

## ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ ТА ЛОГІСТИКА

УДК 656.13

## ПРО КООРДИНОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПОТОКАМИ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ МІСТА

Доктор технічних наук Дмитриченко М.Ф.,  
доктор технічних наук Вікович І.А.,  
Зубачик Р.М.

*Координоване управління транспортними потоками на вулично-дорожній мережі міст є найрозповсюдженим методом управління та основним алгоритмом, що реалізується в рамках автоматизованої системи управління дорожнім рухом (АСУДР). Оптимізація цього режиму для різних дорожніх умов, не втрачає своєї актуальності. Саме тому, проведений аналітичний огляд досліджень координованого світлофорного регулювання на магістралях міста, методів їх розрахунку, процес розпаду груп ТЗ на перегонах під час цих режимів регулювання, та тенденції подальших досліджень.*

*Method of the coordinate control over the traffic flows within the street and road network of the city is one of the most popular in the management process as well as it is the main algorithm, which can be realized within the automated traffic control system (ATCS). The optimization of this mode to the different road conditions is still being carried out. Consequently, the analytical review of the researches in the field of the coordinate traffic light control on the city roads, their quantification procedure and the process of vehicle group separation within these regulatory regimes as well as the tendency of further investigations have been implemented.*

**Вступ.** Автомобільний транспорт, без сумніву, є найзручнішим і найефективнішим видом транспорту. Однак, стрімке зростання чисельності транспортних засобів (ТЗ) призводить до постійного росту інтенсивності дорожнього руху загалом. Для ефективного функціонування цього виду транспорту необхідне оптимальне співвідношення чисельності рухомого складу та мережі автомобільних доріг, тобто відповідність дорожніх умов транспортним потокам (ТП). Вулично-дорожня мережа (ВДМ), як правило, відстає від розвитку рухомого складу, що пояснюється різними витратами.

Це традиційне трактування про невідповідність дорожніх умов транспортним потокам, нами запропоновано замінити такими простими економічними термінами — як попит та пропозиція. Транспортний попит це — рухомий склад, а пропозиція — вулично-дорожня мережа.

Крім того, відставання ВДМ або не збалансованість попиту та пропозиції у транспортній системі, пояснюється ще й тому, що зайнята площа одного автомобіля на проїзній частині під час його руху є набагато більша від його статичних габаритів. Наприклад, елементарні розрахунки показують, що при швидкості руху 40 км/год., динамічний габарит між двома автомобілями становить 34,15 м. При ширині смуги руху 3,75 м площа, яку займає один транспортний засіб дорівнює 128,0 м<sup>2</sup>.

У зв'язку з цим, в умовах не збалансованості попиту та пропозиції, з'являється потреба у пошуку ефективного методу управління транспортними потоками, та впровадження досконаліших засобів і систем управління дорожнім рухом. Для цього, у першу чергу необхідно удосконалення існуючих та розробка нових технологій, зокрема, в аспекті автоматизованого управління транспортними потоками на вулично-дорожній мережі.

Відомо, що найпрогресивнішим та розповсюдженим методом управління транспортними потоками у великих містах є координоване управління на магістралях.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблемі пошуку шляхів удосконалення магістрального методу управління дорожнього руху, зокрема координованому світлофорному регулюванню, присвячені праці багатьох українських та зарубіжних вчених: Гаврилова А. А. [1], Іносе Х. [2], Капітанова В.Г. [3], Кременця В.І. [4], Печерського М.П. [5], Поліщука В. П. [6], Рушевського П.В. [7], Самойлова Д.С. [8], Фішельсона М.С. [9], Четверухіна Б.М. [10, 11, 12] та ін.

**Постановка проблеми.** Оптимізація координованого режиму регулювання дорожнього руху для різних дорожніх умов, залишається актуальною і сьогодні. Відповідно до цього, нами проводиться аналітичний огляд досліджень з даного методу управління, а саме: аналізу координованого світлофорного регулювання на магістралях міста, методів їх розрахунку, процесу розпаду груп ТЗ на перегонах під час цих режимів регулювання, та тенденції подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** Зазвичай координованим управлінням називають узгоджену роботу ряду світлофорних об'єктів між якими встановлюється взаємозв'язок, що забезпечує включення зелених сигналів в момент підходу впорядкованих груп, які рухаються з визначеною швидкістю [7]. Таку роботу світлофорних об'єктів ще називають як спосіб управління «зелена хвиля». Сьогодні він широко застосовується майже в усіх великих містах і є основним алгоритмом, що реалізовується в рамках автоматизованої системи управління дорожнім рухом (АСУДР).

