівнях. Для цього необхідні великі капітальні вкладення, економне використання яких, вимагає виконання та уточнення проектувальних і містобудівних розрахунків на основі законів руху насичених транспортних потоків.

Пропускна спроможність чотирьохсмугових, шестисмугових, восьмисмугових автомагістралей залежить від розподілу інтенсивності руху по смугах проїзної частини, швидкості руху, щільності і складу транспортного потоку, дорожніх умов та ін. Ступінь впливу цих факторів може бути визначений як теоретично, так і шляхом спостережень за режимами руху транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях.

Актуальність дисертаційної роботи визначається значною різницею, в два – три рази, кількісних значень пропускної спроможності смуги руху та невизначеністю сучасного розподілу пропускної спроможності по суміжних смугах на багатосмугових автомагістралях. Не сформульовані сучасні нормативні вимоги і до визначення пропускної спроможності автомагістралей.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами:**

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з основними положеннями «Транспортної стратегії України на період до 2020 року» (розпорядження Кабінету міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р.); Концепції Державної цільової програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 року (затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 8 серпня 2012 р. № 771); державної тематики науково-дослідницької роботи кафедри організації і безпеки дорожнього руху №16-53-11 «Розробка наукових основ та методів удосконалення транспортних систем мегаполісів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (номер держ. реєстрації 0111U001503); Державної цільової програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 року (затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 25 березня 2013 р. № 294).

**Мета та задачі дослідження.** Мета дисертаційного дослідження полягає в удосконаленні принципів визначення пропускної спроможності багатосмугових автомагістралей з урахуванням закономірностей руху транспортного потоку, затримок транспортних засобів при зміні смуг руху для вимог проектування.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих принципів визначення пропускної спроможності смуг руху автомагістралей.
2. Виконати аналіз опублікованих спостережень за станом пропускної спроможності і рухом транспортних потоків по смугах автомагістралей.
3. Визначити узагальнені принципи, за якими необхідно розраховувати пропускну спроможність смуг руху і врахувати їх в дослідженні.
4. Виявити впливи багатосмуговості, станів транспортного потоку на пропускну спроможність автомагістралей.
5. Встановити вплив на пропускну спроможність швидкості, щільності в часі і просторі  $N(V, Q, T, L)$  для опису закономірностей транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях.
6. Встановити пропускну спроможність кожної смуги руху і умови переходу з однієї смуги на іншу.
7. Виконати аналіз натурних досліджень за рухом транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях.
8. Розробити рекомендації для визначення пропускної спроможності смуг руху автомагістралей.

**Об'єкт дослідження** – пропускну спроможність смуг руху на багатосмугових автомагістралях.

**Предмет дослідження** – принципи, які визначають стан транспортних потоків по смугах руху.

**Методи дослідження** – методи системно-структурного аналізу. Порівняльним та кількісно-статистичним підходами виконано оцінювання впливу транспортних засобів на рівень пропускної спроможності автомагістралей. Методи факторного аналізу, структурно-логічного та функціонального

моделювання використовувались при побудові інформаційної моделі автомагістралей. Методами математичного моделювання та апроксимації досліджені просторово-часові розподіли транспортних потоків по смугах руху на основі теорії насичених транспортних потоків.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

Визначені нові принципи для розрахунку пропускної спроможності автомагістралей. Рекомендовано враховувати при проектуванні автомагістралей, крім відомих, нові принципи, доповнені уточненими залежностями: оптимальної і максимальної щільності, зміни швидкості  $dV/dt$  на зміну інтенсивності потоку  $dN/dt$ ; розподілу інтенсивності транспортного потоку в просторі  $N(L)$  (принцип питомої інтенсивності); взаємозв'язку між інтервалами проходження автомобілів через перетин і розмірами питомої інтенсивності; різної швидкості по смугах руху для можливості зміни смуг; виникнення затору (конгестії) при однаковій швидкості по смугах руху.

Вперше теоретично визначена і натурними спостереженнями підтверджена пропускна спроможність одиничної довжини (1км) смуги руху на автомагістралях.

Визначено зв'язок між інтервалами руху автомобілів через перетин смуги і питомою інтенсивністю в хвилинному відрізку часу.

Вперше обґрунтовано показник розподілу пропускної спроможності по смугах руху на автомагістралях і розподіл затримок транспортних засобів при зміні смуг руху.

Теоретично визначено і натурними спостереженнями підтверджено, що пропускна спроможність смуг руху зростає від крайньої правої (першої) смуги і далі, а не зменшується, як вказано в ДБН В.2.3-5:2005 «Вулиці та дороги населених пунктів».

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у розробці рекомендацій для визначення пропускної спроможності багатосмугових автомагістралей з урахуванням питомої інтенсивності за хвилину на кілометрі смуги, інтервалів між автомобілями при проходженні перетину, нових значень коефіцієнта багатосмуговості, які можуть застосовуватися в техніко-економічних обґрунтуваннях реконструкції та будівництва автомагістралей, в навчальному процесі.

Розроблені рекомендації дозволяють виконувати розрахунок кількості смуг руху не тільки автомагістралей дорожньої мережі та і для магістральних вулиць безперервного руху у великих та найбільших містах.

Практична значимість результатів досліджень підтверджується актом впровадження ТК №314 Мінрегіонбуду з стандартизації «Планування територій та населених пунктів».

Результати дослідження впроваджені при проектуванні багатосмугових автомагістралей державним підприємством Український державний проектний інститут «УКРМІСЬКБУДПРОЕКТ», в розробці заходів з аудиту безпеки дорожнього руху філіалом «Науково-дослідницька частина», Мінськ,

Білоруський національний технічний університет (БНТУ), що підтверджується актами впровадження.

Результати дослідження використані в навчальному процесі, зокрема в лекційних курсах «Урбапланування транспортних систем», «Інтегровані регіональні та міжрегіональні транспортні системи» на кафедрі містобудування та урбаністики Харківського національного університету будівництва та архітектури для підготовки магістрів за напрямом «Архітектура та містобудування».

