

УДК 711.656 doi: 10.31650/2519-4208-2019-19-24-31

УЗАГАЛЬНЕНА ОЦІНКА КОМФОРТНОСТІ ВУЛИЦЬ І ДОРІГ МІСТ

Гук В.І., докт. техн. наук, професор

Харківський національний університет будівництва та архітектури

Сташенко М.С., магістр архітектури, асистент

Одеська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Обґрунтовується критерій для узагальненої оцінки якості дорожнього руху на дорогах і магістралях різного класу. Ураховується стан руху без затримок, вплив різних знижень швидкості, як хвиль в цілому на трафік і окремо на водія.

Ключові слова: інтенсивність, швидкість, щільність, хвилі, градієнти щільності, коефіцієнт якості руху.

ОБОБЩЕННАЯ ОЦЕНКА КОМФОРТНОСТИ УЛИЦ И ДОРОГ ГОРОДОВ

Гук В.И., докт. техн. наук, профессор

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Сташенко М.С., магистр архитектуры, ассистент

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Аннотация. Обосновывается критерий для обобщенной оценки качества дорожного движения на дорогах и магістралях разного класса. Учитывается состояние движения без задержек, влияние различных снижений скорости как волн в целом на трафик и отдельно на водителя.

Ключевые слова: интенсивность, скорость, плотность, волны, градиенты плотности, коэффициент качества движения.

A COMMON ASSESSMENT OF THE LOCATION OF STORES AND DROPS OF THE CITY

Guk V. I., doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Urbanistics
Kharkiv

National University of Construction and Architecture, Kharkiv

Stashenko M. S., assistant Professor of the Department of Architecture of Buildings and Structures

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa

Number: +380638717368

Abstract. The criterion for a generalized assessment of the quality of traffic on roads and highways of different classes is substantiated. Considered the state of motion without delays, the effect of various reductions in speed, as waves, in general on traffic and separately on the driver. The structure of the city's street and road network is determined by its horizontal architecture, the composition of which is the transport network, and each line of highways determines the possible speed of movement. As you know, the significant impact on the functioning of the road network of cities is the level of loading by its vehicles and their movement. Thus, at the level of bandwidth of the lane in 1500 car / year, the traffic flow takes 30 km of the road and its movement can not be stable. Waves arise [1] under the influence of which the density of the transport stream varies, and with the change in density, the velocity V and the intensity of N . vary.

Let's consider how the traffic flow along the highway is applied, taking into account only the mutual influence of moving cars in traffic, that is, we will define a macroscopic phenomenon

based on the microscopic motion of single cars. Consider that the traffic flow intensity in the general case is not zero, if the distribution of intervals in the flow is not equal to zero or the cars distributed along the road are not in the state of a blow. Consider the traffic flow in the direction of the axis of one lane of the road x . Note that the number of cars crossing the intersection of the road during time Δt is equal to the number of cars located on the road segment at a distance, where $V\Delta t$ is the speed of vehicles. Then the number of cars moving on a single section of the road will be equal to the density of the length $V\Delta t$.

A generalized criterion for assessing the stability of traffic on various highways of cities. As you know, the significant impact on the functioning of the road network of cities is the level of loading by its vehicles and their movement. Thus, at the level of bandwidth of the lane in 1500 car / year, the traffic flow takes 30 km of the road and its movement can not be stable. Waves arise [1] under the influence of which the density of the transport stream varies, and with the change in density, the velocity V and the intensity of N .

The motion of a perturbed transport stream with an uneven density distribution in relation to an equilibrium state with a velocity determined by its position to the equilibrium state is described by the equation of the type of the Fick equation, which can be determined by analogy with heat conduction or electricity as the equation of "transport diffusion". In this case, "transport diffusion" means uneven distribution of density under the influence of uneven intensity. Consequently, the coefficient can be characterized by the quality of traffic, taking into account the frequency of delays.