Ідея координованого світлофорного регулювання рухом передбачає і примушує водіїв додержуватись, відповідного, рекомендованого значення швидкості руху на ВДМ. У протилежному випадку, при недодержанні рекомендованої швидкості руху, ця система управління примушує водія збільшувати кількість зупинок та витратити набагато більше часу під час руху на ВДМ міста.

Для організації координованого управління (*координації*) потрібне виконання таких умов[4]:

- 1) наявність не менше двох смуг для руху в кожному напрямі;
- 2) однаковий або кратний цикл регулювання на усіх перехрестях, що входять в систему *координації*;
- 3) транзитність потоку має бути не менше — 70 %;
- 4) відстань між сусідніми перехрестями не повинна перевищувати 800 м.

При не виконанні першої умови підвищується ймовірність затримки в дорозі, оскільки, ускладнюється об'їзд можливих перешкод на дорозі, відповідно, порушується проїзд з розрахунковою швидкістю, що призводить до порушення процесу координованого управління. Однаковий або кратний цикл — забезпечує періодичність зміни сигналів.

Умова транзитності — це переважання потоків прямого напрямку на даній магістралі, оскільки інтенсивні поворотні потоки з магістралі і на неї погіршують ефективність *координації*.

Процес розпадання групи ТЗ у транспортному потоці, який утворюється при роз'їзді черги, впливає на вибір довжини перегону. На вході перегону, безпосередньо за перехрестям, інтенсивність такої групи близька до потоку насичення. У процесі подальшого руху групи починається її розпад із-за різних швидкостей транспортних засобів, що становлять цю групу. Розкид їх швидкостей зумовлений різновидністю складу транспортного потоку, а також характером індивідуальних особливостей водіїв. Процес розпаду групи ТЗ відбувається за експоненціальним законом [1].

У [7] відзначено, що стійкість такої групи залежить від часу руху, і критичний час розпаду (*дифузії*) потоку дорівнює або більший за тривалість циклу світлофора:

$$D \geq T_{\text{ц}} \quad (1)$$

де  $D$  — дифузія транспортного потоку;

$T_{\text{ц}}$  — тривалість циклу.

При відстанях 100-150 м від перехрестя появи дифузії транспортного потоку не спостерігається. За проміжок часу менше тривалості циклу світлофора потік ще не порушує свою макроскопічну структуру, він ще асимптотично стабільний. Проте, такий розрахунок є загальним і не зовсім коректним, оскільки при тривалості циклу наприклад 70-100 с, група ТЗ розпадається на відстані 1000-1200 м, хоча вона розпадається набагато швидше, що підтвердиться далі.

Над процесом перетворення характеристик транспортного потоку на перегоні вулиці при координованому режимі В. Т. Капітановим проведено значну кількість експериментальних досліджень на основі яких запропонована емпірична формула [3; 4; 5]:

$$t_x = t_r e^{0,008cx}, \quad (2)$$

де  $t_x$  — часова довжина групи автомобілів на відстані  $x$  від «живлячого» перехрестя, с;

$t_r$  — часова довжина групи безпосередньо за «живлячим» перехрестям, с;

$t_d$  — час руху групи від «живлячого» перехрестя до перерізу  $x$  на перегоні магістралі, с.

Так наприклад за цією формулою визначено, що на відстані 600 м від перехрестя довжина групи у часі та просторі збільшується більш ніж у 2 рази, а при довжині перегону 800 м., спостерігається повний розпад групи. Однак, ці дослідження в основному базуються, на обробленні експериментальних даних спостереження змін характеру розподілу у часі (чи у просторі) інтенсивності руху в групах. Тому, цей підхід не дозволяє робити узагальнення щодо отриманих висновків для інших перехресть.

