

УДК 539.3:629.3.027.52

Ю.А. Петрова, О.О. Ларін*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ
ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН З ЖОРСТКОЮ ОСНОВОЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РІВНЯ
ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Дана робота присвячена дослідженню характеристик контактної взаємодії пневматичної шини з дорожнім покриттям. В ході роботи встановлено залежність якісних і кількісних характеристик плями контакту від величини вертикального навантаження. Дослідження проводились на основі низки скінчено-елементних моделей шини, що враховують основні її особливості, із застосування методу багатомасштабного моделювання з метою покращення результатів отриманих в області контакту. Отримані дані дозволили оцінити також і жорсткість пневматичної шини, шляхом визначення інтегральної реакції пневматичної шини в контакті.

Ключові слова: пневматична шина, контактна взаємодія, пляма контакту, багатомасштабний підхід, жорсткість.

Ю.А. Петрова, А.А. Ларин*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»***ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН С ЖЕСТКОЙ ОСНОВОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

Данная работа направлена на исследование характеристик контактного взаимодействия пневматической шины с дорожным покрытием. В ходе работы установлено зависимость качественных и количественных характеристик пятна контакта от величины перемещений, возникающих под действием вертикальной нагрузки. Исследования проводились на основе ряда конечно-элементных моделей шины, учитывающих все имеющиеся ее особенности, с применением метода многомасштабного моделирования с целью улучшения результатов полученных в области контакта. Полученные данные позволили оценить также и радиальную жесткость пневматической шины, путем определения интегральной реакции шины в контакте.

Ключевые слова: пневматическая шина, контактное взаимодействие, пятно контакта, многомасштабный подход, жёсткость.

I. Petrova, O. Larin*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»'***INVESTIGATION OF CONTACT INTERACTION OF PNEUMATIC TIRES WITH A
RIGID BASIS DEPENDING ON THE VERTICAL LOAD**

The paper deals with the study of the characteristics of contact interaction of pneumatic tire with the road surface. The regularities of qualitative and quantitative characteristics of contact patch arising (eventuating) under vertical load were defined in the research. The investigation was based on the series of FE models of pneumatic tire taking into account its main peculiarities. The multi-scale approach to the modeling was used to improve the results in the contact patch. The results also allowed to evaluate radial stiffness of pneumatic tire by determining the integral reaction to the displacement control load of the pneumatic tire in contact.

Keywords: pneumatic tire, contact interaction, contact patch, multiscale approach, stiffness.

Вступ. На сьогоднішній день значний сегмент сучасної промисловості займає транспортне машинобудування, важлива частина якого пов'язана з проектуванням та експлуатацією колісних транспортних засобів (ТЗ). У свою чергу, однією з важливих складових сучасних ТЗ є пневматична шина (ПШ). Її характеристики значною мірою визначають такі експлуатаційні показники ТЗ як надійність роботи, керованість ТЗ та стійкість руху, гальмівні якості, а також економічність та екологічність (вплив на витрати палива).

Ступінь контактної взаємодії пневматичної шини з твердою дорожньою основою є однією з важливих характеристик, що впливає на стійкість руху і керованість. Площа плями контакту та розмір контактної тиску є основними показниками, що визначають особливості контактної взаємодії деформованих твердих тіл. [1]. На значення цих кількісних характеристик суттєво впливають тип та рівень навантаження, а також режими роботи ТЗ. З іншого боку, багато в чому експлуатаційні характеристики ПШ визначаються жорсткісними характеристиками шини, які, в свою чергу залежать від рівня вертикального навантаження [2].

Дослідження ПШ у контактній взаємодії з дорогою ускладнюються низкою особливостей, а саме, наявністю шарів з ортотропними властивостями матеріалу, геометричної нелінійності,

нелінійності фізичних співвідношень для гумових матеріалів, контактної взаємодії. Урахування всіх цих особливостей призводить до суттєвого ускладнення математичної моделі. А при збільшенні розмірності нелінійної системи виникає проблема досягнення збіжності чисельних процедур, що застосовуються для пошуку розв'язку. З попередніх досліджень виявлено, що нехтування хоча б однією з цих особливостей призводить до суттєвого спотворення результатів [3]. Тож досягти потрібної збіжності результатів з достатньою густиною сітки для отримання достовірних результатів за одну ітерацію моделювання неможливо.

Тож для дослідження експлуатаційних характеристик, що визначаються ступенем контактної взаємодії ПШ з дорожнім покриттям доцільно використати підхід багатомасштабного субмоделювання [3].

Таким чином, у даній роботі пропонується визначити особливості формування характеристик контактної взаємодії ПШ з дорогою в залежності від розміру вертикального навантаження. А також, оцінити жорсткість ПШ, шляхом визначення інтегральної реакції області її у контакті з дорожньою основою.

Об'єкт дослідження. В даній роботі досліджуються характеристики пневматичної шини марки 205/55R16. Під час моделювання враховувались основні конструктивні особливості: багат шарову структуру, з явним урахуванням того, що кожен шар має власні механічні властивості та для деяких шарів їх криволінійну ортотропію (рис. 1).

