

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. М. Ребедайло

КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ ВЗАЄМОДІЇ ШИНИ З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2013

УДК 629.3.027+625.032.86

ББК 39.33.34

Б61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 5 від 27 грудня 2012 р.)

Рецензенти:

В. П. Сахно, доктор технічних наук, професор

В. Ф. Анісімов, доктор технічних наук, професор

І. О. Сивак, доктор технічних наук, професор

Біліченко, В. В.

Б61 Ключові аспекти взаємодії шини з опорною поверхнею : монографія / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. М. Ребедаило. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 128 с.

ISBN 978-966-641-548-9

В монографії розглядаються питання впливу параметрів шини, кутів встановлення керованих коліс на роботу сил тертя в плямі її контакту з опорною поверхнею, та на тягово-швидкісні властивості і паливну економічність автомобіля. Запропоновано новий підхід в розробленні математичної моделі для визначення роботи сили тертя в контакті шини з опорною поверхнею, визначено фактори, що найсуттєвіше впливають на роботу цієї сили. Визначено оптимальні значення кутів встановлення керованих коліс, що відповідають мінімальній роботі тертя, максимальному вибігу і мінімальній витраті пального автомобілем.

УДК 629.3.027+625.032.86

ББК 39.33.34

ISBN 978-966-641-548-9

© В. Біліченко, О. Добровольський, В. Ребедаило, 2013

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В ПЛЯМІ КОНТАКТУ ШИНИ З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ	8
1.1. Існуючі моделі, які застосовуються для опису взаємодії шини з дорогою	8
1.2 Вплив режиму кочення колеса на проковзування в контакті з дорогою	17
1.3 Аналіз моделей, що враховують роботу сили тертя в зоні контакту	19
1.4 Вплив опору руху на вибіг автомобіля.....	22
1.5 Методи і засоби для дослідження процесів, що відбуваються у контакті шини з дорогою	24
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЩО ОПИСУЮТЬ ПРОЦЕСИ У КОНТАКТІ ШИНИ З ДОРОГОЮ	33
2.1 Опис взаємодії шини з опорною поверхнею	33
2.2 Математична модель шини для визначення зусиль і проковзувань у контакті з дорогою.....	34
2.3 Визначення розподілу нормальних контактних зусиль з урахуванням жорсткості брекера	40
2.4 Результати теоретичних досліджень впливу експлуатаційних та конструктивних факторів на роботу тертя в контакті шини з опорною поверхнею.....	47
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	56
3.1 Мета та задачі експерименту	56
3.1.1 Вибір факторів при проведенні експерименту	56
3.1.2 Вимоги до шин при проведенні експериментальних досліджень	57
3.1.3 Вимоги до конструкції автомобіля, засобів вимірювань та випробувань.....	57
3.2 Об'єкт експериментального дослідження.....	58
3.3 Обладнання для визначення сил та проковзувань в контакті шини.....	59

3.4	Планування експерименту для визначення роботи сили тертя в контактi шини з опорною поверхнею.....	69
3.4.1	Складання робочого плану експерименту	72
3.4.2	Вплив конструктивних параметрів шини та експлуатаційних факторів на роботу тертя в плямі контакту з опорною поверхнею.....	73
3.4.3	Вплив кутів встановлення керованих коліс на роботу тертя.....	75
3.5	Вплив величини внутрішнього тиску повітря на роботу тертя в контактi шини з дорогою	87
3.6	Обробка результатів експерименту	89
3.6.1	Розрахунок коефіцієнтів регресії	89
3.6.2	Перевірка рівноточності дисперсії.....	90
3.6.3	Перевірка коефіцієнтів регресії.....	91
3.6.4	Перевірка рівняння регресії на адекватність	92
3.7	Залежність роботи тертя від кутів встановлення керованих коліс	93
3.8	Розрахунок похибки експерименту.....	94
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ		
4.1	Структурна ідентифікація вхідних параметрів.....	95
4.2	Параметрична ідентифікація моделі	100
4.3	Проведення дорожніх випробувань	105
4.4	Визначення вибігу та паливної характеристики автомобіля в залежності від кутів встановлення керованих коліс	107
ВИСНОВКИ		111
ЛІТЕРАТУРА.....		113

ВСТУП

Розвиток теорії автомобіля на сучасному етапі характеризується системним підходом до вивчення окремих особливостей експлуатаційних властивостей, оптимізацією показників експлуатаційних і технічних параметрів. Автомобіль є частиною системи «водій–автомобіль–дорожнє середовище», і його властивості виявляються у взаємодії з елементами цієї системи. Отже, системність при оцінюванні якості чи ефективності застосування автомобіля залежить від умов, у яких ця властивість виявляється.

Тягово-швидкісні властивості, паливна економічність, керуваність і стійкість формуються конструкцією та характеристикою практично всіх вузлів й агрегатів автомобіля, а також умовами його експлуатації. Одними з найважливіших елементів, що визначають ці властивості, безумовно, є автомобільні пневматичні шини, розвиток конструкції яких безпосередньо пов'язаний з удосконалюванням конструкції автомобілів і здійсненням змін у напрямку найбільш повної відповідності характеристик шин характеристикам та умовам роботи автотранспортних засобів (АТЗ).

До шин є низка суперечливих вимог. Наприклад, для забезпечення надійного зчеплення з сухим асфальтовим покриттям необхідно мати протектор без рисунка, тобто рівний, але такий рисунок створить проблему стійкості на мокрій дорозі, оскільки шина не зможе виводити воду з плями контакту з дорогою; для зниження витрат палива необхідно шину робити більш жорсткою, але для забезпечення плавності ходу вона повинна бути еластичною. Намагаючись досягти вищевказаних вимог шиновиробники змушені йти на компроміс, бо при покращанні одного показника можна погіршити інші.

Основні тенденції в сучасному шинобудуванні можна звести до таких: зниження маси шини та колеса; створення нових типів рисунків протектора; вдосконалення гумових сумішей; пошук нових матеріалів для виробництва шин. Крім того, лише шини були й залишаються відповідальними за передачу зусиль від автомобіля на дорогу (і навпаки, від дороги на автомобіль), а, отже, за безпеку руху, його динаміку та задоволення від їзди, тобто за комфорт. Отже, шина є не допоміжним, а інтегрованим конструктивним елементом. Це означає, що невідповідні шини (навіть достатньої якості) можуть негативно вплинути на

високі ходові характеристики автомобіля. Тому при розробці конструкції автомобільної шини задаються не тільки оптимальні напруження в її матеріалі, але й силова взаємодія колеса з поверхнею кочення, розподіл тисків в області контакту, величина деформації, співвідношення між величинами дотичних і нормальних сил, величина енергетичних втрат.

Визначення енергетичних втрат під час руху автомобіля досліджується у великій кількості робіт. Назвемо тільки основні з них. Це роботи Ю. І. Неймарка і Н. А. Фуфаєва, Г. Б. Безбородової, М. Ф. Кошарного, О. М. Ларіна, А. М. Юрченка, М. Я. Говоруценка, В. А. Богомолова, І. П. Курнікова, В. А. Макарова, Р. В. Ротенберга, Л. Л. Гінцбурга, Б. М. Бідермана, А. С. Литвінова, Е. А. Чудакова, В. А. Іларіонова, Я. М. Певзнера.

Проте на сьогодні це питання не можна вважати цілком вирішеним. Аналіз робіт з тематики дослідження свідчить про складність і нерозв'язаність такої проблеми, як вплив кутів встановлення керованих коліс на опір руху і, відповідно, на роботу тертя в плямі контакту шини з опорною поверхнею, тягово-швидкісні властивості та паливну економічність автомобіля.

У зв'язку з цим в монографії розглядається процес взаємодії шини з опорною поверхнею для визначення енергетичних втрат на кочення коліс автомобіля на основі математичного моделювання (в основу монографії покладено опубліковані авторські роботи).

При цьому були вирішенні такі завдання:

- проведено аналіз існуючих експериментальних та теоретичних досліджень для визначення енергетичних втрат на кочення коліс автомобіля;

- розроблено математичні моделі процесу взаємодії шини з опорною поверхнею для визначення енергетичних втрат на кочення коліс автомобіля;

- проведено дослідження роботи сили тертя, за допомогою розробленої математичної моделі, та визначення її впливу на величину коефіцієнта опору кочення, вибіг автомобіля, витрату пального;

- розроблено й виготовлено апаратуру, що забезпечила проведення експериментальних досліджень з вивчення впливу навантаження на колесо, швидкості й режиму руху, внутрішнього тиску повітря,

кутів устанавлення керованих коліс на величину сил тертя та коефіцієнта опору кочення, розподіл роботи тертя по доріжках протектора, вибіг автомобіля і витрату палива;

– наведено порівняльний аналіз результатів дослідження, отриманих експериментальним і теоретичним методами, за вибігом автомобіля і витратою палива при різних кутах встановлення керованих коліс та внутрішнього тиску повітря в шинах;

– запропоновано рекомендації щодо підвищення експлуатаційних властивостей автомобіля за рахунок зменшення роботи сил тертя в плямі контакту шин з опорною поверхнею.