Inverted (shock) waves in the traffic flow. Strong disturbances that arise in the traffic flow as a result of traffic accidents, congestion, unexpected changes in traffic conditions, as established, are described by a nonlinear differential equation. In addition, there are new features, of which the most significant occurrence of reverse (shock) waves. At the front of the return wave transport flow undergoes a sudden and quite substantial change in speed, density and intensity [5; 4; 7; 6-8; 9; 11]. Even in continuous motion due to the influence of drivers on the movement process, there can automatically be discontinuities in the flow, or the existing gap in the flow can quickly smooth out as a result of the fact that the car's flow will overtake ahead of the group ahead. These circumstances are essentially related to the nonlinearity of the equations. The first papers on the analysis of shock waves in the traffic flow were performed by D. Neumann in 1943 and are mentioned in [10]. In more detail, on the basis of the hydrodynamic and gas-dynamic analogies, they were studied by Lighthill and Wyzym and independent by Richardson [8], and also further in [5,8,]. In section 6.4, gaps in the transport flow were analyzed, provided that the intensity dependence of the density on the functional $N=N(Q)$.

Waves of a transport stream in conditions of uneven distribution of parameters (transport spread and reaction time). Analyze the state of the traffic flow, taking into account the influence of gaps in the flow, which are the result of an uneven distribution of density. In this case, it is necessary to take into account the dependence of the intensity not only on the density of Q , but also on the distribution of the density Q_x . This condition has already been mentioned above, since in this case the driver's consideration of the road situation is described in front, and this leads to the unevenness of the waves. The assumption that reflects the specified flow quality has the form [8] for intensity. there will be instability of the flow, because the driver does not see the conditions of movement sufficiently far and may not have time to react. Thus, the value of the coefficient of traffic quality or distribution of transport is even more valid. Conclusions Thus, traffic flow through urban highways is described by the motion of waves of velocity, intensity and density, the equation and characteristics of which allow to solve applied problems of traffic management, design of urban highways and street and road networks. In turn, the coefficient of visibility, stability and traffic safety, as a generalized criterion, allows us to assess the quality of existing traffic on streets and roads of different classes.

Key words: intensity, speed, density, waves, density gradients, traffic quality coefficient.

Структура вулично-дорожньої мережі міста визначається його горизонтальною архітектурою, композицією якої є транспортна мережа, а кожна лінія магістралей визначає можливу швидкість руху. Як відомо, суттєвий вплив на функціонування вулично-дорожньої мережі міст має рівень завантаження її транспортними засобами та їх рух. Так, на рівні пропускної спроможності смуги руху у 1500 авт/год транспортний потік займає 30 км шляху і його рух не може бути стійким. Виникають хвилі [1] під впливом яких змінюється щільність транспортного потоку, а зі зміною щільності змінюються швидкість V та інтенсивність N .

Розглянемо, як поширюється транспортний потік по магістралі з урахуванням тільки взаємного впливу рухомих автомобілів в трафіку, тобто визначимо макроскопічне явище на основі мікроскопічного руху одиночних автомобілів.

Врахуємо, що інтенсивність транспортного потоку в загальному випадку не дорівнює нулю, якщо розподіл інтервалів в потоці не дорівнює нулю або розподілені по дорозі автомобілі не знаходяться в стані затору.

Розглянемо рух транспортного потоку у напрямі осі однієї смуги дороги x . Врахуємо, що кількість автомобілів, що перетинають дорогу протягом часу Δt , дорівнює числу автомобілів, розташованих на ділянці дороги на відстані $V\Delta t$, де V – швидкість руху автомобілів. Тоді кількість автомобілів, що рухаються по одиничній ділянці дороги, буде рівна щільності на довжину $V\Delta t$

$$\lambda = QV\Delta t.$$

Інтенсивність транспортного потоку за час Δt дорівнює

$$N = \frac{QV\Delta t}{\Delta t} = QV. \quad (1)$$

Тепер визначимо довжину ділянки дороги $V\Delta t = \Delta x$. Для міських умов її можна прийняти рівною середній довжині вільного пробігу автомобілів без затримок «червоними» сигналами світлофора, $\Delta x = l_{cp}$.