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто, що підтверджується одноосібними публікаціями з ключових аспектів роботи [3, 5, 7, 8, 11, 12].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: в роботі [1] визначені характеристики транспортних потоків, що використовуються для розрахунку пропускнуої спроможності автомагістралей; в роботі [2] виконаний прогноз завантаження автомагістралей міст транспортними потоками; в роботі [4] формалізовано взаємозв'язок між інтенсивністю, швидкістю і щільністю на рівні пропускнуої спроможності смуг руху; в роботах [9, 13, 14] визначається пропускна спроможність різних смуг руху автомагістралей, як елементів транспортних коридорів; в роботі [6] обґрунтовується рівень завантаження смуг руху і коефіцієнт багатосмуговості; в роботах [10, 15] сформульовані принципи, які необхідно враховувати при розрахунку пропускнуої спроможності смуг руху.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідались, обговорювалися та отримали підтримку на: 65-й науково-технічній конференції, присвяченій 80-річчю ХДТУБА (23–25 лютого 2010 р., м. Харків, ХДТУБА); ХІХ Міжнародній науково-практичній конференції «Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния» (16–17 червня 2010 р., м. Єкатеринбург); Всеукраїнському науково-практичному семінарі «Транспортні системи мегаполісів. Проблеми і шляхи вирішення» (12–13 жовтня 2010 р., м. Харків, ХНАДУ); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы функционирования систем транспорта» (18–19 листопада 2010 р., м. Тюмень, ТюмГНГУ); щорічній Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов» (24–28 жовтня 2011 р., м. Мінськ, БНТУ); 76-й науково-технічній та науково-методичній конференції університету (9–13 квітня 2012 р., м. Харків, ХНАДУ); Міжнародній науково-практичній конференції «Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов» (1–4 листопада 2012 р., м. Харків, ХНАДУ); ІІІ Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту та культури дорожнього руху» (16–17 квітня 2013 р., м. Харків, ХНАДУ); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблемы и перспективы развития евроазиатских транспортных систем» (17–18 травня 2013 р., м. Челябінськ, ЮурГУ); щорічній V Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование организации дорожного движения и

перевозок пасажирів и грузов» (15–16 жовтня 2013 р., м. Мінськ, Білорусь, БНТУ); I Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя» – «Архітектура. Будівництво. Дизайн» (10–14 лютого 2014 р., м. Київ); щорічній VI Міжнародній науково-практичній конференції «Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов» (22–24 жовтня 2014 р., м. Мінськ, БНТУ); науково-методичному семінарі «Сучасні геоінформаційні технології при підготовці фахівців дорожньої галузі» (5 березня 2015 р., м. Харків, ХНАДУ); одинадцятій науково-практичній міжнародній конференції «Міжнародні транспортні коридори та корпоративна логістика» (11–13 червня 2015 р., м. Харків, УДУЗТ).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових працях: 6 статей у спеціалізованих наукових виданнях, що входять до переліку МОН України, 3 – у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, 7 – репрезентовано в електронних виданнях, 4 статті у закордонних виданнях, 5 тез доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг роботи складає 145 сторінок, у тому числі 126 сторінок основного тексту, 73 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел із 116 найменувань, 2 додатки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження наведено наукову новизну, практичне значення та впровадження отриманих результатів.

**У першому розділі** виконано аналіз принципів визначення пропускної спроможності смуг багатосмугових автомагістралей, проведено огляд основних напрямків уточнення і підвищення пропускної спроможності та розглянуті виконані раніше дослідження за темою дисертації.

Серед транспортних проблем, які виникають при проектуванні багатосмугових доріг, на перше місце по значущості висувається проблема пропускної спроможності або необхідної кількості смуг руху, що визначає ширину проїзної частини автомагістралей. Загального визначення поняття «пропускна спроможність» серед фахівців різних країн не має. Мають місце: реальна, номінальна, можлива, дійсна, розрахункова пропускні спроможності.

Різним аспектам проектування й оцінці стану руху транспортних засобів на автомагістралях присвячені дослідження А.А. Агасьянца, Д.Л. Адамса, О.К. Біруля, В.Ф. Бабкова, Р.Л. Бертіні, А.О. Белятинського, С.А. Ваксмана, М. Вола, Ф.Г. Глика, В.Д. Гріншильдса, В.І. Гука, Д. Газіса, Д.Р. Дрю, О.В. Завального, Х. Иносе, Н. Кенеді, Д.Т. Кіма, В.С. Кернера, Є.М. Лобанова, Б. Мартіна, Д.Ф. Невела, Г. Поттгоффа, Є.О. Рейцена, Д.С. Самойлова,

В.В. Сільянова, А.В. Сігасєва, Є.Б. Угненко, В.В. Філіппова, М.С. Фішельсона, Т. Хамада, Ф. Хейта, Б.В. Черепанова, В.Л. Швеця, В.В. Шештокаса, А.П. Шевякова, Lewis Wei, Li Jiang, Sun Shao-yun Akgungor, Ali Payidar, Ackeret, Kenneth Walter та інших.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновки, що пропускну спроможність смуги руху різні дослідники вивчали на фундаменті проходження динамічного габариту автомобіля через перетин із рівняння  $P = 3600 \cdot V/L_d$ .

Американськими вченими обґрунтовано взаємозв'язок головних характеристик транспортного потоку інтенсивності ( $N$ ), швидкості ( $V$ ) і щільності ( $Q$ ), де  $N = V \cdot Q$ , що вказує на зростання пропускну спроможності, як від швидкості так і від щільності.

Різними вченими пропускну спроможність вивчалась по розподілу інтервалів в часі між автомобілями. По залежностям між швидкістю ( $V$ ) і інтенсивністю ( $N$ ) враховували вплив ( $V$ ) на ( $N$ ), а на багатосмугових автомагістралях враховували зменшення пропускну спроможності в порівнянні з крайньою правою (першою) смугою.

Розподіл автомобілів по смугах руху нерівномірний на всіх типах автомагістралей і залежить, в основному, від відстані до перетину в різних рівнях, загальної інтенсивності і складу потоку. Фундаментальними дослідженнями Вебба і Московича на дорожній мережі Лос-Анджелеса, встановлена інтенсивність за годину і швидкість по кожній смузі руху. Особливу доцільність має розподіл інтенсивності по 5-хв інтервалам пікового часу руху, де розкривається наявність суттєвих коливань в часі, які не враховуються при дослідженні закономірностей дорожнього руху. Стан пропускну спроможності підвищується від крайньої правої (першої) смуги руху. Інтенсивність на четвертій смузі руху дорівнює 2400 авт/год, середня швидкість в найбільш завантажений 5-хв інтервал години «пік» дорівнює 72 км/год. При такій швидкості інтервали між автомобілями, а це 20 м/с, дозволяють виконувати маневри зміни смуг руху.

Одержані А.Н. Красніковим залежності «інтенсивність-щільність» вказують, що величина пропускну спроможності однієї смуги руху складає для чотирьохсмугових доріг 1850 авт/год, для шестисмугових доріг 1950 авт/год.

Аналіз літературних джерел показав, що раніше вивчалась залежність швидкості від інтенсивності  $V(N)$ , а не  $N(V)$ , де враховується, як відомо, щільність, а не динамічний габарит.

Основний вид маневру на багатосмугових автомагістралях – зміна смуги руху. Цей маневр найчастіше виконується для з'їзду з автомагістралі або об'їзду повільно рухомого автомобіля. Частота і види маневрів залежать від завантаження автомагістралі рухом і відстані до з'їзду з автомагістралі.