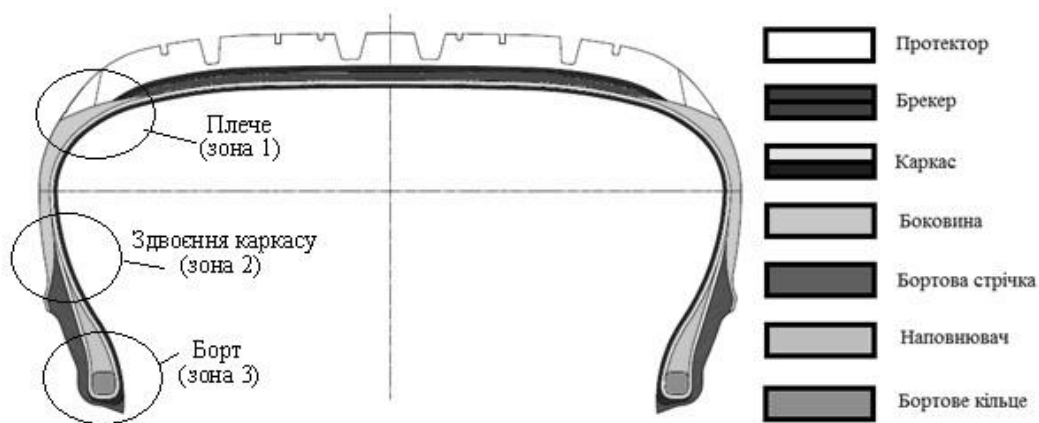


Рис. 1 - Структурна карта пневматичної шини

Механічні властивості матеріалів різних шарів шини помітно відрізняються. Тому, в даній роботі, при побудові СЕ моделей вони всі враховувались явним чином (табл. 1). Нелінійна поведінка гумових матеріалів враховувалась використанням моделі Нео-Гука, яку доцільно застосовувати у випадках великих прогинів і помірних деформацій (в межах 20%).

Таблиця 1 – Властивості складових композитних матеріалів

	Модуль пружності	Коефіцієнт Пуассона	Щільність
	E , [МПа]	ν	ρ , [кг/м ³]
Протектор	3.00	0.49	1200
Боковина	3.74	0.49	1200
Бортова стрічка	7.00	0.49	1200
Наповнювач	16.00	0.49	1200

Також слід зазначити наявність у конструкції композитних шарів з гумокордних матеріалів. Вони представляють собою гумову матрицю з текстильним (каркас) та металевим (брекер) кордом. Тож механічні властивості таких шарів мають ортотропний характер. Врахування такої криволінійної ортотропії здійснювалось шляхом введення локальних фінітно-тороїдальних систем координат, напрям осей яких повторює геометрію даних шарів. Розташування цих систем подано на рис. 2. У таблиці 2 наведені механічні властивості складових композитних шарів.

Таблиця 2

Властивості матеріалів кордних шарів (технічні константи)

	Корд		Гумова матриця	
	Модуль	Коефіцієнт	Модуль	Коефіцієнт

	пружності, [МПа]	Пуассона	пружності, [МПа]	Пуассона
	E	ν	E	ν
Каркас	77120	0,3	6	0,49
Брекер	74730	0,3		

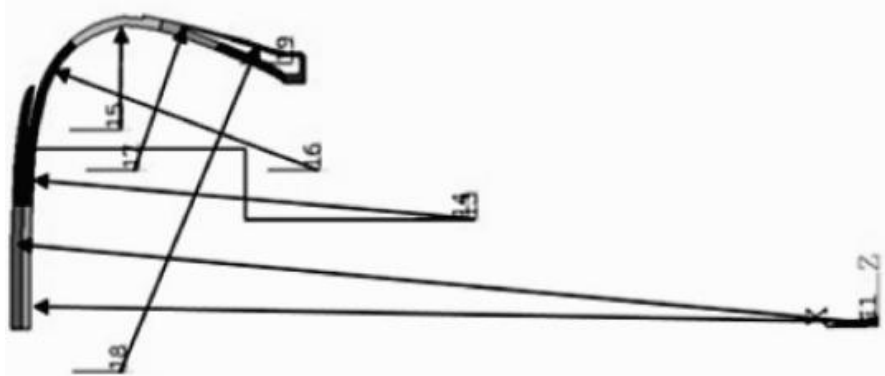


Рис. 2 – Розташування локальних фінітно-тороїдальних систем координат

Побудова СЕ моделей

В ході роботи було створено серію СЕ моделей. Спочатку створювалась повна СЕ модель пневматичної шини з урахуванням конструктивних особливостей, багатошарової структури, геометричної та фізичної нелінійності (рис. 3-4). Розмірність СЕ сітки, якої цілком достатньо для аналізу основних характеристик силової дії, визначення найбільш навантажених зон і відповідає вимогам щодо досягнення збіжності розрахунків, але не достатньо для визначення концентрації напружень та деформацій.