Зміна щільності на цій одиничній ділянці дороги тоді буде

$$\Delta Q = \frac{dQ}{dx} \Delta x = \frac{dQ}{dx} l_{cp}. \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1), одержимо

$$N = l_{cp} V \frac{dQ}{dx},$$

де $\frac{dQ}{dx}$ – визначений в [1], як градієнт щільності (похідна щільності).

Отже, інтенсивність транспортного потоку пропорційна градієнту щільності (зміні щільності в просторі на одиницю довжини дороги).

Розділивши інтенсивність на градієнт щільності, знайдемо

$$\frac{N}{\frac{dQ}{dx}} = l_{cp} V = \beta \quad (\text{км}^2/\text{год}), \quad (3)$$

коефіцієнт, який характеризує «рухомість» автомобілів або нерівномірність їх руху по дорозі. Одночасно він є об'єктивним критерієм кількісної оцінки якості організації дорожньо-

го руху в місті, як похідна середньої дальності вільного пробігу без затримки на середню швидкість потоку. Чим β більше, тим вище якість організації дорожнього руху. Як критерій стійкості дорожнього руху він визначений в [2]. Для визначення коефіцієнта дорожнього руху для кожного класу магістралей та доріг питання тепер полягає у встановленні середньої довжини вільного пробігу без затримок l_{cp} .

Знаючи середню довжину руху автомобіля без затримок і середню швидкість руху автомобілів по магістралі певного класу (швидкісній, безперервній, регульованій), можна легко оцінити якість дорожнього руху. Так, для швидкісної дороги $\beta = 1000-1500 \text{ км}^2/\text{год}$; для магістралі з безперервним рухом $\beta = 800-1200 \text{ км}^2/\text{год}$; для магістралей з регульованим рухом ЕОМ $\beta = 300-600 \text{ км}^2/\text{год}$; з жорстким регулюванням $\beta = 60-120 \text{ км}^2/\text{год}$.

При існуючих засобах організації дорожнього руху в м. Харкові якість дорожнього руху в центральній зоні знаходиться в межах $\beta = 15-30 \text{ км}^2/\text{год}$; в середній зоні $\beta = 60-80 \text{ км}^2/\text{год}$; в периферійній зоні $\beta = 100-120 \text{ км}^2/\text{год}$. Як показують розрахунки, створення АСУ-Д дозволить покращити стан дорожнього руху в центральній зоні в 2,5-3 рази, в середній в 2 рази і в периферійній в 1,5-2 рази [1].

Узагальнений критерій оцінки стабільності руху на різних магістралях міст

Як відомо, суттєвий вплив на функціонування вулично-дорожньої мережі міст має рівень завантаження її транспортними засобами та їх рух. Так, на рівні пропускної спроможності смуги руху у 1500 авт/год транспортний потік займає 30 км шляху і його рух не може бути стійким. Виникають хвилі [1] під впливом яких змінюється щільність транспортного потоку, а зі зміною щільності змінюються швидкість V та інтенсивність N .

Зміна швидкості автомобілів по довжині дороги в будь-який заданий момент часу є $\partial V / \partial x$, у той самий час значення швидкості на ділянці dx дорівнює $(\partial V / \partial x) dx$.

Швидкість зміни інтенсивності по довжині дороги в будь-який заданий момент часу є $\partial N / \partial x$, а на ділянці завдовжки $dx = (\partial N / \partial x) dx$. Ураховуючи, що кількість автомобілів на цій ділянці буде

$$\lambda_L = (J, dx)V, \quad (4)$$

тоді приріст інтенсивності знайдемо як

$$dN_L = \frac{\partial \lambda_L}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (J, dx)V,$$

де: J – інерційне зменшення швидкості в потоці,

λ – кількість потоку.