Закономірності формування та «розпаду» груп ТЗ на регульованих перехрестях в [1] описано дифузною моделлю. Ця модель базується на тому, що розпад групи зумовлений нестаціонарним характером руху групи та впливом випадкових чинників на режим руху ТЗ. Основною метою побудови дифузної моделі є визначення мінімального інтервалу ( $\Delta t$ ) між групами ТЗ в межах перегону. Очевидно, що чим більша величина  $\Delta t$ , то тим вища ефективність вказаного методу.

Критична довжина перегонів при яких управління потоками методом «зелена хвиля» є неефективним визначається за допомогою нерівності:

$$\Delta t N <= 1, \quad (3)$$

де  $\Delta t$  — часовий інтервал між групами;

$N$  — інтенсивність потоку.

Отже, якщо на перегоні зникають компактні групи ТЗ та часовий інтервал між групами перевищує середній інтервал між автомобілями у групі, то ефект від *координації* втрачається.

Слабкою стороною запропонованої моделі є по-перше те, що надходження ТЗ до входу перегону відбувається за періодичною функцією, а тоді вже авторами аналізується процес розпаду груп на перегоні. Разом з тим, із розгляду виключають вхідні поворотні потоки із конфлікуючих напрямків, які можуть заповняти собою проміжок між групами, що розпадаються на основному напрямку.

По-друге, визначення критичної довжини перегону залежить від показника інтенсивності руху, яка є змінною величиною, навіть, впродовж тривалості одного циклу світлофорного регулювання (СФР). Тобто, при одній інтенсивності руху визначена критична довжина може бути прийнятною, тоді як при збільшенні об'єму руху — вона може бути непринятною.

Спробу аналітично описати процес розпаду груп ТЗ на перегоні та визначити критичну відстань на якій режим координованого управління працює неефективно здійснено групою дослідників під керівництвом проф. Б. М. Четверухіна [11, 12]. Умовне графічне представлення отриманих результатів зображено на рис. 1.

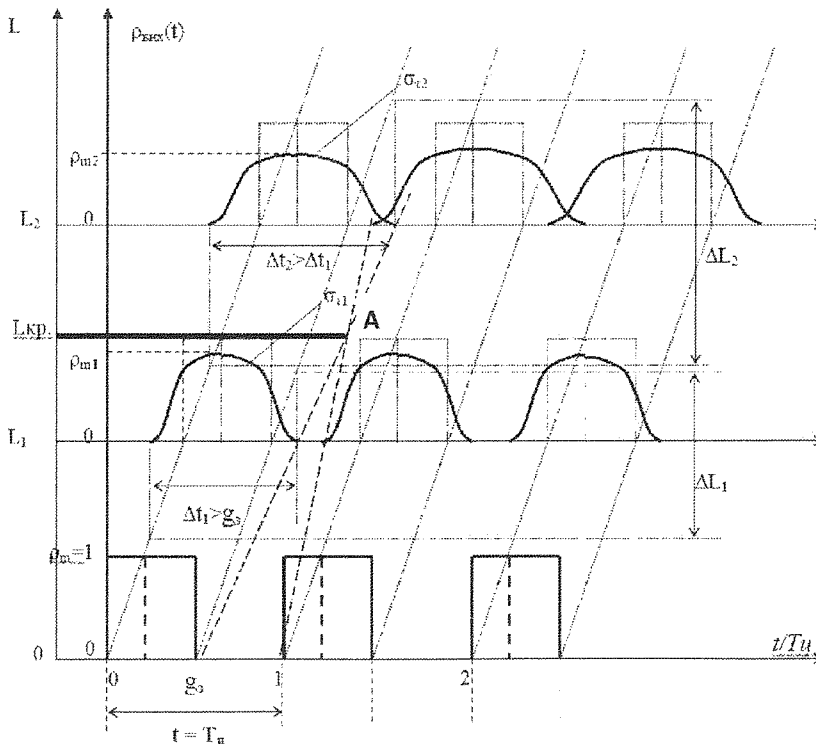


Рис. 1. Процес розпаду групи ТЗ на виході з регульованого перехрестя із збільшенням відстані від цього перехрестя

При певних значеннях довжини перегону і коефіцієнта розпаду групи (визначено експериментально) відбувається злиття груп ТЗ, що є обмеженням на критичну довжину перегонів у режимі *координації*. Тобто, коли перший транспортний засіб наступної групи (другої) наздожене останній транспортний засіб попередньої групи, режим *координації* стає недоцільним. А власне точка перетину (Рис.1, точка А) двох груп (першої і наступної), що зливаються на перегоні і визначає критичну відстань  $L_{кр}$ .