У дослідженнях проф. В.І. Гука рекомендується при визначенні пропускну спроможності смуги руху враховувати швидкість вільного руху транспортного потоку ( $V_0$ ) по кожній смузі. Пропускну спроможність смуги руху, як потенціал дороги, рекомендується закладати під час її проектування за рівнянням:

$$N_m = 0,125 \cdot V_0 \cdot Q_m \cdot \alpha \cdot \kappa, \quad (1)$$



де  $k$  – підсумковий коефіцієнт, що враховує стан дорожніх умов руху;

$\alpha$  – коефіцієнт затримок автомобілів при зміні смуг руху;

$Q_m$  – максимальна щільність транспортного потоку, авт/км.

Швидкість вільного руху і максимальна щільність дозволяють отримати зростання пропускної спроможності по смугах, але в ДБН В.2.3-5:2005 «Вулиці та дороги населених пунктів» не зрозуміло, чому на швидкісних дорогах (автомагістралях), при більшому значенні швидкості вільного руху на другій (від крайньої правої) і третій смугах зменшується їх пропускна спроможність.

З урахуванням дорожнього і транспортного потенціалів, як суми, проф. В.І. Гук наводить значення реальної пропускної спроможності у вигляді:

$$N = Q_m \cdot V_0 (1 - V/V_0) (1 - Q/Q_m) \text{ тоді } N_m = 0,25 \cdot Q_m \cdot V_0. \quad (2)$$

В досліджених джерелах, вивчалась пропускна спроможність у поперечному перерізі смуг руху, а доцільно в просторі, тобто, – визначати питому інтенсивність  $U$ , як відношення інтенсивності ( $N$ ) до довжини смуги ( $L$ ),  $U = N/L$ , авт/год·км.

Аналіз та узагальнення існуючих досліджень, нормативних документів вказує на суттєві розбіжності у визначенні рівня пропускної спроможності смуг руху, принципову різницю в розподілі пропускної спроможності на автомагістралях в країнах СНД і за кордоном, нестійкий стан руху на рівні пропускної спроможності, відсутність узагальнених принципів, за якими можливо визначати і рекомендувати значення пропускної спроможності багатосмугових автомагістралей.

**Другий розділ** є основною теоретичною частиною дисертаційної роботи, у якому вперше з урахуванням закономірностей руху транспортного потоку на багатосмугових автомагістралях обґрунтовано задачу про формування принципів визначення пропускної спроможності. Під пропускною спроможністю приймається значення максимальної кількості автомобілів (максимальна інтенсивність в часі), що проїжджають через перетин або ділянку дороги за час (година, хвилина, секунда). При цьому враховується наявність біфуркації на рівні найбільших значень інтенсивності.

Обґрунтовано, що при визначенні пропускної спроможності смуги руху та вирішенні задач безпечного руху транспортних потоків при проектуванні багатосмугових автомагістралей необхідно враховувати основні положення теорії визначення пропускної спроможності:

1. Цілісність транспортного потоку, де рух послідовних автомобілів дуже близько повторює рух лідируючого автомобіля, тобто – «первинним є цілісність потоку, а другорядним – положення і швидкість автомобіля в потоці».

2. Безперервний потік динамічних габаритів автомобілів на рівні пропускної спроможності смуги.

3. Розподіл інтервалів між автомобілями при проходженні їх через перетин біля спостерігача на рівні пропускної спроможності смуги.

4. Оптимальну щільність розташування автомобілів по смузі руху на рівні пропускної спроможності.

5. Максимальну щільність транспортного потоку при заторі.

6. Вплив швидкості на інтенсивність.

7. Швидкість вільного руху, коли відсутні впливи на рух автомобіля інших автомобілів.

8. Оптимальну швидкість транспортного потоку на рівні пропускної спроможності смуги руху.

9. Взаємозв'язок максимальних параметрів транспортного потоку на рівні пропускної спроможності.

10. Вплив зміни швидкості на зміну інтенсивності потоку.

11. Розподіл пропускної спроможності по смугах руху (коефіцієнт багатосмуговості).

12. Розподіл інтенсивності транспортного потоку по смузі руху в її просторі (питома інтенсивність).

13. Взаємозв'язок між інтервалами проходження автомобілів через перетин і розмірами питомої інтенсивності.

14. Різну швидкість на смугах руху для можливості зміни смуг.

15. Виникнення затору (конгестії) при однаковій швидкості по смугах руху.

16. Комплексний облік всіх особливостей дорожнього руху на автомагістралях для встановлення їх реальної пропускної спроможності.

З урахуванням наведених вище узагальнених принципів, як відомих так і запропонованих, будемо визначати рівні пропускної спроможності смуг руху автомагістралей.

Пропускна спроможність ділянки смуги в просторі автомагістралі з урахуванням розподілу інтенсивності ( $N$ ) по довжині смуги ( $L$ ), де швидкість потоку ( $V$ ) знаходиться під впливом зміни інтенсивності  $dN(t)/dt$ . Залежність визнана в [10]:

$$V(t) = 1/U \cdot dN(t) / dt, \quad (3)$$

де  $U$  – питома інтенсивність, авт/год км, ( $U = N/L$ ) дозволяє описати залежність інтенсивності  $N(t)$  від швидкості в явному вигляді для часу, коли має місце прирощення або зменшення інтенсивності  $dN(t)/dt$ . Довжину ділянки смуги руху доцільно визначати як елементарну з урахуванням розподілу максимальної щільності потоку на кілометрі. В той же час інтенсивність  $N(t)$  будемо визначати з урахуванням впливу на зміну її швидкості  $V(t)$  під впливом щільності ( $Q$ ) авт/км :

$$N(t) = Q \cdot V(t). \quad (4)$$

Відомо, що більш поглиблено вивчалась не щільність, а залежності швидкості, інтенсивності від щільності, тобто  $V(Q)$  і  $N(Q)$ . Основоположенням є лінійна залежність  $V(Q)$ , яка вивчалась по експериментальним спостереженням і методами теорії масового обслуговування:

$$V(Q) = V_0 \cdot (1 - Q/Q_m), \quad (5)$$

причому, при  $Q = 0$ ,  $V = V_0$ ; при  $Q = Q_m$ ,  $V = 0$ .

Для потоку із легкових автомобілів  $Q_m$  (максимальна щільність) складає 100–125 авт/км.

Залежність інтенсивності від щільності  $N(Q)$ , з урахуванням  $N = Q \cdot V$ , та заміною  $V(Q)$  на рівняння (4) отримаємо у вигляді :

$$N(Q) = Q \cdot V_0(1 - Q/Q_m), \quad (6)$$

причому, при  $Q = 0$ ,  $N = 0$ ; при  $Q = Q_m$ ,  $N = 0$ .