Оскільки $\partial^2 / \partial x \partial t = \partial^2 / \partial t \partial x$, диференціюємо рівняння (4) за x , тоді

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{JC}{\hat{L}^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad (5)$$

де: C – напруженість руху;

\hat{L} – одинична довжина шляху, км,

одержимо хвильове рівняння для швидкості транспортного потоку, в якому швидкість поширення хвиль збурення визначається співвідношенням [1]

$$c^2 = \frac{\hat{L}^2}{JC}. \quad (6)$$

Аналогічно, диференціюючи (4) за t та за x , одержуємо рівняння хвилі для інтенсивності

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = -\frac{JC}{\hat{L}^2} \frac{\partial^2 N}{\partial t^2} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 N}{\partial t^2}. \quad (7)$$

З цього бачимо, що хвилі інтенсивності поширюються з тією ж самою швидкістю c^2 , яка характеризує здатність вулиць і доріг накопичувати транспортний потенціал.

Одержані хвильові рівняння (5) і (7) мають стандартну математичну форму рівняння плоскої хвилі [5; 6] і є лише одними з сімейства рівнянь, що містять в лівій частині другу похідну по координаті. З цього сімейства для одновимірного випадку використовуємо рівняння Фіка [6], яке при рішенні транспортних задач матиме наступний зміст і вигляд:

перемінні потоку змінюються під впливом нерівномірності поширення щільності: тип – рівняння Фіка (транспортна дифузія)

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial V}{\partial t}; \quad \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial N}{\partial t}, \quad (8)$$

де β – критерій поширення щільності по дорозі зі швидкістю руху трафіка, км²/год.

Хвильові рівняння перемінних потоку: швидкості і інтенсивності

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}; \quad \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 N}{\partial t^2}, \quad (9)$$

де c^2 – швидкість зменшення швидкості (зворотна хвиля).

Рух збуреного транспортного потоку з нерівномірним розподілом щільності по відношенню до рівноважного стану з швидкістю, яка визначається його положенням до стану рівноваги, описується рівнянням типу рівняння Фіка (8), що можна визначити по аналогії з теплопровідністю або електрикою як рівняння «транспортної дифузії». При цьому під «транспортною дифузією» розуміється нерівномірний розподіл щільності під впливом нерівномірної інтенсивності. Тоді даний стан для однорідного транспортного потоку описується простою залежністю

$$\frac{dN}{dt} = -\beta \frac{1}{L} \frac{dN}{dx}, \quad (10)$$

де $\beta = \frac{dH}{dQ}$ – коефіцієнт проїжджаємості;

$\frac{dN}{dx}$ – градієнт інтенсивності, міра зміни інтенсивності в просторі дороги на одиницю її довжини.

Рівняння (10) показує: яка кількість автомобілів проходить через перетин смуги руху за час dt .

Переписавши рівняння (10) для нерівномірної швидкості в

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial V}{\partial t}$$

і для нерівномірної інтенсивності (аналогічно)

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial N}{\partial t},$$

визначимо розмірність постійної β -коефіцієнта проїжджаємості – км²/год, яка указує, що коефіцієнт проїжджаємості або поширення руху можна визначати через швидкість потоку (км/год), помножену на довжину пройденого шляху, або як диференціальну роботу транспортного потоку при зміні його щільності. Отже, коефіцієнтом β можна характеризувати якість дорожнього руху з урахуванням частоти затримок.

Обернені (ударні) хвилі в транспортному потоці

Сильні збурення, що виникають в транспортному потоці в результаті ДТП, заторів, несподіваних змін умов руху, як встановлено, описуються нелінійним диференціальним рівнянням. Крім того, виникають нові особливості, з яких найзначущою є поява зворотних

(ударних) хвиль. У фронті зворотної хвилі транспортний потік зазнає раптових і досить істотних змін швидкості, щільності і інтенсивності [3–9, 11]. Навіть при безперервному русі внаслідок впливу водіїв на процес руху автоматично можуть виникати розриви в потоці або ж наявний розрив в потоці може швидко згладитися в результаті того, що потік автомобілів наздожене попередню групу. Дані обставини істотно пов'язані з нелінійністю рівнянь.

Перші роботи з аналізу ударних хвиль в транспортному потоці виконані Д. Нейманом в 1943 р. і згадуються в [10].