Слід також додати, що розрахунок критичної довжини перегону здійснювався при швидкості  $V_k = 10$  м/с. Недоліком даної моделі є те, що розрахунок розпаду груп на перегоні здійснювався формуванням серії груп прямокутної форми (прямокутним імпульсом інтенсивності), що на практиці не завжди має місце.

Щодо критичної відстані на перегоні при режимі координації існують і інші твердження [13]. У Німеччині, при реалізації проектів світлофорного регулювання режиму «зелена хвиля» користуються допоміжним графічним засобом номограмою «час — шлях» «зеленої хвилі», яка зображена на рис. 2.

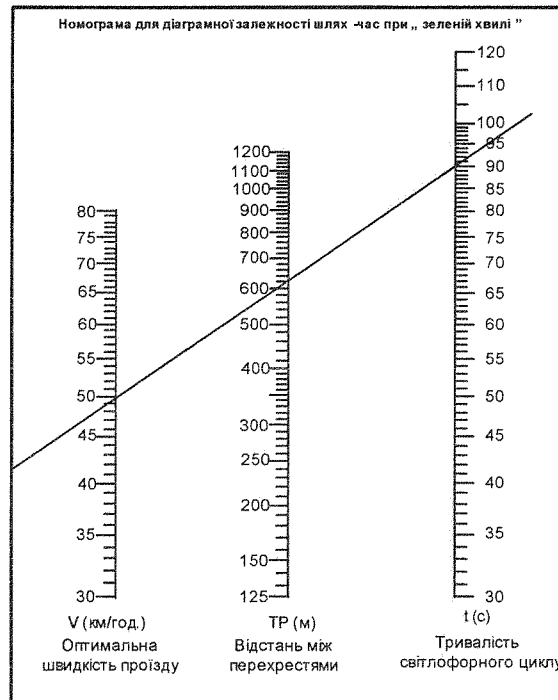


Рис. 2. Номограма до діаграми шлях-час «зеленої хвилі»  
(Джерело: Winfried Humberg, Gevas Humberg & Partner /4/)

За допомогою цієї номограми можна, наприклад, визначити, що при тривалості робочого циклу 90 с і середній відстані між перехрестями 625 м, та при швидкості 50 км/год., «зелена хвиля» працює найоптимальніше. Проте, у [13] немає аналітичного обґрунтування щодо оптимальності цих значень.

Перші системи управління дорожнім рухом появились на магістральних вулицях міст. При появі на магістральних вулицях координованого світлофорного регулювання змінилась структура транспортних потоків, де рух ТЗ набирає «пачкоподібну» форму з певною щільністю і швидкістю руху та протікає ритмічніше [2, 7].

Усі системи координованого управління поділяють на два основні види: 1) *синхронні* та 2) *прогресивні* [7, 8, 10]. При *синхронній* системі координованого регулювання (синхронна координація) зміна сигналів світлофора на усіх перехрестях відбувається одночасно. Ці системи у свою чергу поділяються на:

- синхронні системи з одночасною подачею однойменних сигналів світлофора однакової тривалості (*синфазний режим*);
- синхронні системи з одночасною подачею різнойменних сигналів світлофора однакової тривалості (*протифазний режим*).

У таких режимах на усіх світлофорах, що включені в систему *координації* тривалість циклів є однаковою.

*Синфазний* режим застосовується тільки при порівняно рівних відстанях між світлофорними об'єктами і при умові, що час, необхідний для проїзду від перехрестя до перехрестя з постійною швидкістю, що дорівнює циклу світлофора [7]. *Противофазний* режим застосовується тоді, коли час руху між перехрестями відрізняється від часу кратного циклу на величину половини циклу.

Ці режими координації застосовують у тих випадках, коли час проїзду зустрічних потоків від перехрестя до перехрестя є однаковим і точки зустрічі знаходяться на перехресті. Проте, в реальних умовах на ВДМ міст застосування таких систем є практично у поодиноких випадках. Також, недоліком синхронних систем є те, що при різній інтенсивності руху ТЗ на перехрестях пропускна здатність використовується неефективно.