В той же час, шляхом нескладних перетворень одержимо залежність інтенсивності від швидкості потоку  $N(V)$ :

$$N(V) = Q_m \cdot V(1 - V/V_0). \quad (7)$$

Отриманні залежності (5), (6) дозволяють визначити, з урахуванням  $U = N/L$ , відповідні рівняння для питомої інтенсивності ( $U$ ):

$$U(Q) = V_0 \cdot Q(Q - Q_m) / LQ_m, \quad (8)$$

$$U(V) = Q_m \cdot V(V_0 - V) / L \cdot V_0. \quad (9)$$

Фізичне значення питомої інтенсивності в русі транспортного потоку уточнимо, розглядаючи рух за достатньо малий проміжок часу  $\Delta t$ , що дозволяє приблизно прийняти:

$$V = 1/U \cdot \Delta N / \Delta t, \quad \Delta N = U \cdot V \Delta t, \quad \Delta t = 1/U \cdot \Delta N / V. \quad (10)$$

Звідки бачимо, що питома інтенсивність є тільки характеристикою транспортного потоку, незалежною від будь-яких зовнішніх обставин. Усе вищевикладене відноситься до руху насиченого транспортного потоку. Питома інтенсивність визначає інтервали між автомобілями, через які вони проїжджають перетин смуги.

В той же час коефіцієнт затримок при безперервному русі транспортного потоку під впливом змін смуг руху на основі методів теорії черг визначається:

$$\alpha_{\text{затр.}} = V_2 \cdot Q_m(Q_m - Q_1) / V_1((Q_m - Q_1)^2 + Q_1 Q_m). \quad (11)$$

При оптимальній щільності на рівні пропускної спроможності і рівної по смугах швидкості руху на проїзній частині магістралі  $V_1 = V_2$  значення коефіцієнта затримок знижується до 0,667 і збільшується залежно від різниці швидкостей  $V_2 > V_1$  на внутрішній  $V_2$  і зовнішньої  $V_1$  смугах руху від 0,8 до 1. Збільшення кількості смуг руху, а також і інші планувальні і організаційні заходи дозволяють підвищити пропускну спроможність магістралей з безперервним режимом руху. Для зменшення вірогідності виникнення затору (конгестії) доцільно на різних смугах руху мати різну швидкість руху, збільшуючи її відносно крайньої правої (першої) смуги руху на 10–15 км/год.

Критерій розподілу затримок автомобілів на смугах перегонів автомагістралей визначено із залежності  $N = l_{\text{сер}} \cdot V \cdot dQ/dx$ , де  $dQ/dx$  визначено як градієнт щільності (похідна щільності). Звідки видно, що інтенсивність

транспортного потоку пропорційна градієнту щільності (нерівномірній зміні щільності в просторі на одиницю довжини дороги):

$$\frac{N}{dQ/dx} = l_{\text{сер}} \cdot V = \beta. \quad (12)$$

Показник  $\beta$  характеризує нерівномірність розподілу транспортних засобів по смузі автомагістралі. Водночас він є об'єктивним критерієм кількісної оцінки якості організації дорожнього руху, як добуток середньої дальності пробігу без затримок на з'їздах на середню швидкість потоку. Чим  $\beta$  більше, тим вище якість організації дорожнього руху, оскільки збільшується дальність руху без гальмувань на вищій швидкості. Середня довжина вільного руху без затримок описується як  $l_{\text{сер}} = l_{\text{сер}} \cdot V$ . Знаючи середню тривалість руху автомобіля без затримок і середню швидкість руху автомобілів по автомагістралі можливо легко оцінити якість організації дорожнього руху. Як критерій стійкості дорожнього руху, показник  $\beta$  є складовою частиною рівнянь руху у вигляді хвиль щільності, де їм враховується частка нерівномірного розподілу щільності, оскільки інтенсивність ( $N$ ) транспортного потоку залежить як від щільності ( $Q$ ), так і від її градієнта ( $dQ/dx$ ), що визначає зміну щільності на одиницю довжини ділянки дороги  $N = N(Q) - \beta dQ/dx$ .

**У третьому розділі** наведено аналіз відеоспостережень за закономірностями змін характеристик транспортних потоків і їх взаємозв'язку на багатосмугових автомагістралях. Для отримання експериментальних даних проведена обробка відеозапису за рухом транспортного потоку на багатосмугових автомагістралях. Відеозапис включає увесь спектр станів транспортного потоку: від вільного руху – до затору.

За результатами обробки матеріалів відеоспостережень одержані відомості про інтенсивність і щільність по кожній смузі в одному напрямку.

На крайній правій (першій) смузі руху спостерігалися яскраво виражені стани руху у вільних умовах і в насиченому потоці на рівні пропускної спроможності. Регресійне рівняння має квадратичну форму  $N = 323,2 + 38,57Q - 0,3Q^2$ , де коефіцієнт кореляції  $r = 0,94$  і середньоквадратичне відхилення  $S = 129,26$ .

На суміжній (другій) смузі руху характер взаємозв'язку інтенсивності і щільності інший, хоча найбільш допустиме рівняння регресії квадратичне  $N = 552,5 + 28,7Q - 0,33Q^2$ ,  $r = 0,87$ ,  $S = 96,12$ .

На третій смузі руху спостерігається насичений і колонний рух транспортних потоків в передзаторових ситуаціях. Насичений рух знаходиться в перехідному стані. Колонний рух починається з щільності 60 авт/км, а стан затору при  $Q = 90 - 105$  авт/км. Інтенсивність відповідно зменшується від 1200 авт/год до 700 авт/год. Рівняння регресії має квадратичну форму  $N = 1217,63 + 4,32Q - 0,07Q^2$ , де  $S = 123$ ,  $r = 0,79$ .

За результатами обробки спостережень на багатосмуговій дорозі встановлено, що на *крайній правій (першій) смузі руху* взаємозв'язок між інтенсивністю і швидкістю описується рівнянням регресії квадратичної форми

$N = 961,6 + 34,6V - 0,57V^2$ , при цьому середньоквадратичне відхилення  $S = 116,6$ , а коефіцієнт кореляції  $r = 0,955$  вказує на високу тісноту зв'язків. У вільних умовах руху швидкість знаходиться в межах 60-74 км/год і інтенсивність змінюється від 600 до 1000 авт/год. При насиченому русі швидкість потоку коливається в межах 24–48 км/год, а інтенсивність змінюється від 1260 до 1600 авт/год. Значення швидкості 48 км/год відповідає інтенсивності 1260 авт/год. Тісніше взаємозв'язок  $N(V)$  описується синусоїдальною функцією, так як  $S = 87,9$  і  $r = 0,97$ , але її можна розглядати тільки в межах  $V = 21–74$  км/год, тому що значення швидкості вільного руху при малій інтенсивності стає вище розрахункової.