Більш докладно, на основі гідродинамічної і газодинамічної аналогії, вони вивчені Лайтхиллом і Уїземом і незалежно Річадсоном [8], а також далі в [5; 8]. В [6; 4] були проаналізовані розриви, що виникають в транспортному потоці, за умови функціональної залежності інтенсивності від щільності $N=N(Q)$.

Тепер більш детально розглянемо розривне рішення або структуру зворотної хвилі в більш загальному випадку – нерівномірний розподіл щільності.

Припустимо, що 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

$$N = N(Q) - \beta \frac{dQ}{dx}, \quad (11)$$

де β – коефіцієнт поширення руху, що характеризує зниження швидкості із зростанням щільності (наведено вище). Згідно з рівнянням нерозривності безперервне рішення має задовольняти рівняння хвилі щільності

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c(Q) \frac{\partial Q}{\partial x} = \beta \frac{dQ}{dx}, \quad (12)$$

де $c(Q)=N'(Q)$; $Q_x = \frac{\partial Q}{\partial x}$; $Q_{xx} = \frac{d^2 Q}{dx^2}$.

У цьому рівнянні член $c(Q) \cdot Q_x$ приводить до зростання крутизни і перекидання щільності [6; 8], а член βQ_{xx} вводить нерівномірність розподілу щільності, тобто характерні для транспортного потоку закони вірогідності руху

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \beta \frac{dQ}{dx}. \quad (13)$$

Безперервна хвиля приводить до розриву щільності тоді і тільки тоді, коли швидкість розповсюдження збурень c убуває із збільшенням шляху x , тобто потік розсмоктується $c_2 > c_1$.

Описувана цим розривом зворотна хвиля викликає збільшення швидкості з t , отже, під час переходу транспортного потоку через зворотну хвилю його нерівномірність зростає. При цьому зворотна хвиля виникає тільки в одному напрямі, а саме – назустріч руху автомобілів. Все це повністю відповідає реальному руху на дорогах великих категорій.

Оскільки швидкість транспортного потоку визначається залежністю $V(Q)=N(Q)/Q$, швидкість поширення збурення в потоці буде дорівнювати (14) і відповідатиме зміні пропускної спроможності

$$c(Q)=N'(Q)=V(Q)+QV'(Q). \quad (14)$$

Враховуючи, що $V(Q)=V_0(1-Q/Q_m)$ звідки

$$V'(Q) = \frac{dV}{dQ} = -\frac{V_0}{Q_m}, \quad (15)$$

одержимо

$$c(Q) = N'(Q) = \frac{dN}{dQ} = V_0 \left(1 - \frac{2Q}{Q_m}\right). \quad (16)$$

З рівняння (15) видно, що $V'(Q) < 0$, тобто швидкість зворотної хвилі, менше швидкості руху автомобілів, і хвиля поширюється назад по транспортному потоку, попереджаючи водіїв про затримки руху попереду.

Хвилі транспортного потоку в умовах нерівномірного розподілу параметрів (транспортне поширення і час реакції)

Проаналізуємо стан транспортного потоку з урахуванням впливу розривів в потоці, які є результатом нерівномірного розподілу щільності. В цьому випадку необхідно враховувати залежність інтенсивності не тільки від щільності Q , але і від розподілу щільності Q_x .

Про цей стан вже згадувалося вище, оскільки в даному випадку описується врахування водієм дорожньої обстановки попереду, і це приводить до нерівномірності хвиль. Припущення, що відображає вказані якості потоку, має вигляд [8] для інтенсивності

$$N = N(Q) - \beta Q_x. \quad (17)$$

і для швидкості

$$V = V(Q) - \frac{\beta}{Q} Q_x, \quad (18)$$

де β – коефіцієнт поширення.

Врахуємо також наявність тимчасового проміжку між зміною дорожніх умов і реакцією водія й автомобіля. Тому розглянемо V як бажану швидкість, якої прагне водій. Таке поняття вводиться в [1; 2; 8; 11]. Отже, для прискорення можна застосувати формулу [6]

$$V_t + VV_x = -\frac{1}{\tau} \left\{ V(Q) + \frac{\beta}{Q} Q_x \right\}, \quad (19)$$

де τ – час реакції системи «водій-автомобіль в потоці».