Основні в тій чи в іншій мірі новітні положення монографії полягають у такому:

– запропоновано новий підхід в розробленні математичної моделі для визначення роботи сили тертя в контакті шини з опорною поверхнею та визначені фактори, що найсуттєвіше впливають на роботу цієї сили;

– визначено оптимальні значення кутів устанавлення керованих коліс, що відповідають мінімальній роботі тертя, максимальному вибігу і мінімальній витраті пального автомобілем;

– набуло подальшого розвитку дослідження основних залежностей стану шини при стаціонарному коченні за допомогою розроблених математичних моделей.

Основні положення монографії розвивають теоретичні основи та методологічні підходи до визначення роботи сили тертя в контакті шини з опорною поверхнею та визначення факторів, що найбільш суттєво впливають на роботу цієї сили.

Створена математична модель, методика та програми розрахунків дозволяють за результатами дослідження енергетичних втрат в шині визначити тягово-швидкісні властивості та паливну економічність й рекомендувати такі параметри шин і автомобіля, за яких ці показники будуть оптимальними.

Реалізація зазначених підходів, рекомендацій та висновків дослідження на практиці дозволяє покращати експлуатаційні властивості автомобіля за рахунок оптимізації параметрів взаємодії автомобільного колеса з опорною поверхнею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В ПЛЯМІ КОНТАКТУ ШИНИ З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Незважаючи на численні роботи з вивчення взаємодії рухомого колеса з опорною поверхнею, відомо лише невелике число публікацій, у яких досліджуються загальні питання теорії кочення деформованого колеса. При цьому спостерігається своєрідна спеціалізація: деякі дослідники розглядають кочення колеса з урахуванням сил, що діють тільки в його серединній площині, інші – тільки під дією бічних сил, треті вивчають стаціонарний рух, четверті – нестаціонарний, переносючи на нього результати, отримані у стаціонарному випадку, без оцінки меж придатності подібної процедури.

У результаті, при вивченні кочення колеса не тільки відсутній єдиний підхід, але й в низці випадків отримуються і суперечливі результати, а численні експериментальні роботи настільки різнохарактерні, що в них важко знайти навіть загальну основу.

1.1 Існуючі моделі, які застосовуються для опису взаємодії шини з дорогою

Теорія кочення розглядає область механіки, у якій визначаються сили, що діють на рухоме колесо, яке деформується в області контакту з недеформованою опорною поверхнею. Виявляються залежності цих сил від фазових переміщень, тобто координат, що характеризують положення колеса, і їх похідних за часом, а також відшукуються рівняння кінематичних зв'язків при коченні.

У теорії кочення розглядаються два напрямки. Перший – стаціонарне кочення, що супроводжується рівномірним і прямолінійним переміщенням центра колеса при постійній орієнтації його диска у просторі і незмінній реакції в області контакту, і другий – нестаціонарне кочення, при якому прямовання диска колеса може бути довільним, а реакція змінюється у часі.

Питання стаціонарного кочення розглядаються у великій кількості публікацій. Особливий інтерес представляють роботи О. Ю. Ішлинського [1], В. І. Кнороза [2], О. С. Литвінова [3], О. М. Ларіна [4],

О. М. Мухіна [5], Є. О. Чудакова [6], Є. Фіали [7], М. Фромма [8], Р. Хадекела [9] та ін.

В області нестационарного кочення всі результати можна підрозділити на дві групи. До першої відносять дуже нечисленні дослідження, що стосуються формулювання визначальних рівнянь теорії нестационарного кочення і встановлюють зв'язок між реакцією в області контакту колеса з опорною поверхнею та фазовими змінними абсолютно твердого диска.

У більшості випадків у цих роботах наведено також основи теорії щодо розв'язання складних задач динаміки. До таких робіт слід віднести публікації М. В. Келдиша [10], Ю. І. Неймарка [11], І. Рокара [12], Б. Шліппе, Р. Дітріха [13], Ж. Грейдануса [14], Р. Смайлі [15], Л. Сігела [16], Г. Пасежки [17] та ін.

До другої групи відносять численні роботи, в яких вивчається, в основному, динаміка конкретних систем із використанням тієї чи іншої теорії кочення. Особливу увагу слід звернути на роботи Н. Є. Жуковського [18], К. С. Колеснікова [19], Я. М. Певзнера [20], Л. А. Хачатурова [21]. У деяких із цих робіт є положення, що значно вплинули на розвиток теорії нестационарного кочення і результати визначення параметрів взаємодії колеса з опорною поверхнею.

У роботах першої групи слід виділити два підходи – феноменологічний і модельний. Феноменологічний підхід ґрунтується на сукупності дослідних фактів і гіпотез, що встановлюють зв'язок між константами і змінними у теоретичних дослідженнях. Внутрішня структура шини, яка деформується, і детальний характер взаємодії її елементів під час руху колеса по опорній поверхні в них не розглядаються.

Модельний підхід характеризується розглядом колеса з конкретним уявленням еластичної периферії, яка деформується, у вигляді сукупності елементів у формі пружин або стрижнів і оболонки під тиском повітря.

Шину як оболонку розрахувати було б нескладно, однак у випадку нестационарного кочення ця задача суттєво ускладнюється. Описана конструкція деформівної периферії припускає математичний опис у формі сукупності диференціальних операторів, які можна розглядати як математичну модель деформованого колеса.

Для колеса з пневматичною шиною на результат складання визначальних рівнянь у теорії кочення впливають такі особливості шини: вона є оболонкою змінної товщини, неоднорідною, конструктивно

анізотропною через різноманітне розташування ниток корду і прошарків каркаса. При цьому варто враховувати, що оболонка не є тонкою та на неї суттєво впливають тиск, внутрішнє тертя, температурні фактори і значні деформації.

Задача визначення реакції в області контакту з урахуванням усіх зазначених особливостей у нестационарному режимі кочення є надзвичайно складною. Як відомо, навіть випадок статичного навантаження колеса вертикальною силою, з урахуванням усіх названих чинників, потребує спеціальних методів розрахунку.

З іншого боку, особливості процесу кочення деформівного колеса можуть бути виявлені на дуже простій моделі з деформівною периферією, до якої можуть бути приведені різноманітні шини й колеса. Ця модель, у першу чергу, повинна враховувати те, що периферія колеса деформується в кожній її точці. У більш досконалих варіантах моделей необхідно враховувати деформації у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, а також розміри області контакту колеса з опорною поверхнею.

При вивченні процесу кочення колеса необхідно брати до уваги існування зон зчеплення і ковзання в області контакту. Елемент периферії при контакті з опорною поверхнею у зоні зчеплення залишається нерухомим до того моменту, поки в результаті повороту колеса під дією сил цей елемент не вийде із зони зчеплення.

Таким чином, множина реальних систем описується тими самими за структурою рівняннями з константами, що залежать від більш широкої сукупності властивостей матеріалів. Зокрема, з роботи [22] випливає, що анізотропне тіло в теорії пружності може бути описано нескінченним числом стрижневих моделей.

Для модельного підходу характерне скрупульозне відстежування механізму взаємодії точок периферії колеса в області контакту з опорною поверхнею і глибше дослідження процесу кочення. Це дає можливість не вводити різноманітні гіпотези, або застосовувати їх набагато менше, оскільки модель підпорядковується відомим законам механіки.

Прикладом модельного підходу у стаціонарному випадку є робота О. Ю. Ішлинського [23], у якій основа шини з пружними властивостями представляється у вигляді сукупності стрижнів (пружин), що враховують проковзування в області контакту. У цій роботі рівняння теорії нестационарного кочення будуються із застосуванням моделі периферії шини у вигляді набору стрижнів і ниток. У роботі [24] була використана також і гіпотеза про лінійний закон розподілу бокових де-

формацій в області контакту. Теорія, розроблена в цій роботі, займає проміжне положення між модельною і феноменологічною теоріями. У ній враховується два ступеня свободи диска колеса і дві з шести складових реакцій, але нехтується проковзуванням в області контакту.

Базуючись на цій теорії, Р. Смайлі [15] дав оцінку точності інших моделей рухомого колеса. Л. Сігел у роботі [16] удосконалив теорію роботи [24], систематично застосовуючи модельний підхід, розв'язавши рівняння з аргументом для двох складових реакції між шиною та дорогою, нехтуючи шириною області контакту.

Ширина області контакту враховується в роботі Г. Пасежки [17], де залежності для двох складових реакції мають структуру рівнянь у своїх похідних. Значний прорив відзначається у роботах М. А. Левіна [25–27], в яких отримані компактні вирази у загальному випадку для всіх шести складових реакції в області контакту рухомого колеса з урахуванням ширини області контакту.

На підставі методів зменшення порядку рівнянь теорії кочення, розвинутих М. А. Левіним і М. О. Фуфаєвим [28], знайдені вирази більш простих варіантів теорії і, крім цього, встановлено зв'язок з іншими відомими теоріями. Ними розглянуті різноманітні питання теорії кочення, наприклад, вивчалось кочення з використанням квазікоординат, з урахуванням ковзання і при довільних переміщеннях колеса.

М. В. Келдиш [10], досліджуючи автоколивання коліс літаків і автомобілів, отримав рівняння кривизни траєкторії руху коліс. При виведенні рівнянь приймалося допущення, що рухоме колесо характеризується тими ж параметрами, що і нерухоме, тобто деформації шини дуже малі і ковзання в області контакту відсутнє, що призводить до значної похибки при обчисленнях.