На *другій* смузі руху до вільних умов руху можна віднести дані, де швидкість знаходиться в межах 60–72 км/год, а інтенсивність 600–980 авт/год. При насиченому русі швидкість спостерігається в межах 29–43 км/год, а інтенсивність 1070–1260 авт/год. Рівняння регресії має форму моделі Ноерл, де  $S = 87,287$ ,  $r = 0,895$ , що вказує на тісний зв'язок.

Взаємозв'язок між інтенсивністю і швидкістю на *третьій* смузі руху також достатньо близько можна описати рівнянням регресії квадратичної форми,  $N = 691,3 + 26,06V - 0,27V^2$ . У цьому випадку стани руху спостерігалися близькими до заторових (конгестії), швидкість є низькою 10–15 км/год і інтенсивність руху автомобілів зменшується від 1200 авт/год до 700 авт/год. У насиченому русі розкид швидкості від 39 до 68 км/год, а інтенсивності коливається в межах 1200 – 1480 авт/год. Відповідно середнє квадратичне відхилення  $S = 134,28$  і коефіцієнт кореляції  $r = 0,75$ .

Вперше вивчалася залежність не  $V(N)$ , а інтенсивності від швидкості  $N(V)$ . Коефіцієнт кореляції ( $r = 0,97$ ) вказує на дуже тісний взаємозв'язок.

Взаємозв'язок між щільністю і швидкістю в транспортному потоці на крайній правій (першій) смузі руху достатньо близько описується лінійною регресією  $V = 75,16 - 0,64Q$ , де швидкість вільного руху  $V_0 = 75,16$  км/год, середньоквадратичне відхилення  $S = 4,58$  і коефіцієнт кореляції  $r = 0,98$ .

На *другій* смузі руху також спостерігається достатньо тісний лінійний зв'язок між швидкістю і щільністю,  $V = 76,8 - 1,088Q$ , де  $S = 5,99$ ,  $r = 0,93$ , що характеризує зменшення швидкості зі зростанням щільності.

За вільних умов руху, швидкість змінюється в межах 60–73 км/год, а щільність 7–24 авт/км. При насиченому русі коливання швидкості незначні 29–38 км/год, але щільність змінюється в межах від 30 до 56 авт/км, тобто мають місце флуктуації динамічного габариту.

Взаємозв'язок між швидкістю і щільністю на *третьій* смузі руху також достатньо близько описується лінійним регресійним рівнянням  $V = 77,18 - 0,91Q$ , де  $S = 4$  авт/км,  $r = 0,97$ .

Відеоспостереженнями зафіксована певна частота переходу автомобілів із смуги на смугу, тобто зміна смуги для подальшого транзитного руху з вищою швидкістю. У дослідженні прийняте припущення, що відносна частота переходу із смуги на смугу повинна бути близькою або повністю відповідати теоретичній кривій розподілу інтервалів зміни смуги за законом Пуассона. Кумулятивна

крива побудована для випадку переходу автомобілів з крайньої правої (першої) смуги руху на другу. Кількість інтервалів, що спостерігалися, – 52, інтенсивність руху – 736 авт/год. Перевірку припущення Пуассона щодо розподілу інтервалів зміни смуги руху виконано за законом критерію згоди  $\chi$ -квадрат. Для 52-х випадків зміни смуги вірогідність  $P[\chi^2 (52-2) > 67,5]$  становить 0,95, що не суперечить припущенню Пуассона про розподіл частоти зміни смуги руху в межах інтервалів від 20 до 100 секунд.

Виконано аналіз статистичного матеріалу досліджень за рухом транспортних потоків на шестисмуговому автобані (A5) біля Франкфурта на Майні в Німеччині, де вивчались закономірності зміни інтенсивності і швидкості транспортних потоків на рівні виникнення транспортних заторів (конгестії), їх тривалість і облік в управлінні рухом. З численного об'єму даних про рух в просторі смуги і в часі, вибрані ділянки і час, коли виникають передзаторові черги з автомобілів під час колонного руху. Встановлено середні значення інтенсивності по трьох смугах руху – 4830 авт/год, по крайній правій (першій) смузі – 1220 авт/год, по другій, або середній смузі, 1670 авт/год, по третій (лівій смузі) 1950 авт/год. Хоча ці значення інтенсивності ще не досягають рівня пропускної спроможності, але дозволяють виявити коефіцієнти збільшення інтенсивності по смугах і збільшення пропускної спроможності по смугах руху (рис. 1).

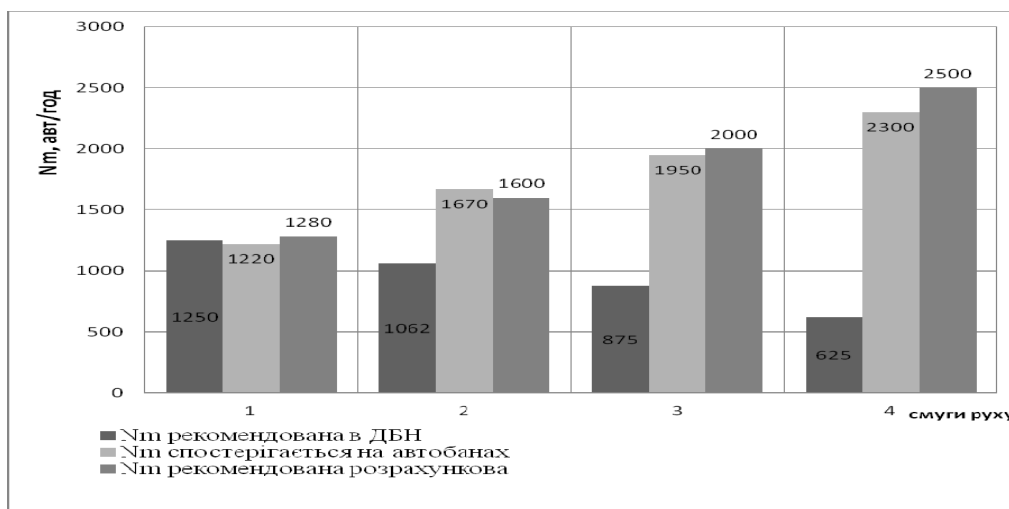


Рисунок 1 – Розподіл інтенсивності по смугах руху на автомагістралі

Так пропускна спроможність другої смуги руху вище, ніж крайньої правої (першої) в 1,4 рази, а третьої смуги руху в 1,6 рази. Сумарний коефіцієнт багатосмуговості для двосмугової проїзної частини в одному напрямку – 2,4, для трьохсмугової – 4. Коефіцієнт багатосмуговості для чотирьохсмугової автомагістралі в одному напрямку – 5,92.