Рівняння (6.3) вирішуватимемо спільно з рівнянням збереження щільності $Q_t + (QV)_x = 0$.

Спочатку виконаємо лінеаризацію для малих збурень стану $Q = Q_0$,

$V = V_0 = V(Q_0)$ підстановкою

$$Q = Q_0 + \Theta; \quad V = V_0 + v.$$

і збережемо тільки перші ступені Θ і v , тоді одержимо

$$\Theta(v_t + V_0 v_x) = -(v - V'(Q_0)\Theta) + \frac{\beta}{Q_0} \Theta_x, \quad (20)$$

$$\Theta_t + V_0 \Theta_x + Q_0 v_x = 0.$$

Кінематична хвильова швидкість дорівнює

$$c_0 = QV'(Q_0) + V(Q_0),$$

звідси

$$V'(Q_0) = -(V_0 - c_0) / Q_0. \quad (21)$$

Підставляючи (21) в (20) і виключаючи v , одержимо

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \Theta}{\partial x} = \beta \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} - \tau \left(\frac{\partial}{\partial t} + V_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \Theta. \quad (22)$$

Коли $\beta = 0, \tau = 0$, маємо лінеаризоване наближення до кінетичної хвилі $\Theta = f(x - c_0 t)$. Коефіцієнт β представляє нерівномірність розподілу дорожнього руху по смузі. Розглянемо ефект кінцевого часу реакції. Основний хвильовий рух, описуваний лівою частиною рівняння (6.66), має вигляд $\Theta = f(x - c_0 t)$, тому похідна по t буде

$$\frac{\partial}{\partial t} \cong -c_0 \frac{\partial}{\partial x}. \quad (23)$$

Використовуємо (23) в правій частині (22), тоді

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \Theta}{\partial x} = (\beta - (V_0 - c_0)^2 \tau) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}.$$

Коли

$$\beta > (V_0 - c_0)^2 \tau,$$

має місце комбінована нерівномірність розподілу руху (транспортне поширення). Якщо

$$\beta < (V_0 - c_0)^2 \tau,$$

спостерігатиметься нестійкість потоку, оскільки водій не бачить умови руху достатньо далеко і може не встигнути зреагувати.

Таким чином, значення коефіцієнта якості дорожнього руху або поширення транспорту β ще більше затверджується.

Висновки.

Таким чином, рух транспортного потоку міськими магістралями описується рухом хвиль швидкості, інтенсивності і щільності, рівняння і характеристики яких дозволяють вирішувати прикладні задачі управління дорожнім рухом, проектування міських магістралей і вулично-дорожніх мереж.

В свою чергу коефіцієнт β проїжджаємості, стабільності та безпеки руху, як узагальнений критерій, дозволяє виконувати оцінку якості існуючого дорожнього руху на вулицях і дорогах різного класу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гук В.І. Транспортні потоки: теорія та її застосування в урбаністиці: монографія / Гук В.І., Шкодовський Ю.М. –Харків: Золоті сторінки, 2009. – 232 с.
2. Гук В. Теория измерителей транспортных потоков / Параметры трафика: монография. Palmarium Academic Publishing, 2017. – 162 с.
3. Гаврилов А.А. Моделирование дорожного движения / Гаврилов А.А. – М.: Транспорт, 1980. – 189 с.
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими /Дрю Д.; пер. с англ. под ред. Бусленко Н.П. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
5. Кофман А. Массовое обслуживание: теория и приложения/ Кофман А., Крюон Р.; пер. с франц. – М.: Мир, 1965.– 302 с.
6. Крауфорд Ф. Волны / Крауфорд Ф.; пер. с англ. – М.: Наука, 1974.– 528 с. – (Берклевский курс физики; т.3).
7. Ставничий Ю.А. Транспортные системы городов /Ставничий Ю.А. – М.: Стройиздат, 1990.–224с.
8. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны /Уизем Дж.; пер. с англ.– М.: Мир, 1977. – 622 с.
9. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния /Эйкхофф П.; пер. с англ.– М.: Мир, 1975. –684 с.