У роботі [29] встановлені залежності для коефіцієнтів теорії Келдиша. Теорія Келдиша узагальнена на випадок прямого руху з урахуванням повздовжньої складової реакції. В ній розглянуті питання визначення параметрів деформівного колеса за мінімально необхідної кількості дослідних даних та результати експериментального підтвердження теорії [28], а також розв'язані різноманітні задачі динаміки систем із коченням. Крім цього вивчалось кочення деформівного колеса по пружнов'язкопластичній основі в умовах утворення колії і багатократного проходження по сліду, а також вплив розбіжності коефіцієнтів тертя кочення і ковзання на взаємодію колеса з опорною поверхнею.

Переваги феноменологічного підходу полягають у його відносній простоті і більшій доступності, тому що тут досить вільно можна оперувати різноманітними гіпотезами, що дозволяють записати визначальні рівняння теорії кочення, не враховуючи всі тонкощі складних механічних явищ, що відбуваються в контактній області колеса. При цьому більшість констант теорії необхідно знаходити експериментально. Проте, якщо не вдалося правильно визначити вид вихідних залежностей, то феноменологічна теорія може давати істотні похибки, а в спробі визначити коефіцієнти, що передбачалися постійними, можна прийти до протиріч. І це є очевидним недоліком феноменологічного опису.

Аналіз робіт з криволінійного руху еластичного колеса показав, що у відомих публікаціях по-різному, іноді обмежено і суперечливо, розглядаються фізичні явища. І. Н. Чернишов [30] розділяє ковзання на повне, часткове і місцеве. В. А. Петрушов [31] називає частковим таке ковзання точок колеса у контакті з опорною поверхнею, коли в площині контакту одночасно з ним існує область спокою точок колеса відносно опорної поверхні.

Більшість дослідників спираються на запропоновану О. Рейнольдсом [32] схему кочення пружного тіла, в якій тертя кочення обумовлено тертям ковзання окремих ділянок поверхні колеса відносно основи. Площину контакту розбивають на зону зчеплення, розташовану на вході в контакт, і зону ковзання на виході з контакту, причому ковзання на вході в контакт не враховується.

Проблема опису автомобільних шин із високими техніко-економічними показниками потребує ретельного вивчення їхніх властивостей на етапі проведення проектних робіт. Це, в свою чергу, викликає необхідність у розробці математичних моделей, алгоритмів і програм розрахунку шин для різноманітних видів навантаження. В роботі О. М. Ларіна [33] була впорядкована класифікація основних розрахункових моделей шин (рис. 1.1).

Важливе місце в практичній роботі займає дослідження симетричного напружено-деформованого стану автомобільних шин. Вирішення контактної задачі для шини, схильної до локальних експлуатаційних навантажень, а також проектування нових перспективних моделей не може здійснюватися без ясного уявлення про характер розподілу зусиль у нитках корду і особливості деформування найбільш відповідальних елементів шини при навантаженні її внутрішнім тиском.

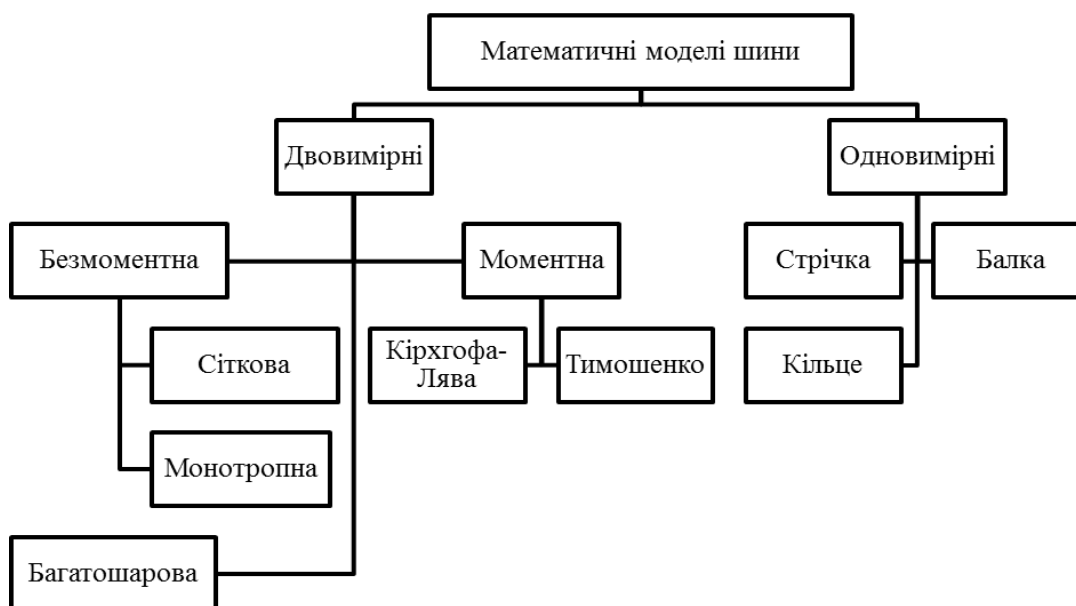


Рисунок 1.1 – Класифікація основних розрахункових моделей шин

Ця задача завжди викликала і продовжує викликати незмінний інтерес з боку багатьох вчених, тому що дозволяє шляхом нескладних розрахунків з'ясувати роботоздатність тієї чи іншої моделі пневматичної шини і тим самим оцінити достовірність прийнятих в її основу гіпотез. Розв'язання найпростішої задачі про рівноважну конфігурацію діагональної шини було отримано В. Л. Бідерманом [34] на основі безмоментної теорії сітчастих оболонок. Незважаючи на окремі недоліки, наприклад прийняття гіпотези про нерозтягання ниток корду, що, з одного боку, приводить до нескінченно великої зсувної жорсткості сітки, а це, у свою чергу, усуває можливість урахування зсуву, але, з іншого боку, модель сітчастої оболонки дозволяє достатньо добре визначати конфігурацію надутої діагональної шини.

Значний крок був зроблений Б. Л. Бухіним в роботі [35]. Він узагальнив модель шини на основі безмоментної теорії сітчастих оболонок у випадку лінійно- і нелінійно-розтяжного корду. У роботах Б. Л. Бухіна було встановлено, що безмоментна теорія сітчастих оболонок веде до достовірного опису конфігурації діагональних шин вантажних і легкових автомобілів.

Коли стало зрозуміло, що в окремих випадках теорія сітчастих оболонок дає явно неприйнятні результати, то увага дослідників зосередилася на розробці якісно нових моделей діагональних шин.

Незабаром С. Робеккі [37] були побудовані моделі шини на основі безмоментної теорії ортотропних оболонок, що дозволили врахувати вплив не лише гуми, але й розходження в механіко-геометричних параметрах елементів гумокордних прошарків.

Істотне просування вперед належить Г. Бреверу [38], у роботі якого діагональна шина моделюється як багатошарова ортотропна оболонка Кірхгофа–Лява. Пізніше модель Бревера була узагальнена на багатошарові ортотропні та анізотропні [39, 40] оболонки типу Тимошенка. При цьому в роботі [39] досліджено спільний вплив ефекту анізотропії і геометричної нелінійності шини на її напружено-деформований стан, а в роботі [40] для визначення геометрії поверхні приведення вперше були використані згладжувальні кубічні сплайни. Необхідно відзначити, що розрахунок пневматичних шин у рамках моментної теорії оболонок стримувався через відсутність у літературі чіткого уявлення, як необхідно апроксимувати форму меридіана поверхні приведення.

Перехід конструкції шин від діагональної до радіальної вимагав застосування нових розрахункових схем та методик. Однією з перших працездатних моделей радіальної шини була модель, розроблена Ф. Бомом [41]. У його роботах шина являє собою оболонку, складену з двох пакетів мембранних прошарків, один із яких розташований у біговій частині і моделює брекер, а інший – каркас. С. Робеккі, на відміну від Ф. Бома, у роботі [42] розглянув з позицій безмоментної теорії шаруватих ортотропних оболонок не лише діагональну, але й радіальну шини.

Недоліки розглянутих моделей очевидні, тому що наявність у біговій частині радіальної шини широкого і потужного брекера призводить до нерівномірного розподілу напружень по товщині пакета прошарків, зокрема в зоні закінчення брекера.

Більш досконала модель радіальної шини описана у роботах В. Л. Бідермана [43], Ю. П. Макеева [44], А. М. Юрченка [45], де боковина моделюється трансверсально ізотропною безмоментною оболонкою, а бігова частина – тришаровою оболонкою, що складається з двох ортотропних мембранних прошарків (брекер і каркас) і жорстко-

го гумового прошарку між ними, що працює на поперечний зсув. Розв'язання задачі в такій постановці дало можливість, певною мірою, визначити розмір поперечного зсуву в гумовому прошарку.

У роботах [45, 47] запропоновано новий підхід, що дозволяє визначити напружено-деформований стан радіальної шини з урахуванням додаткових особливостей, які істотно впливають на результати розрахунку:

- шина моделюється багатошаровою моментною оболонкою типу Тимошенка;

- береться до уваги ефект анізотропії, врахування якого веде до помітної перебудови напружено-деформованого стану шини в біговій частині.