Максимальне значення інтенсивності по третій смузі автобану (A5) спостерігалось на рівні 2760 авт/год. Це близько до рівня пропускної спроможності, тому що від вільного руху швидкість автомобільного потоку

знизилися зі 108 км/год до 86 км/год. Виконуючи зворотній перерахунок з урахуванням коефіцієнта багатосмуговості, визначимо значення пропускної спроможності середньої смуги  $2760/1,2 = 2300$  авт/год і для крайньої правої (першої) смуги 1725 авт/год. Прогнозне значення пропускної спроможності п'ятої смуги руху в межах 3300 авт/год постійно фіксується англійською лабораторією на швидкісних дорогах Англії, де спостерігається інтервал між автомобілями в межах секунди, а це 3600 авт/год.

В ДБН В.2.3-5 вказана пропускна спроможність крайньої правої (першої) смуги руху при безперервному русі для доріг і магістралей в розмірі 1200 легкових авт/год і коефіцієнти багатосмуговості для двох смуг руху в одному напрямку 1,9, для трьох 2,7 і для чотирьох – 3,5, а це зменшення загальної пропускної спроможності автомагістралі і недоцільність будівництва доріг більш ніж чотири смуги в одному напрямку. В Україні багатосмугових доріг майже немає, а закордонний досвід і теоретичні висновки дослідження вказують на зростання пропускної спроможності інших смуг під впливом підвищення швидкості руху.

У четвертому розділі розроблені рекомендації по визначенню пропускної спроможності смуг руху для багатосмугових автомагістралей з урахуванням питомої інтенсивності за хвилину на кілометрі смуги, інтервалів між автомобілями при проходженні перетину, коефіцієнта багатосмуговості для двох, трьох і з апроксимацією для чотирьох смуг в одному напрямку (табл. 1).

Таблиця 1 – Рекомендована пропускна спроможність смуг руху для багатосмугової автомагістралі

Показники руху	Смуги руху			
	четверта	третя	друга	перша (крайня права)
Розрахункова інтенсивність, $N_m$ , авт/год	2500	2000	1600	1280
Інтенсивність, що спостерігається, $N_m$ , авт/год	2300	1950	1670	1220
Питома інтенсивність, $U$ , авт/хв·км	39	33	28	21
Інтервал між автомобілями, с	1,53	1,8	2,17	2,96
Коефіцієнт багатосмуговості, $K_6$	5,9	4,0	2,4	1,0
Швидкість потоку, $V$ , км/год	94	80	67	54

На крайній правій (першій) смузі руху, при наявності вантажних автомобілів, щільність при заторі дорівнює 90 авт/км, швидкість 54 км/год, а на другій смузі руху біля 70 км/год. При управлінні рухом на рівні пропускної спроможності, щоб уникнути затору, доцільно встановлювати на автоматичних знаках швидкість (з різницею 13–14 км/год) по кожній смузі руху.

Таким чином, за відеоспостереженнями визначені емпіричні рівняння, що описують закономірність зміни інтенсивності під впливом щільності на першій, другій і третій смугах руху в одному напрямі в діапазонах вільного, насиченого і заторового станів. Встановлено взаємозв'язок між інтенсивністю і швидкістю і впливу швидкості на інтенсивність. Раніше така залежність не вивчалася.

Визначений взаємозв'язок між швидкістю і щільністю, описуваний емпіричними рівняннями для першої, другої і третьої смуги руху. Визначені особливості зміни смуг руху і закономірності, що відповідають розподілу Пуассона. Встановлено, що пропускна спроможність зростає від крайньої правої (першої) смуги руху і далі відповідно зі зростанням швидкості руху по суміжних смугах. Встановлена відповідність коефіцієнта затримок, що описує зниження пропускної спроможності смуг руху під впливом переходу автомобілів з однієї смуги на іншу, і коефіцієнту багатосмуговості, значення якого суттєво відрізняються від відомих. Встановлена відповідність рівнянь (1, 2, 4–6, 10) емпіричним даним, що дозволяє їх використовувати при вирішенні задач проектування автомагістралей.

Оскільки інтенсивність транспортного потоку в часі змінюється щохвилини, її доцільно визначати в межах хвилини. Це дозволяє визначити інтервали між транспортними засобами. Так, на першій смузі (крайня права) при інтервалі 2,96 с інтенсивність складатиме 20 авт/хв, на другій смузі при інтервалі 2,17 с – 28 авт/хв, на третій смузі при інтервалі 1,8 с – 33 авт/хв, на четвертій смузі при інтервалі 1,53 с – 39 авт/хв. Динамічний габарит буде дорівнювати відповідно 44,4 м, 40,4 м, 39,3 м, 39,95, а на п'ятій смузі при швидкості 108 км/год, або 30 м/с і інтервалі 1,33 с – 39,9 м. Тобто довжина динамічного габариту на другій і суміжних смугах дорівнює 40 м, а це 25 авт/км, які проїжджають перетин за хвилину, і питома інтенсивність по смузі буде 25 авт/хв·км. Більша довжина динамічного габариту викликана наявністю вантажних автомобілів.

В просторі смуги руху інтенсивність транспортного потоку на рівні пропускної спроможності буде розподілятися на 60 км.

Значення пропускної спроможності першої смуги руху і коефіцієнта багатосмуговості дозволяють визначити пропускну спроможність проїзної частини з різною кількістю смуг руху в одному напрямку. Так, пропускна спроможність двох смуг складає 2880 авт/год, трьох смуг – 4880 авт/год, чотирьох смуг – 7235 авт/год.

З урахуванням, що за годину «пік» транспортний потік складає 10 % від добового, отримаємо, для випадку руху майже в одному напрямку значення



максимальної добової інтенсивності: чотирьохсмугової автомагістралі – 28800 авт/добу (57600 авт/добу в двох напрямках), а не 40000 авт/добу в двох напрямках, як в ДБН В.2.3-4, шестисмугової – 48880 авт/добу, або 97760 авт/добу (а не 60000 авт/добу), восьмисмугової – 72350 авт/добу (144 авт/хв), або 144700 авт/добу (а не 80000 авт/добу і більше). Таким чином, реальна пропускна спроможність для екстремального випадку буде вища ніж закладена в нормативах. Це є резерв на підходах до великих міст.

При проектуванні автомагістралі враховується її добова інтенсивність 40000 авт/добу. Але, як обґрунтовано в дослідженні, за добу по автомагістралі можуть проїхати на рівні пропускної спроможності 57600 автомобілів. Тобто в 1,44 рази більше, ніж нормативно заплановано. Економічна ефективність з витрат на будівництво на один автомобіль, який користується автомагістраллю, складає за добу 984 грн, а в цілому економічна ефективність за добу на рівні пропускної спроможності складає 56,67 млн. грн на одному кілометрі.