*Прогресивні* системи координації за принципом роботи поділяються на:

- системи, що працюють з постійними циклами;
- системи, що працюють із змінними циклами.

Прогресивну систему, як функцію швидкості руху можна поділити на системи з постійною швидкістю та із змінною швидкістю руху. Різновидністю систем *координації* є система з примусовою швидкістю руху «система супроводжуючих вознів». Принцип її полягає в тому, що на перегонах вулиці встановлюють проміжні світлофори, які включаються послідовно залежно від розрахункової швидкості, тобто ТЗ, які перевищуватимуть рекомендовану швидкість будуть зупинені.

Недоліком усіх систем координації є фіксована величина циклу і тривалість фаз, що часто призводить до ненасичених «холостих» частин фаз світлофора.

Перейдемо до розгляду методів розрахунку програм координації. Для цього використовують різні методи, проте найпоширенішим тривалий час був графоаналітичний метод. Суть його полягає у побудові графіка шлях — час, який виконують у системі прямокутних координат. Масштаб залежить від довжини магістралі і числа світлофорних об'єктів [4].

На сьогодні при повсюдному впровадженні АСУДР, що передбачають використання великого числа програм координації, графоаналітичний метод став малоефективним через їх високу трудомісткість. Окрім цього, основою даного методу є максимізація ширини *стрічки часу* (стрічка руху без зупинки). При цьому ігноруються розкид швидкостей у транспортному потоці та трансформація груп ТЗ, що рухаються на перегоні.

Починаючи з 60-х років минулого століття розрахунок програм координації здійснювався за допомогою ЕОМ. Застосування ЕОМ дозволило проводити розрахунки якісніше з урахуванням великого числа чинників, які формують транспортний потік.

До числа найпоширеніших методів розрахунку координованого управління за допомогою ПК, які реалізуються в рамках АСУДР відносять: СІГРІД, СІГОП, комбінаційний метод і ТРАНЗИТ [1]. Раніше ніж перейти до безпосереднього їх розгляду, потрібно відзначити, що ці методи були досить ефективними в 80-х роках минулого століття, однак на думку авторів варто переглянути їх функціональні можливості.

Метод СІГРІД призначений для побудови зсувів фаз на основі сумарної непродуктивної затримки на перехресті при фіксованій тривалості фаз. До недоліків цього методу відносять те, що він не мінімізує сумарну затримку ТЗ на мережі доріг, а також здійснює істотну помилку у визначенні зсувів фаз, оскільки базується на спрощеній моделі ТП, яка не враховує дифузії груп ТЗ.

Метод СІГОП, дозволяє разом із оптимізацією зсувів фаз розраховувати і тривалість фаз на основі інформації про транспортні потоки та організації руху на перехресті. Головним недоліком методу СІГОП є велике число вихідних даних. Другий недолік даної системи полягає в тому, що припущення, які зроблені в ньому для спрощення розрахунків не завжди реалістичні. Наприклад, розрахунок тривалості фаз здійснюється з середньої інтенсивності руху, без врахування кількості смуг тощо. Також, ця програма дає дуже грубу оцінку щодо непродуктивної транспортної затримки і числа ТЗ, які зупинились.

Комбінаційний метод ґрунтується на аналізі дорожньої мережі за допомогою теорії графів. Він дає можливість мінімізувати затримку ТЗ біля перехрестя та число зупинок автомобілів.

Метод ТРАНЗИТ, у функціональному відношенні являється найповнішим. Він базується на детермінованій моделі ТП та дозволяє не тільки оптимізувати зсуви фаз але й визначити оптимальні значення

тривалості фаз за критеріями величини непродуктивна затримка і кількість зупинок ТЗ. Також було встановлено, що метод ТРАНЗИТ дає точніші прогнози затримки автомобілів на мережі чим комбінаційний метод. Недоліком програми ТРАНЗИТ є великі затрати машинного часу. Сучасна версія ТРАНЗИТ дозволяє прогнозувати параметри групи автомобілів у процесі їх руху по магістралі при заданих режимах світлофорного регулювання. Особливістю останніх версій програми ТРАНЗИТ є можливість її використання не лише для розрахунку планів координації, але і для моделювання дорожнього руху по мережі міських вулиць з досить високою точністю. Результати моделювання дозволяють отримати кількісну і якісну оцінку різних методів організації дорожнього руху (ОДР). Проте, недоліком усіх таких систем є те, що вони практично не формують ТП, а лише мінімізують на перехрестях непродуктивну транспортну затримку, тай остання базується на модифікованій аналітичній залежності Вебстера. Отже, загалом не має нового підходу до вирішення питання ОДР.