Водночас розрахунок радіальних шин із малошаровим металокордним брекером показав, що кінематична гіпотеза оболонки типу Тимошенка може призводити, в окремих випадках, до похибок, які спотворюють картину напружено-деформованого стану шини в зоні закінчення брекера.

Найпростіший спосіб, що частково усуває згадані недоліки, є прийняття для всього пакета в цілому узагальненої кінематичної гіпотези С. П. Тимошенка [48], що дозволило б простежити нелінійний характер розподілу напружень і деформацій за товщиною радіальної шини. Розрахунок шини на основі теорії багатошарових оболонок з урахуванням локальних ефектів виконано в роботах [49, 50].

Інтенсивно використовуються при розв'язанні задачі контакту радіальної шини з жорсткою підставою одновимірні стрижневі моделі [51, 52]. Складність розв'язання контактної задачі для пневматичної шини під дією експлуатаційних навантажень припускає використання чисельних методів: тригонометричних рядів, локальних варіацій, скінченних різниць, скінченних елементів.

Історично склалося так, що метод подання вектора розв'язків у вигляді тригонометричних рядів був першим із застосованих у контактній задачі, через нескладність розрахунків [53–55].

Популярність цього методу пояснюється тим, що розв'язання нелінійної двовимірної задачі здійснюється в два етапи: спочатку визначається за теорією сітчастих оболонок рівноважна конфігурація шини,

потім розв'язується в лінійній постановці неосесиметрична задача для попередньо навантаженої оболонки, вихідна конфігурація якої збігається з рівноважною. Теоретичне обґрунтування описаного підходу до розв'язання контактних задач наведено в роботі [56].

Однією з перших робіт, у якій контактна задача розв'язувалася методом локальних варіацій, була робота [57], в якій автору при чисельній реалізації цього методу довелося подолати значні труднощі, пов'язані з наявністю великого варіювання невідомими.

Додавання методу локальних варіацій до розв'язання розглянутих задач наведено у роботах [58, 59], у яких розроблено вдосконалений варіант методу, що базується на блоковому варіюванні невідомими.

Перспективним методом дослідження контактної задачі є метод скінченних елементів. Значний інтерес викликають статті [60, 61], у яких показана можливість ефективного розв'язання методом скінченних різниць контактної задачі для попередньо напруженої шини в лінійній і нелінійній постановках.

Для обґрунтування параметрів, за якими можна оцінювати працездатність шини, необхідно розглянути питання математичного опису процесів, які відбуваються у контакті шини з дорогою, оскільки основне призначення шини – це забезпечення необхідних сил зчеплення і високої безпеки руху.

Стабільність коефіцієнта зчеплення шини з дорогою переважно залежить від величини зношення рисунка протектора шини.

У випадку взаємодії шини з поверхнею дороги сила тертя використовується для запобігання ковзання шини відносно поверхні дороги. Збільшення коефіцієнта тертя викликає збільшення інтенсивності зношення матеріалу протектора шини в зоні ковзання.

Сила тертя, що чисельно дорівнює силі зчеплення, виникає в зонах фактичного торкання виступів протектора до поверхні дороги і залежить від конструкції шини та типу дорожнього покриття.

Довжина контакту шини з дорогою залежить від жорсткісних характеристик шини, зовнішнього навантаження і тиску повітря в шині. Для її визначення доцільно в основу аналізу покласти спрощену модель шини, розглянуту в роботі [51], де шина подана у вигляді стрічки на пружній основі.

1.2 Вплив режиму кочення колеса на проковзування в контактi з дорогою

Більшість робіт Б. Л. Бухіна у галузі дослідження криволінійного руху стосуються аналізу руху колісної машини в цілому. При цьому враховуються: база, ширина, колія, число осей, тобто розглядається загальна теорія руху колісної машини [36, 56, 62]. Проте фізичні процеси, що супроводжують кочення окремого колеса, а також явища в контактi колеса з основою, які суттєво впливають на характер руху колеса, а отже, і на колісну машину в цілому, вивчено порівняно мало.

М. В. Келдиш у роботі [10] розглянув рух колеса на повороті з кутом нахилу до площини дороги ϵ і кутом повороту серединної лінії контакту до площини колеса. З урахуванням деяких припущень було визначено, що рух колеса по криволінійній траєкторії супроводжується дією бічної сили і сумою моментів, що діють у площині дороги і у вертикальній площині.

Пізніше В. І. Кнороз у роботі [2] експериментально встановив, що отримані в роботах М. В. Келдиша залежності недостатньо відбивають фізичну суть явищ, що відбуваються при коченні колеса, і мають занадто загальний характер.

У роботах [63–65] розглядаються емпірично знайдені нелінійні залежності реакцій від параметрів кочення («магічна формула»), що дозволяють отримати прийнятні експериментальні результати:

$$y(x) = D \sin[B \arctan(Bx - E(Bx - \arctan(Bx)))], \quad (1.1)$$

де B – фактор жорсткості; C – фактор форми; D – максимум функції; E – фактор кривизни.

У дослідженнях Й. Вонга [66] вивчається залежність вертикальної реакції F_z від вертикального зміщення z_q при різних режимах кочення колеса. М. А. Левін у роботі [67] включив до розгляду такі фактори, як можливість існування принаймні двох областей проковзування та показав відмінність коефіцієнтів сухого тертя і тертя ковзання на малих швидкостях при наявності в'язко-пружних елементів в конструкції шини.

У роботі Л. Г. Лобаса та В. Г. Вербицького [68] враховується кут поздовжнього нахилу шворня (рис. 1.2), що обумовлює стабілізуючий момент на плечі стабілізації, але приймається лінійна залежність стабілізуючого моменту шин (п'яткового моменту) від кута відведення.

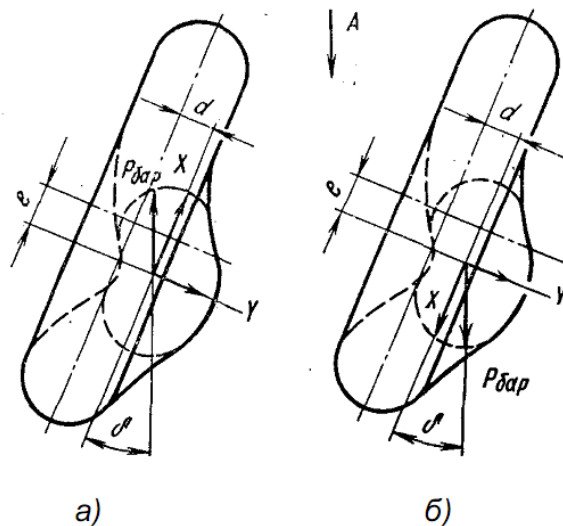


Рисунок 1.2 – Схема виникнення стабілізувальних моментів шини:

а) ведуче колесо; б) гальмівне колесо;

A – напрямок швидкості контактної поверхні барабана

Слід відмітити, що раніше у роботі М. А. Левіна і Н. А. Фуфаєва [69] вже викладався підхід до дослідження проблем кочення колеса, при якому задача теорії кочення полягала у знаходженні шести компонент узагальненої реакції зв'язку, розподілених сил і моментів в області контакту з урахуванням деформаційних і фрикційних властивостей шини та опорної поверхні як функцій фазових змінних колеса. При цьому модель колеса з шиною являє собою набір тонких твердих дисків з периферією, яка може деформуватися, закріплених на загальному валу. Деформівна периферія кожного диска складається з набору радіально розташованих безмасових стрижнів, з'єднаних на кінцях безмасовою розтягнутою ниткою.

У роботах [70, 71] стабілізувальні моменти шин описуються як нелінійна залежність від кута відведення δ :

$$M_{ст} = \sigma_1 \cdot \delta^1 - \sigma_2 \cdot \delta^3 + \sigma_3 \cdot \delta^5, \quad (1.2)$$

де $\sigma_{(1, 2, 3)}$ – приведені характеристики осі.

Твердження про те, що стабілізувальний момент шини суттєво впливає на стійкість руху автомобіля, знаходить підтвердження в останніх дослідженнях. Наприклад, у роботі В. А. Макарова [72] була розглянута модель автомобіля, що вже враховує власні коливання керованих коліс.

За результатами аналізу можливості забезпечення курсової стійкості руху шляхом вибору шин з визначеним п'ятковим моментом і (або) регулюванням розвалу колеса зроблені такі висновки:

– при використанні зазначеної моделі автомобіля обидва згаданих фактори значно впливають на характеристики курсової стійкості його руху і можуть бути регульовальними параметрами;

– п'ятковий момент здійснює більш сильний стабілізуючий вплив, що виявляється в ефективному гасінні автоколивань керованого модуля.