## ВИСНОВКИ

1. Необхідність дослідження стану транспортних потоків і визначення пропускної спроможності автомагістралей обґрунтовується швидким ростом автомобілізації України, відсутністю в ДБН В.2.3-4 вимог до будівництва нових та реконструкцій існуючих автомагістралей. В практиці проектування і організації дорожнього руху визначалась і досліджувалась тільки пропускна спроможність однієї смуги. Для теоретичного обґрунтування розмірів пропускної спроможності, необхідно сформулювати узагальнені принципи її визначення для автомагістралей.

2. Встановлено, що визначати пропускну спроможність смуги руху необхідно з урахуванням спроможності всієї дороги та можливості її підвищення. Визначати пропускну спроможність багатосмугових автомагістралей необхідно по уточненню взаємозв'язку між інтенсивністю, щільністю і швидкістю по кожній смузі руху враховуючи можливість зміни смуг і затримок при цьому. Для цього доцільне теоретичне та експериментальне обґрунтування коефіцієнта багатосмуговості.

3. Визначені узагальнені положення теорії щодо розрахунку пропускної спроможності автомагістралей. Існуючі принципи, що враховують цілісність транспортного потоку, динамічні габарити, інтервали, максимальну щільність і швидкість вільного руху, доповнені уточненими залежностями: оптимальної щільності, різної швидкості по смугах, питомої інтенсивності, впливу зміни швидкості на зміну інтенсивності, виникнення затору при однаковій швидкості по смугах руху, комплексного обліку всіх особливостей дорожнього руху на автомагістралях для встановлення їх реальної пропускної спроможності.

4. Визначена пропускна спроможність ділянки одиничної довжини смуги як максимальна питома інтенсивність. Визначені рівняння (7)–(9), що описують закономірності зростання питомої інтенсивності, її залежності від швидкості та

щільності потоку. Проаналізовано вплив питомої інтенсивності на швидкість потоку, на інтенсивність і на час руху та вказано, що питома інтенсивність є тільки характеристикою транспортного потоку і не залежить від зовнішніх факторів.

5. На основі теорії черг визначено коефіцієнт затримок автомобілів при зміні смуги руху в залежності від швидкості руху і розподілу щільності по смугах. Формалізовано загальний показник розподілу затримок на перегоні автомагістралі від зміни смуг руху, який указує на комбіновану нерівномірність розподілу транспортного руху, коли швидкість хвилі потоку менше швидкості вільного руху, або на нестійкість руху, коли швидкість хвилі потоку перевищує швидкість вільного руху і водій не бачить умов руху попереду.

6. Визначені емпіричні рівняння, що описують закономірність зміни інтенсивності під впливом щільності на першій (крайній правій), другій і третій смугах в одному напрямі в діапазонах вільного, насиченого і заторового станів. Встановлений взаємозв'язок між інтенсивністю і швидкістю і закономірність впливу зміни швидкості на інтенсивність. Визначений взаємозв'язок між швидкістю і щільністю, описано емпіричними рівняннями для першої, другої і третьої смуги. Визначені закономірності і особливості зміни смуг руху і їх відповідність розподілу Пуассона. Перевірка на адекватність емпіричних залежностей теоретичним моделям показала відповідність вимогам критеріїв Пірсона і Фішера.

7. Встановлено, що пропускна спроможність зростає від крайньої правої (першої) смуги і далі, відповідно зі зростанням швидкості руху по суміжних смугах. Визначена відповідність коефіцієнта затримок, що описує зниження пропускної спроможності смуг руху під впливом переходу автомобілів з однієї смуги на іншу, і коефіцієнта багатосмуговості, нові значення якого відрізняються від відомих, натурним спостереженням. Відповідність рівнянь (1, 2, 10) емпіричним даним дозволяє їх використовувати при проектуванні автомагістралей.

8. Розроблені рекомендації для визначення пропускної спроможності багатосмугових автомагістралей. Основні положення рекомендацій обґрунтовані теоретично та підтверджені натурними спостереженнями.

9. Для дороги I-а категорії (чотири смуги руху) економічна ефективність на один автомобіль складає 984 грн на кілометрі, а загальна ефективність за добу на кілометрі складає 56,68 млн.грн.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

– *Статті в наукових фахових виданнях:*

1. Запорожцева Е.В. Новые характеристики для развития теории измерителей транспортного потока / В.И. Гук, В.И. Чумаченко, Е.В. Запорожцева // Коммунальное хозяйство городов / Научно-технический сборник ХНАГХ. – 2008. – № 84. – С. 322–330.

2. Запорожцева Е.В. Прогноз урбанизации мегаполисов / С.В. Очеретенко, Е.В. Запорожцева // Коммунальное хозяйство городов / Научно-технический сборник ХНАГХ. – 2009. – № 86. – С. 377–383.

3. Запорожцева Е.В. Анализ напряженных состояний транспортных потоков / Е.В. Запорожцева // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 47. – С. 113–115.

4. Запорожцева О.В. Взаємозв'язок інтенсивності, швидкості і щільності транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях / В.І. Гук, О.В. Запорожцева // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 50. – С. 69–73.

5. Запорожцева Е.В. Распределение задержек автомобилей на автомагистралях / Е.В. Запорожцева // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2013. – Вып. 61/62. – С. 102–105.

6. Запорожцева Е.В. Распределение интенсивности автопотоков на многополосных магистралях / В.И. Гук, Е.В. Запорожцева // Проблеми розвитку міського середовища: наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 1(11). – С. 339–345.

– *Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та апробаційного характеру:*

7. Запорожцева Е.В. Распределение интенсивности транспортных потоков по полосам на многополосных автомагистралях / Е.В. Запорожцева // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: междунар. науч.-практ. конф., 24–28 октяб. 2011 г.: сб. науч. тр. – Минск, 2012. – С. 9–12.

8. Запорожцева Е.В. Пропускная способность автомагистралей в транспортных коридорах / Е.В. Запорожцева // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: материалы ежегодной междунар. науч.-практ. конф.: сб. науч. трудов. – Минск, 2014. – С. 11–15.

9. Запорожцева Е.В. Транспортные коридоры для Украины, её регионов и городов / В.И. Гук, Е.В. Запорожцева // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: ежегодная междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2014. – С. 15–19.

10. Запорожцева Е.В. Принципы определения пропускной способности многополосных автомагистралей / В.И. Гук, Е.В. Запорожцева // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов. – Минск, 2015. – С. 32–39.

11. Запорожцева Е.В. Пропускная способность автомагистралей / Е.В. Запорожцева // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XIX междунар. науч.-практ. конф., 16–17 июня 2010 г. – Екатеринбург, 2010. – С. 225–229.