**Висновки та перспективи подальших досліджень:** Координоване регулювання на магістралях міста підвищує пропускну здатність транспортних вузлів, оскільки не затрачається час на розгін ТП на проміжних перехрестях, підвищується швидкість руху усіх ТЗ та стає рівномірнішою, а також знижується час проїзду від початкового до кінцевого пункту магістралі. Даний режим значно підвищує ефективність транспортного процесу на ВДМ міст та є основним алгоритмом, що реалізується у сучасних АСУДР.

Нами розглянуто умови руху при яких доцільно застосовувати координоване управління дорожнім рухом на ВДМ міст. Здійснено аналіз над класифікацією систем координації та методів розрахунку програм координації. Проаналізовано існуючі дослідження над закономірностями «розпаду» груп ТЗ при вході на перегін магістралі міста. Вважається, що одним із недоліків координації є те, що її ефективність визначається після впровадження цієї системи.

Проведений аналіз досліджень щодо координованого управління дорожнім рухом, дозволяє сформулювати подальші дослідження: по-перше, в напрямку закономірності формування та «розпаду» груп ТЗ на перегоні магістралі та визначення критичної відстані між суміжними перехрестями, оскільки на сьогодні її в основному визначають інженерно-інтуїтивними методами на основі вивчення досягнень практики; по-друге, пошук методів оцінки ефективності координованого регулювання, оскільки існуючі, як правило, базуються на принципі «до» і «після» координації; по-третє, розроблення нових гнучких технологій координованого світлофорного регулювання на ВДМ міст.

## Література

1. *Гаврилов А. А.* Моделирование дорожного движения // М.: Транспорт, 1980. — 189 с.
2. *Иносэ Х., Хамада Т.* Управление дорожнім движением // Под ред. М.Я. Бликина; Пер. с англ. — М.: Транспорт, 1983. — 248 с.
3. *Капитанов В.Т., Хилажев Е.Б.* Управление транспортными потоками в городах. — М.: Транспорт, 1985. — 144 с.
4. *Кременец Ю.А.* Технические средства организации дорожного движения. — М.: Транспорт, 1990. — 255 с.
5. *Печерский М.П., Хорович Б.Г.* Автоматизированные системы управления движением в городах. — М.: Транспорт, 1979. — 176 с.
6. *Полицук В.П.* Проектирование автоматизированных систем управления на автомобильных дорогах. — К.: УМК ВО, 1990. — 55 с.
7. *Рушевський П. В.* Организация и регулирование уличного движения с применением автоматических средств управления // М., 1974.
8. *Самойлов Д. С.* Организация и безопасность городского движения // М.: Высшая школа, 1981.
9. *Фишельсон М. С.* Городские пути сообщения. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1980. — 292 с.
10. *Четверухин Б.М.* Технические средства регулирования дорожного движения. — К.: КАДИ, 1978. — 87 с.
11. *Четверухин Б. М., Душник В. Ф., Дерех З. Д.* Математична модель руху груп автомобілів, сформованих світлофорною сигналізацією на регульованому перехресті // Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний вісник. — 2002. — № 2. — С. 81-93.
12. *Четверухин Б. М., Душник В. Ф., Полозенко П. М.* Аналіз процесу розпаду груп транспортних засобів, сформованих світлофорним об'єктом, на перегонах магістралі // Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний вісник. — 2005. — № 1-2. — С. 162-166.
13. *Христоф Долль, Герхард Лістль, (Gevas Humberg & Partner.* Інженерне бюро з проектування, організації руху транспорту і технічних засобів регулювання) Німецький досвід запровадження системи пріоритетного руху трамваїв і автобусів на регульованих перехрестях за методом «зеленої хвилі» // Автошляховик України. Науково-виробничий журнал. — 2006. — № 6 (194). — С. 19-22.