1.3 Аналіз моделей, що враховують роботу сили тертя в зоні контакту

Г. А. Гаспарянц [73] вперше як критерій для оцінювання зносу шин прийняв роботу тертя у зоні контакту. Він отримав аналітичну залежність для визначення сумарної роботи тертя при розрахунковому проковзуванні в зоні виходу з контакту:

$$A_{\Sigma} = \frac{K_y \left(\frac{K_y}{C_b} + \frac{S_1}{2} \right)^3}{3S_1 t g^2 \alpha \left(\frac{K_y}{C_b} - \frac{S_1}{2} \right)} \varepsilon, \quad (1.3)$$

де K_y – коефіцієнт опору бічному відведенню; C_b – бічна жорсткість; S_1 – довжина контакту; ε – кут відведення.

Однак ця формула справедлива лише при великих кутах відведення і зовсім непридатна при куті відведення, що знаходиться в межах нуля. У цьому випадку робота тертя виходить рівною нулю, а шина зношується, як відомо, за будь-яких умов кочення колеса.

У роботі [74] Г. Гента розглянув вплив вертикального навантаження і тиску повітря в шині на величину роботи тертя у зоні контакту. Він заявив, що збільшення навантаження на колесо при постійному тиску в шині або зниження тиску при постійному навантаженні на колесо приводить до збільшення роботи тертя. У цій роботі також розглядається вплив бічного відведення на роботу сил тертя, але не розглядається вплив конструкції шини.

Багато робіт з дослідження зв'язку між тертям та зносом, виконав Д. Лучіні [75]. На його думку, знос залежить не тільки від зносостій-

кості матеріалу протектора, а й, значною мірою, обумовлений силами, що діють на шину.

Для аналітичного опису зв'язку між зносом і силами тертя в контакті запропонована така залежність:

$$A = \frac{2qyF^2}{Ka^2}, \quad (1.4)$$

де q – коефіцієнт, що враховує пружність; y – коефіцієнт пропорційності; K – модуль пружності; a – зона контакту шини; F – сила реакції.

Ця формула отримана в результаті припущення, що елементи шини деформуються незалежно один від одного і деформації підпорядковуються закону Гука. У висновку автор відзначає, що механічні властивості шини впливають з характеристик двох елементів шини – каркаса і протектора, причому останній менше впливає на загальну роботу тертя.

Я. Є. Фаробін у роботі [76] проводить аналіз кінематики рульових трапедій. Оцінювання правильності вибору форми рульової трапедії виконується за мінімальним збільшенням коефіцієнта опору кочення керованих коліс на повороті. У результаті проведених автором експериментів встановлено, що при наявності бічного відведення різко підвищується знос шин і підвищується опір кочення. Автором отримано рівняння, що характеризує зміну коефіцієнта опору кочення передньої осі автомобіля в залежності від відведення. При цьому робиться висновок про те, що зі збільшенням кривизни повороту і швидкості руху зростають втрати на кочення, а радіальна деформація шини викликає деформації в коловому і меридіональному напрямках. У цій же роботі було також встановлено зв'язок між дотичними напруженнями в площині контакту і деформаціями каркаса. Але за наявності рисунка протектора ця умова не виконується. Виходячи з припущення, що проковзування в зоні контакту відсутні, за величинами колових і меридіональних деформацій можна визначити зміщення довільної точки каркаса шини щодо опорної поверхні, що в свою чергу, дозволяє знайти дотичні напруження. Проковзування в області ковзання пропонується визначати за величиною зміщення каркаса щодо опорної поверхні. Знаючи величину ковзання і дотичні сили, автор визначає питому роботу тертя

ЛІТЕРАТУРА

1. Ишлинский А. Ю. О проскальзывании в области контакта при трении качения / А. Ю. Ишлинский // Известия АН СССР, ОТН. – 1956. – № 6. – С. 3–15.
2. Кнороз В. И. Работа автомобильной шины / В. И. Кнороз. – М. : Автотрансиздат, 1960. – 228 с.
3. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А. С. Литвинов. – М. : Машиностроение, 1971. – 416 с.
4. Ларін О. М. Експериментальне дослідження взаємодії шини з поверхнею дороги / О. М. Ларін, О. М. Яковлев, В. Б. Коханенко // Методи та прилади контролю якості. Науково-технічний журнал Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу. – 2000. – № 6. – С. 68–76.
5. Мухин О. Н. Расчет прогиба радиальной шины с учетом меридиональной кривизны беговой дорожки / О. Н. Мухин // Механика пневматических шин – М. : НИИШП. – 1974. – № 3. – С. 12–25.
6. Чудаков Е. А. Избранные труды. / Е. А. Чудаков. – М. : АН СССР, 1961. Т : 1. Теория автомобиля. – 463 с.
7. Fiala E. Seitcukrafre am rollenden Luftreifen / E. Fiala // Zeitschrift VDI. – 1984. – № 29. – P. 973–979.
8. Fromm H. Seitenschlupf und Führungswert des rollenden Rades / H. Fromm // Berichter Linientalgesellschaft für Luftfahrtforschung. – 1965. – № 140. – P. 56–63.
9. Hadekel R. The Mechanical Characteristics of pneumatic tires / R. Hadekel // Ministry of Supply. – 1950. – T.P.A. 3. – P. 15–19.
10. Келдыш М. В. Шины переднего колеса трехколесного шасси / М. В. Келдыш // Труды ЦАГИ. – 1945. – № 564. – С. 1–33.
11. Neimark Ju. I. Mathematical models in Natural Science and Engineering / Ju. I. Neimark – Oxford, 2003. – 246 p.
12. Рокар И. Неустойчивость в механике, автомобили, самолеты, висячие мосты / И. Рокар. – М. : Изд. иностр. лит, 1959. – 287 с.
13. Schlippe B. Das Flatter Eines Berfnenten Rades / B. Schlippe, R. Deitrich // Berichter Lilienthal Gesellschaft für Luftfahrtforschung – 1961. – № 140. – S. 35–40.

14. Greindauns J. Besturing en stabiliteit van het neuswiel-onderstel / J. H. Greindauns // NLL Rapport, Amsterdam. – 1942. – V. 1038. – P. 37–40.
15. Smiley R. F. Correlation, evaluation and extension of linearized theories for tire motion and wheel shimmy / R. F. Smiley // NACA Report. – 1997. – № 1299. – P. 48.
16. Segel L. Force and moment response of pneumatic tires to lateral motion inputs / L. Segel // Transactions of ASME. Engineering for Industry. – 1996. – Feb. – P. 37–44.
17. Pacejka H. B. The wheel shimmy phenomenon: A theoretical and experimental investigation with particular reference to the nonlinear problem (Analysis of shimmy in pneumatic tires due to lateral flexibility for stationary and nonstationary conditions) / H. B. Pacejka. – Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 1966.
18. Жуковский Н. Е. К динамике автомобиля. Полное собрание сочинений / Жуковский Н. Е. – М. : Гостехиздат, 1950. – 608 с.
19. Колесников К. С. Автоколебания управляемых колес автомобиля / Колесников К. С. – М. : Гостехиздат, 1955. – 239 с.
20. Певзнер Я. М. О качении автомобильных шин при быстроменяющихся режимах увода / Я. М. Певзнер // Автомобильная промышленность. – 1968. – № 6. – С. 15–19.
21. Хачатуров Л. А. Динамика системы дорога–шина – автомобиль–водитель / Л. А. Хачатуров, А. А. Афанасьев. – М. : Машиностроение, 1976. – 535 с.
22. Филин А. П. Дискретные расчетные схемы в строительной механике / А. П. Филин // Известия АН СССР. – М. : Механика и машиностроение. – 1984. – № 5. – С. 88–98.
23. Ишлинский А. Ю. О качении жестких и упругих колес по деформируемому грунту / Ишлинский А. Ю. – М. : Издание АН СССР, 1956. – 97 с.
24. Bergman W. Theoretical Prediction of the Effect of Traction on Cornering Force / W. Bergman // SAE. – 1990. – June. – P. 46–48.
25. Левин М. А. Определение параметров стационарного и нестационарного увода колеса // 6-й Всесоюзный научно-техн. семинар «Опыт работы по улучшению устойчивости и управляемости автомобиля». – М. : НАМИ, 1982. – С. 29–32.

26. Левин М. А. Влияние нелинейных динамических явлений в деформируемой периферии колеса с учетом ее распределенной массы, скорости движения, вязкоупругих свойств и сухого трения на стационарное качение колеса // Сборник трудов 3-го всесоюзного семинара «Проблемы шин и резинокордных композитов, нелинейность и нестационарность». – М. : НИИШП, 1990. – С. 42–48.

27. Левин М. А. Исследование динамики катящегося самоустанавливающегося колеса / М. А. Левин, А. Г. Выгонный // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : Высшая школа. – 1986. – Вып. 7. – С. 21–24.

28. Левин С. Л. Теория качения деформируемого колеса / С. Л. Левин, Н. А. Фуфаев // 5-й Всесоюзный научно-техн. семинар «Опыт работы по улучшению устойчивости и управляемости автомобиля». – 1980. – М. : НАМИ. – С. 19–20.

29. Левин М. А. Экспериментальное определение частотных характеристик продольной реакции катящегося деформируемого колеса / М. А. Левин // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : Высшая школа. – 1981. – Вып. 8. – С. 38–47.

30. Чернышов И. Н. Недостатки в исследовании автомобильных шин / И. Н. Чернышов // Автомобильная и тракторная промышленность. – 1954. – № 4. – С. 15–18.