12. Запорожцева Е.В. Особенности распределения транспортных потоков по полосам на автобанах / Е.В. Запорожцева // Проблеми функціонування

систем транспорту: матеріали міжнарод. науч.-практ. конф., 18–19 нояб. 2010 г. – Тюмень, 2010. – С. 122–123.

13. Запорожцева Е.В. К развитию сети автомобильных дорог Украины (новая сеть транспортных коридоров) / В.И. Гук, Е.В. Запорожцева, В.И. Гук // Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов: материалы междунар. науч.-практ. конф., 1–4 нояб. 2012 г. – Харьков, 2012. – С. 103–109.

14. Запорожцева Е.В. Требования к автомагистралям в составе транспортных коридоров Украины / В. И. Гук, Е. В. Запорожцева, В. И. Гук // Проблемы и перспективы развития евроазиатских транспортных систем: пятая материалы междунар. науч.-практ. конф., 17–18 мая 2013 г. – Челябинск, 2013. – С. 101–104.

15. Запорожцева Е.В. Международные транспортные коридоры: Принципы определения пропускной способности автомагистралей / В.И. Гук, Е.В. Запорожцева // Міжнародні транспортні коридори та корпоративна логістика: матеріали одинадцятої наук.-практ. міжнар. конф., 11–13 черв. 2015 р. – Харків, 2015. – Вип. 50. – С. 8–9.

## АНОТАЦІЯ

**Запорожцева О.В.** Удосконалення принципів визначення пропускної спроможності багатосмугових автомагистралей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2016.

Визначені узагальнені положення теорії щодо розрахунку пропускної спроможності автомагистралей з урахуванням розподілу інтенсивності, швидкості і щільності по смугах руху, залежностей між ними.

Визначена пропускна спроможність ділянки одиначної довжини смуги руху як максимальна питома інтенсивність. На основі теорії черг визначений коефіцієнт затримок автомобілів при зміні смуги руху. Формалізовано загальний показник розподілу затримок на перегоні автомагістралі від зміни смуг руху. Визначені емпіричні рівняння, що описують закономірність зміни інтенсивності під впливом щільності на першій, другій і третій смугах руху в одному напрямі в діапазонах вільного, насиченого і заторового станів. Встановлено взаємозв'язок між інтенсивністю і швидкістю і впливу зміни швидкості на інтенсивність. Раніше така залежність не вивчалася.

Встановлено, що пропускна спроможність зростає від крайньої правої (першої) смуги руху і далі відповідно зі зростанням швидкості руху по суміжних смугах.

На підставі проведеного дослідження розроблені рекомендації по визначенню пропускної спроможності багатосмугових автомагістралей.

**Ключові слова:** автомагістраль, пропускна спроможність, смуга руху, транспортний потік, принципи, інтенсивність і питома інтенсивність, швидкість і швидкість вільного руху, щільність і максимальна щільність, коефіцієнт затримок, коефіцієнт багатосмуговості, інтервали, динамічний габарит.

## АННОТАЦИЯ

**Запорожцева Е.В.** Усовершенствование принципов определения пропускной способности многополосных автомагистралей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 – автомобильные дороги и аэродромы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины, Харьков, 2016.

Определены принципы расчета пропускной способности автомагистралей с учетом распределения интенсивности, скорости и плотности по полосам движения, зависимостей между ними. Определена пропускная способность участка единичной длины полосы движения как максимальная удельная интенсивность. На основе теории очередей определён коэффициент задержек автомобилей при изменении полосы движения. Формализован общий показатель распределения задержек на перегоне автомагистрали при смене полос движения. Определены эмпирические уравнения, которые описывают закономерность изменения интенсивности под воздействием плотности на первой, второй и третьей полосах в одном направлении в диапазонах свободного, насыщенного и заторового состояний. Установлена взаимосвязь между интенсивностью и скоростью, а также закономерность влияния скорости на интенсивность. Ранее такая закономерность не изучалась.

Установлено, что пропускная способность растёт от крайней правой (первой) полосы движения и далее, соответственно, с ростом скорости движения по смежным полосам. На основе проведенного исследования разработаны рекомендации по определению пропускной способности полос движения многополосных автомагистралей.

**Ключевые слова:** автомагістраль, пропускная способность, полоса движения, транспортный поток, принципы, интенсивность и удельная интенсивность, скорость и скорость свободного движения, плотность и максимальная плотность, коэффициент задержек, коэффициент полосности, интервалы, динамический габарит.

## ABSTRACT

**Zaporozhtseva O.V.** Improvement of principles for determining multilane highway capacity. – Manuscript copyright.

Thesis for obtaining the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.22.11 – car ways and aerodromes. – Kharkov National Automobile and Highways University, Ministry of Education of Ukraine, Kharkov, 2016.

Modern estimation methods and theories of top-category road capacity are analysed. Also, capacity estimation methods for highways with 4,6 and 8 lanes are examined.

The principles of determining highway capacity are defined taking into account distribution of intensity, speed and density in the traffic lanes as well as their interdependencies.

For the first time capacity of lane unit length is defined as a maximum specific intensity. Equations that describe growth regularities of specific intensity, its dependencies on speed and density of the flow are defined.

Based on queuing theory, the delay coefficient while changing traffic lanes is defined. General index of distributing delays on highways while changing traffic lines is formalised.

Video materials showing traffic flows assisted in getting a wide range of various data on the regularities in traffic flows.

Empirical equations are defined. They describe regularities of changes in intensity affected by density in the first, second and third lanes in one direction within free, saturated and traffic jam states. Correlations between intensity and speed as well as regularities of speed influence on intensity are established. Such regularities have not been previously studied.

It has been established that capacity grows starting from the first lane (far right) and further according to the increase in traffic speed on separate lanes. The correspondence between the delay coefficient, indicating a decrease in capacity lanes under the influence of car transition from one lane to another, and the lane field observation coefficient has been established.

Based on the study, some recommendations for estimating the lane capacity value on multilane highways are developed.

When designing the highway, the daily intensity of 40,000 vehicles per day was taken into account. Yet, the study shows that the highway's throughput capacity could be increased up to 57,600 vehicles per day, which is 1.44 times higher than initially planned. The economic efficiency of building expenses per vehicle using the highway would be 984 UAH per day. Thus, in total, the highway throughput economic efficiency per day would make up 56.67 million UAH per kilometer.

**Key words:** highway, capacity, traffic lanes, intensity and specific intensity, traffic flow, principles, speed and free running speed, density and maximum density, delay coefficient, multilane coefficient, intervals, dynamic size.

Підписано до друку 21.04.2016 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman Cug. Віддруковано на різнографі  
Ум.друк. арк. 0,9.  
Зам. № 193/16. Тираж 100 прим. Ціна договірна

**ВИДАВНИЦТВО**

**Харківського національного автомобільно-дорожнього університету**

Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.  
Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення  
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04 2002 р.