31. Петрушов В. А. К вопросу о качении эластичного колеса / В. А. Петрушов // Автомобильная промышленность. – 1963. – № 12. – С. 5–9.

32. Бухин Б. Л. Расчёт напряжений и деформаций в пневматических шинах при их вращении / Б. Л. Бухин // Расчёты на прочность. – 1960. – № 6. – С. 56–66.

34. Бидерман В. Л. Расчет формы профиля и напряжений в элементах пневматической шины, нагруженной внутренним давлением / В. Л. Бидерман // Труды НИИШП. – 1957. – № 3. – С. 16–51.

35. Бухин Б. Л. Введение в механику пневматических шин / Б. Л. Бухин – М. : Химия, 1988. – 224 с.

36. Бухин Б. Л. Анализ точности расчета равновесной конфигурации диагональной шины / Б. Л. Бухин, Е. А. Ядров // Каучук и резина. – 1976. – № 5. – С. 44–47.

37. Robecchi E. Mechanics of the pneumatic tire. Part II. The laminar model under inflation and in rotation / E. Robecchi // *Tire Science and Technology*. – 1973. – Vol. 1, № 4. – P. 382–438.

38. Brever H. K. Tire stress and deformation from composite theory / H. K. Brever // *Tire Science and Technology*. – 1977. – Vol. 1, № 1. – P. 47–76.

39. Григолюк Э. И. Численное решение задач статистики геометрически нелинейных анизотропных многослойных оболочек вращения / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов // *Механика композитных материалов*. – 1981. – № 3. – С. 443–452.

39. Григолюк Э. И. Эффект неоднородности касательных напряжений в современных шинах / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов // *Механика композитных материалов*. – 1986. – № 5. – С. 870–877.

40. Григолюк Э. И. Осесимметричная деформация анизотропных слоистых оболочек вращения сложной формы / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов // *Механика композитных материалов*. – 1981. – № 4. – С. 637–645.

41. Bohm F. History of railway and road vehicles / F. Bohm, K. Knote // *Vehicle System Dynamics*. – 1999. – № 6. – P. 283–323.

42. Robecchi E. Mechanics of the pneumatic tire. Part I. The tire under inflation alone / E. Robecchi, L. Amici // *Tire Science and Technology*. – 1977. – Vol. 1, № 3. – P. 290–345.

43. Бидерман В. Л. Расчет напряжений и деформаций, вызываемых давлением в шинах типа «Р» / В. Л. Бидерман, Э. Я. Левковская // *Известия вузов. М. : Машиностроение*. – 1969. – № 3. – С. 107–112.

44. Макеев Ю. П. Исследование влияния основных эксплуатационных и конструктивных параметров на работу трения в пятне контакта и износостойкость шины: дис. ... канд. тех. наук : 05.22.10 / Макеев Юрий Петрович. – Харьков, 1980. – 168 с.

45. Юрченко А. Н. Исследование взаимодействия шины с динамометрической площадкой / А. Н. Юрченко // *Автомобильный транспорт. Респ. Межведом, науч. -техн. сб.* – 1984. – Вып. 21. – С. 62–70.

46. Григолюк Э. И. Новый подход к расчету радиальных шин / Э. И. Григолюк, Г. М. Куликов // *Материалы чтений по механике*

деформируемого твердого тела и прикладной математике. – М. : МАМИ, – 1981. – С. 72–76. – Деп. в ВИНТИ 18.08.81, № 4099-81.

47. Куликов Г. М. О влиянии анизотропии на напряженное состояние многослойных армированных оболочек / Г. М. Куликов // Прикладная механика. — 1986. – Т. 22, № 12. – С. 66–72.

49. Lee J. Interfacial Forces between Tire and Snow under Different Snow Depths [Электронный ресурс] / J. Lee, Q. Liu // SAE World Congress. – 2006. № 1. – P. 19. – Режим доступа до журн. <http://papers.sae.org/2006-01-0496>

50. Новичков Ю. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния слоистых оболочек вращения с приложением к расчету шин / Ю. Н. Новичков, А. С. Кузьмин // Механика композитных материалов. – 1984. – № 6. – С. 1023–1029.

51. Evaluation of Low Impact Military Tires / P. Ayers, H. Howard, A. Aderson [and others] // Tire Science and Technology. – 2006. – № 34 (4). – P. 256 – 274.

52. Sun L., A Simple Analysis Method for Contact Deformation of Rolling Tire / Z. Yu, H. Tan, X. Du [and others] // Vehicle System Dynamics. – 2010. – № 36(6). – P. 435 – 443.

53. Gim G. A Semiphysical Tire Model for Vehicle Dynamics Analysis of Handling and Braking / G. Gim // Vehicle System Dynamics. – 2005. – № 43. – P. 267 – 280.

54. Chan B. A semi-analytical approach to off-road tire modeling for vehicle dynamics simulations / B. Chan, C. Sandu // In: Proceedings of 16th ISTVS International Conference. – 2008. – P. 186 – 203.

55. Kabe, K. New Analytical Tire Model for Cornering Simulation. Part II: Cornering Force and Self-aligning Torque / K. Kabe, N. A. Miyashita // Tire Science and Technology. – 2006. - № 34(2). – P. 100 – 118.

56. Бухин Б. Л. Применение теории сетчатых оболочек к расчету пневматических шин / Б. Л. Бухин // Механика пневматических шин как основа рационального конструирования и прогнозирования эксплуатационных свойств. – М. : НИИПШ, 1974. – С. 59–74.

57. Фотинич О. В. К расчету радиальных шин / О. В. Фотинич // Механика пневматических шин как основа рационального конструи-

рования и прогнозирования эксплуатационных свойств. – М. : НИИШП. 1974. – С. 45–58.

58. Кваша Э. Н. Контактная задача для опоясанной тороидальной оболочки / Э. Н. Кваша // Расчет напряженно-деформированного состояния пластин и оболочек – Саратов : Изд-во СГУ, 1981. – С. 10–12.

59. Кваша Э. Н. Термонапряженное состояние металлокордных пневматических шин / Э. Н. Кваша // Численные методы и математическое моделирование тепломассопереноса : сборник научных трудов – Днепропетровск : ДГУ, 1991. – С. 101–106.

60. Shoop S. Finite element modeling of tires on snow / S. Shoop, K. Kestler, R. Haehnel // Tire Science and Technology. – 2006. – № 34(1). – P. 2–37

61. Fervers C. Improved FEM Simulation Model for Tire-soil Interaction / C. Fervers // Proceedings of the 14th ISTVS Conference. – 2002. – P. 34–42.

62. Бухин Б. Л. Расчет равновесной конфигурации пневматической шины с учетом удлинения нитей корда / Б. Л. Бухин // Каучук и резина. – 1963. – № 10. – С. 35–38.

63. Pacejka H. The magic formula tyre model / H. Pacejka, E. Baker // 1–st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis. – 2008. – P. 1–18.

64. Bakker E. Tire modelling for use in vehicle dynamics studies / E. Bakker, L. Nyborg, B. Hans, H. Pacejka // Society of Automotive Engineers. – Warrendale, PA. – 1989. – Jan. – P. 106–115.

65. Добровольський О. Л. Математичне моделювання руху автомобільної шини / О. Л. Добровольський // Перспективні інновації в науці, освіті, виробництві і транспорті – 2010 : міжнарод. научн.-техн. конф., 21–30 червня 2010 г. : сб. научн. трудов. – Одеса, – 2010. – Т. 1. – С. 42–45.

66. Wong J. Y. Data Processing Methodology In the Characterization of the Mechanical Properties of Terrain / J. Y. Wong // Journal of Terramechanics. – 2003. – № 17(1). – P. 13–41.

67. Левин М. А. Нестационарный увод колеса с учетом проскальзывания в области контакта / М. А. Левин // Материалы секции тео-

ретической и прикладной механики: 26-я конф. БПИ. – Минск : БПИ, 1970. – С. 73–80.

68. Левин М. А. Теория качения деформируемого колеса / М. А. Левин, Н. А. Фуфаев. – М. : Наука, 1989. – 269 с.

69. Лобас Л. Г. Якісні та аналітичні методи в динаміці колісних машин / Л. Г. Лобас, В. Г. Вербицький. – К. : Наукова думка, 1990. – 232 с.

70. Математична модель керуючого колісного модуля з урахуванням закону повороту рульового колеса / [Сахно В. П., Вакуліч А. В., Крест'янполь О. А. та ін.] // Вісник Транспортної академії України та Українського транспортного університету. – 1999. – № 3. – С. 155–158.

71. Математична модель автомобіля із всеколісним керуванням / [Сахно В. П., Вакуліч А. В., Барілович С. Л. та ін.] // Вісник Центрального наукового центру ТАУ. – 2000. – № 3. – С. 96 – 99.

72. Макаров В. А. Забезпечення курсової стійкості руху легкового автомобіля шляхом регулювання кута розвалу керованих коліс / В. А. Макаров // Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2003. – Вип. 6. – С. 121–124.

73. Гаспарянц Г. А. Влияние бокового увода колес на износ шин : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Гаспарянц Георгий Ашотович. – МАМИ, 1955. – 153 с.

74. Genta G. Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation / G. Genta // World Scientific Publishing. – 2003. – № 3. – P. 125–163.

75. Tre Addepth Effects on Tire Rolling Resistance / J. R. Luchini, M. M. Motil, W. V. Mars [and others] // Tire Science and Technology. – 2001. – № 29 (3). – P. 134–154.

76. Фаробин Я. Е. Теория поворота транспортных машин / Я. Е. Фаробин – М. : Машиностроение, 1970. – 174 с.

77. Бидерман В. Л. Влияние конструкционных и эксплуатационных факторов на износ, сцепление и сопротивление качению автомобильных шин / В. Л. Бидерман // Тематический обзор. – М. : ЦНИИТЭ Нефтехим. – 1970. – С. 75–80.

78. Sandu C. Experimental study on the mobility of lightweight vehicles on sand / C. Sandu, M. Worley, J. Morgan // In: Proceedings of m16-th ISTVS International Conference. – 2008. – P. 162–176.

79. Вирабов Р. В. Определение работы трения в контакте при качении колеса с пневматической шиной по жесткому основанию / Р. В. Вирабов // Автомобильная промышленность. – 1975. – № 11. – С. 19–22.

80. Ребедаило В. М. Робота в п'ятні контакту шини при коченні її з розвалом та сходженням / В. М. Ребедаило, О. Л. Добровольський // Автомобильный транспорт. – 2003. – № 13. – С. 60–63.

81 Рабинович Э. Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом однократного выбега / Э. Х. Рабинович, З. Э. Кемалов, А. В. Сосновий // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2008. – Вып. 22. – С. 46–48.

82. Рабинович Э. Х. Определение сопротивлений движению автомобиля методом двукратного выбега / Э. Х. Рабинович, В. А. Зуев, Н. В. Воскобойников // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2008. – Вып. 22. – С. 49–53.

83. Рабинович Э. Х. Расчет коэффициентов сопротивлений движению автомобиля по пути выбега / Э. Х. Рабинович, В. П. Волков, Е. А. Белогуров // Вестник ХНАДУ : сб. научн. трудов. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – Вып. 44. – С. 30–34.

84. Кнороз В. И. Взаимодействие арочной шины с деформируемым грунтом / В. И. Кнороз, И. П. Петров // Труды НАМИ. – 1966. – Вып. 81. – С. 39–57.

85. Захаров С. П. Распределение удельного давления шины на дороге при высоких скоростях / С. П. Захаров, В. И. Новопольский // Труды НИИШП. – М. : Госхимиздат, 1957. – С. 131–153.

86. Калининский В. С. Модернизация универсального стенда модели 3327 для испытания шин и резинотехнических изделий / В. С. Калининский, И. В. Маслов // Каучук и резина. – 1987. – № 7. – С. 35–38.

87. Малюгин П. Н. Комплекс методик для определения выходных характеристик шин на стенде с применением управляющей ЭВМ / П. Н. Малюгин // Тезисы докладов 2-го Всесоюзного симпозиума «Проблемы шин и резинокордных композитов. Прочность и долговечность». – М. : НИИШП, 1990. – С. 199–204.

88. Назаренко С. А. Установка для испытания шин в дорожных условиях / С. А. Назаренко // Исследование пневматических шин : сб. научн. трудов. – Омск, 1970. – С. 15–23.

89. Новопольский В. И. Оборудование и приборы для исследования работы протектора автомобильных шин в контакте с опорной поверхностью / В. И. Новопольский, О. Б. Третьяков // Каучук и резина. – 1967. – № 5. – С. 41–48.

90. Сравнительные испытания шин на мокрой дороге / Л. П. Гречко, Ю. П. Макеев, А. Н. Ларин. – М., 1987. – 8 с. – Деп. рук. ЦБНТИ Минавтотранс РСФСР Рос. акад. наук, № 468–ат.

91. Добровольський О. Л. Аналіз конструкцій стендів та методів для випробування шин / О. Л. Добровольський // Наукові нотатки : міжвузівський збірник. – 2010. – № 28. – С. 188–194.

92. Говорущенко Н. Я. Основы эксплуатационной диагностики автомобилей / Н. Я. Говорущенко, А. В. Гогайзель, Б. И. Климец. – Харьков : ХГУ, 1967. – 181 с.

93. Терлецкий В. Г. Влияние параметров ходовой части на износ шин, управляемость и устойчивость движения автомобиля / В. Г. Терлецкий, Г. А. Константинов, А. Н. Юрченко // Автомобильный транспорт. – К. : Техника, 1968. – Вып. 5. – С. 95–99.

94. Захаров С. П. Распределение удельного давления шины на дорогу при высоких скоростях / С. П. Захаров, В. И. Новопольский // Труды НИИШП. – М. : Госхимиздат, 1957. – С. 131–153.

95. Зарщиков А. М. Стенд для исследования выходных характеристик шин легковых автомобилей / А. М. Зарщиков, А. Б. Дик // Проблемы шин и резинокордных композитов : труды Междунар. конф. – М. : НИИШП. – 1992. – С. 112–118.

96. Burennikov YU. Business processes perfection of small motor transport enterprises / YU. Burennikov, YU. Burennikov jr, A. Dobrovolsky [and others] // Bulletin of the polytechnic institute of Iasi. – 2011. – Tomul LVII (LXI), Fasc. 2. – P. 237–243.

97. Цукерберг С. М. Пневматические шины / С. М. Цукерберг, Р. К. Гордон. – М. : Химия, 1973. – 264 с.

98. Dudoff H. The Davidson laboratory Rolling Road facility / H. Dudoff // Journal of Terramechanics. – 2004. – Vol. 1, – № 4. – P. 78–83.

99. Князьков В. Н. Исследование работы пневматической шины под воздействием нормальной загрузки / В. Н. Князьков, Е. В. Кленников // Автомобильная промышленность. – 1975. – № 10. – С. 24–27.

100. Астров В. А. Сцепление колес автомобиля с покрытием дороги и безопасность движения / В. А. Астров // Исследование транспортно-эксплуатационных качеств автомобильных дорог. – Труды СоюздорНИИ. – 1970. – Вып. 22. – С. 88–135.

101. Гришин С. И. Всесоюзные сравнительные испытания приборов для оценки сцепных качеств и ровности дорожных покрытий / С. И. Гришин, Ю. В. Зотов // Обеспечение безопасности движения на автомобильных дорогах : сб. научн. трудов. – М. : МАДИ, 1981. – С. 104–113.

102. Кузнецов Ю. В. Определение коэффициента сцепления дорожного покрытия портативными приборами / Ю. В. Кузнецов // Обеспечение безопасности движения на автомобильных дорогах : сб. науч. трудов. – М. : МАДИ, 1981. – С. 114–118.

103. Шершнева А. А. Тепловой режим шины в зоне контакта с дорожным покрытием / А. А. Шершнева, М. Т. Попов // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 12. – С. 21–22.

104. Непомнящий Е. Ф. О фактической площади касания протектора шины с шероховатыми поверхностями дорожных покрытий / Е. Ф. Непомнящий // Автомобильная промышленность. – 1963. – № 10. – С. 18–20.

105. Ларин А. Н. Сцепление автомобильной шины с дорогой покрытой слоем воды : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Ларин Александр Николаевич – Харьков, 1988.– 178 с.

106. Пугин В. А. Экспериментальное исследование деформаций и напряжений в элементах автомобильных шин : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.12 / Пугин Владимир Андреевич. – М., 1964. – 279 с.

107. Цукерберг С. М. Технично-эксплуатационные качества шин. Исследование сцепления шины с дорогой : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Цукерберг Сергей Михайлович. – М., 1949. – 138 с.

108. Kraft P. Pneumatic tyre design / P. Kraft. – Cambridge, 2001. – 245 p.
109. Hofferbes K. The dynamics of the pneumatic tyre / Hofferbes K. – Endeavour, 2003. – 220 p.
110. Пугин В. А. Исследование шин из корда разной плотности / В. А. Пугин, Г. С. Филько // Каучук и резина. – 1970. – № 7. – С. 42–45.
111. Зарщиков А. М. Стенд для исследования выходных характеристик шин легковых автомобилей / А. М. Зарщиков, А. Б. Дик // Проблемы шины резинордных композитов : труды Междунар. конф. – М. : ЕИИШП, 1992. – С. 112–118.
112. Koizumi T., Tsujiuchi N., Mori S., Simulation of grouser-soil interaction by using 3-dimensional dem considering particle roughness / T. Koizumi, N. Tsujiuchi, S. Mori // Proceedings of 16-th ISTVS International Conference. – 2008. – P. 221–227.
113. Пугин В. А. Механика пневматических шин / В. А. Пугин, Г. С. Филько // Труды НИИШП. – М. : Госхимздат, 1976. – С. 111–123.
114. Ребедайло В. Н. Исследование влияния развала и схождения управляемых колес автомобиля на устойчивость их движения : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Ребедайло Вадим Николаевич. – Харьков, 1971. – 202 с.
115. Франк Ф. Исследование деформаций во внутренних слоях шины / Ф. Франк, В. Хоферберт // Химия и технология резины. – 1976. – Т. 4, № 1. – С. 277–322.
116. Беда П. И. Неразрушающий контроль металлов и изделий : справочник / П. И. Беда – М. : Машиностроение, 1976. – 273 с.
117. Левковская Э. Я. Теоретическое и экспериментальное исследование напряжений и деформаций в брекере шины типа «Р» : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.12 / Левковская Эльвира Яковлевна – М., 1970. – 157 с.
118. Макеев Ю. П. Экспериментальные исследования работоспособности пневматических шин / Ю. П. Макеев, А. Н. Ларин, В. А. Карпенко // Научные основы и пути создания шин и технологии из производства уровня 2000 года : тезисы докладов отраслевой научно-технической конференции. – М. : НИИШП, 1998. – С. 37–39.

119. Резниковский М. М. Механические испытания каучука и резины / М. М. Резниковский, А. И. Лукомская. – М. : Химия, 1968. – 287 с.
120. Лукомская А. И. Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин / А. И. Лукомская, В. Ф. Евстратов. – М. : Химия, 1975. – 116 с.
121. Солтус А. П. Теория эксплуатационных свойств автомобіля [учебное пособие для вузов] / А. П. Солтус. – К. : Аристей, 2004. – 188 с.
122. Ларин А. Н. Анализ методов и средств экспериментального исследования работоспособности автомобильных шин / А. Н. Ларин // Вестник Харьковского государственного политехнического университета : сб. научн. трудов, серия : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : ХГПУ, 2000. – Вып. 79. – С. 41–44.
123. Ларін О. М. Експериментальне дослідження деформацій бортової зони і боковини шини легкового автомобіля / О. М. Ларін // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль : ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2000. – Т. 5, № 2. – С. 62–67.
124. Бродский Г. И. Истирание резин / Бродский Г. И. – М. : Химия, 1975. – 240 с.
125. Ларін О. М. Залежність роботи сил тертя у контактї шини з дорогою від навантаженості та тиску повітря / О. М. Ларін, О. М. Яковлев, В. Б. Коханенко // Проблемы пожарной безопасности: сб. научн. трудов. – Харьков : ХИПБ, 1998. – Вып. 4. – С. 56–59.
126. Поддубный В. И. Механико-математическая модель шины колесного трактора / В. И. Поддубный // Вестник КрасГАУ. Техника. – 2008. – Вып. 1. – С. 222–227.
127. Эллис Р. Управляемость автомобиля / Эллис Р. – М. : Машиностроение, 1975. – 214 с.
128. Волков В. П. Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля : [навч. посіб.] / В. П. Волков – Харків : ХНАДУ, 2003. – 292 с.
129. Добровольський О. Л. Вплив коефіцієнта опору руху на величину вибігу автомобіля / О. Л. Добровольський // Вісник ВПІ. – 2010. – № 5. – С. 86–90

130. Говорущенко Н. Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта) : в 2 ч. Ч.1 / Н. Я. Говорущенко, А. Н. Туренко. – Харьков : Изд-во ХГАДТУ, 1998. – 255 с.

131. Макаров В. А. До питання про забезпечення стійкості руху автомобіля шляхом використання шин з перемінною або різною жорсткістю / В. А. Макаров, А. В. Костенко, О. В. Петров // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – 2005. – № 2. – С. 83–87.

132. Ребедайло В. М. Діагностика зміни технічного стану підвіски автомобіля / В. М. Ребедайло, О. Л. Добровольський // Збірник наукових праць ВДАУ. – 2005. – Вип. 23. – С. 137–142.

133. Подригало М. А. Новый подход к оценке тягового баланса автомобиля (в порядке обсуждения) / М. А. Подригало // Вчені записки Кримського інженерно-педагогічного університету. – 2009. – № 18. – С. 50–54.

134. Добровольський О. Л. Дослідження впливу експлуатаційних та конструктивних параметрів шини на вибіг автомобіля / О. Л. Добровольський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2010. – № 2 (53). – С. 47–52.

135. Добровольський О. Л. Визначення впливу кутів установки керованих коліс на вибіг автомобіля // Вісник східноукраїнського національного університету. – 2010. – № 6 (148). – С. 165–169.

136. Добровольський О. Л. Визначення роботи сили тертя в контактї шини з опорною поверхнею / О. Л. Добровольський // Автошляховик України. – 2010. – № 13. – С. 67–69.

137. Ларин А. Н. Определение потери на качение автомобильной шины / А. Н. Ларин, О. А. Артеменко // Современные проблемы геометрического моделирования : сб. трудов 4-й Междунар. научно-практической конф. – Ч. 3. – Мелитополь : ТГАТА, 1997. – С. 76–81.

138. Ларін О. М. Вплив кутів установки керованих коліс автомобіля на величину пробігу шини / О. М. Ларін, О. М. Яковлев, В. Б. Коханенко // Проблемы пожарной безопасности : Сб. научн. трудов. – Харьков : ХИПБ, 1998. – Вып. 4. – С. 23–27.

139. Определение профиля автомобильной шины при качении по опорной поверхности / А. С. Литвинов, Ю. П. Макеев, А. Н. Ларин [и

др.] // Пути совершенствования автомобиля и его агрегатов : сб. науч. трудов. – М. : МАДИ. 1988. – С. 34–38.

140. Лабораторія для дослідження властивостей пневматичних автомобільних шин / В. А. Макаров, А. В. Костенко, О. В. Петров [та ін.] // Вісник ДонНАСА. – 2005. – Вип. 7(55). – С. 101–104.

141. Добровольський О. Л. Метод діагностування кутів встановлення керованих коліс / О. Л. Добровольський // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2005. – № 31. – С. 57–59.

142. Теорія планування експерименту : навч. посіб. / [В.П. Нечаєв, Т.М. Берідзе, В.В. Кононенко. та ін.]. – К. : Кондор, 2005. – 232 с.

143. Кислицин Н. М. Долговечность автомобильных шин в различных режимах движения / Н. М. Кислицин. – Н. Новгород. : Волго-Вятское кн. изд, 1992. – 232 с.

144. Біліченко В. В. Вплив кутів установки керованих коліс на зношення шин / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський // Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень – 2011 : міжнар. науково-техн. конф., 15–28 бер. 2011 р. : зб. наук. праць. – Одеса, – 2011. – Т. 1. – С. 47–50.

145. Краткий автомобильный справочник / [А. Н. Поздиков, Ю. М. Власко, М. Б. Ляликов и др.]. – М. : Трансконсалтинг, НИИАТ, 1994. – 779 с.

146. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский – М. : Статистика, 1974. – 192 с.

147. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К. : Вища школа, 1976. – 184 с.

148. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер – М. : Металлургия, 1969. – 157 с.

149. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк – М. : Мир, 1972. – 376 с.

150. Ротштейн А. П. Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний / А. П. Ротштейн, Д. И. Кательников // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 5. – С. 53–61.

151. Кательников Д. И. Разработка метода идентификации нелинейных объектов для принятия решений на базе нечеткой логики : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Кательников Денис Иванович. – Винница, 1998. – 195 с.
152. Методы и системы принятия решений. Системы, основанные на знаниях / под ред. А. Н. Борисова. – Рига : РПИ, 1989. – 175 с.
153. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
155. Ротштейн О. П. Метод побудови функцій належності нечітких множин / О. П. Ротштейн, Г. О. Черноволик, Є. П. Ларюшкін // Вісник ВПІ. – 1996. – № 3. – С. 72–75.
156. Ротштейн А. П. Медицинская диагностика на нечеткой логике / А. П. Ротштейн. – Винница : Континент-ПРИМ, 1996. – 132 с.
157. Добровольський О. Л. Використання теорії нечітких множин для розв'язання практичних задач дослідження взаємодії автомобільної шини з опорною поверхнею / О. Л. Добровольський, В. В. Степанов // Проблеми і перспективи розвитку автомобільної галузі : всеукр. науково - техн. конф., 23-24 лист. 2011 р. : зб. наук. праць. – Донецьк, – 2011. – С. 143–145.
158. Правила дорожнього руху України. – Харків : Світлофор, 2001. – С. 88.
159. Ротштейн А. П. Проектирование и настройка нечетких правил ЕСЛИ–ТО для принятия решений / А. П. Ротштейн, Д. И. Кательников // Контроль і управління в технічних системах (КУТС–97) : Тези доповідей IV-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, – 1997. – Т. 1. – С. 50–56.
160. Rotshtein A. P. Design and Tuning of Fuzzy If–Then Rules for Automatic Classification / A. P. Rotshtein, D. I. Katelnikov // Proc. International Conf. «Annual Meeting of North American Fuzzy Information Processing Society. – NAFIPS '98». – Tampa (USA). – 1998. – P. 50–55.
161. Добровольський О. Л. Вплив кутів встановлення керованих коліс на витрату палива автомобіля / О. Л. Добровольський, Б. В. Злиденний // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 5. – С. 151–153.

Наукове видання

**Біліченко Віктор Вікторович
Добровольський Олександр Леонідович
Ребедайло Вадим Миколайович**

**КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ ВЗАЄМОДІЇ ШИНИ
З ОПОРНОЮ ПОВЕРХНЕЮ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено О. Добровольським

Підписано до друку 15.11.2013 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 7,39
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) Зам № 11-02

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.