Рис. 3 – Об'ємна СЕ модель



Рис. 4 – Сегмент СЕ моделі

В якості кінематичних граничних умов виступає обмеження переміщень по всіх напрямках частини зовнішньої поверхні бортової стрічки, що імітує взаємодію з диском. Деформування шини аналізувалось в рамках її контактної взаємодії із дорожнім покриттям.

В рамках наведеної моделі проведено низку розрахунків, в ході яких варіювався розмір переміщень у вертикальному напрямку (10-25 мм), які дозволяють імітувати вертикальне робоче навантаження та прикладалися до дорожнього покриття. Тиск прикладався до внутрішньої поверхні каркаса. Враховується наявність площини симетрії.

Результати розрахунків першого етапу дозволяють зробити висновок про області моделі, які потребують додаткового уточнення. В даному випадку це область взаємодії шин з дорожнім покриттям (рис.5).

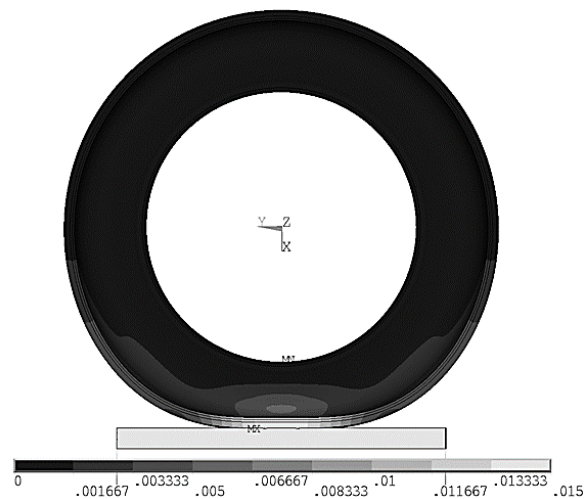


Рис. 5 – Деформована форма повної моделі

Отже, наступним етапом, згідно багатомасштабного підходу (рис.6), є уточнення результатів. Для цього з повної моделі вилучається сектор розміром 45 градусів у місці взаємодії шини з дорожнім покриттям (область контактної взаємодії до переходу у безконтактну). Для цієї моделі створено нову значно подрібнену сітку (кількість СЕ елементів сегменту дорівнює кількості СЕ елементів всієї шини), що дозволить отримати уточнені результати.

Третій етап було проведено з метою подальшого уточнення результатів. Він являє собою вилучення з 45-градусного сектору, ще меншого, у 15 градусів. Він відповідає області повного контакту. Усі розрахунки проводились з аналогічними граничними умовами, що й на попередньому етапі.

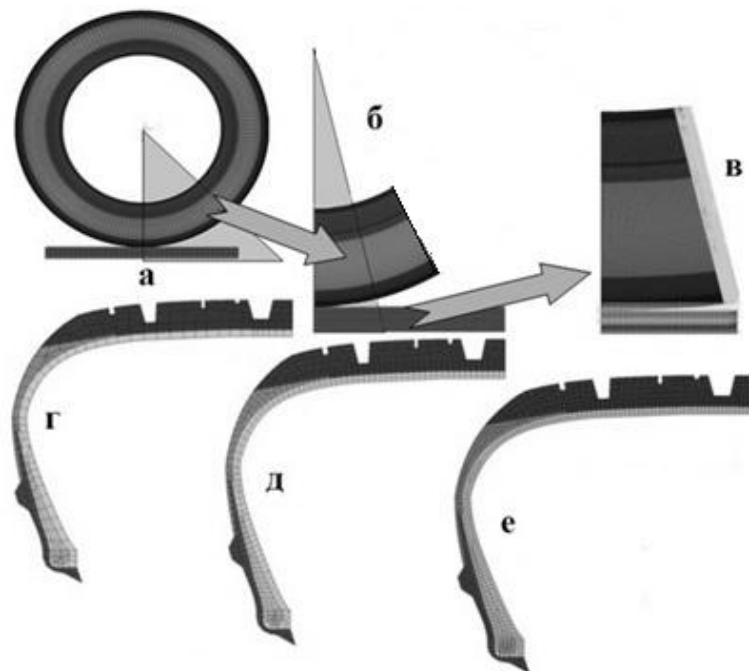


Рис. 6 – Загальна схема субмоделювання

(а – повна СЕ-модель шини з дорогою, б – 45-градусний сегмент, в – 15-градусний сегмент(центральный), г, д, е, – порівняння СЕ сіток)

Результати розрахунків. З найбільш важливих характеристик пневматичної шини є її радіальна жорсткість, яка має певні залежності від рівня вертикального навантаження. Рисунок 7 ілюструє залежність вертикальної складової реакції від рівня вертикального переміщення. При аналізі даної кривої спостерігається суттєво нелінійна поведінка залежності реакції від переміщень у робочій області навантаження.

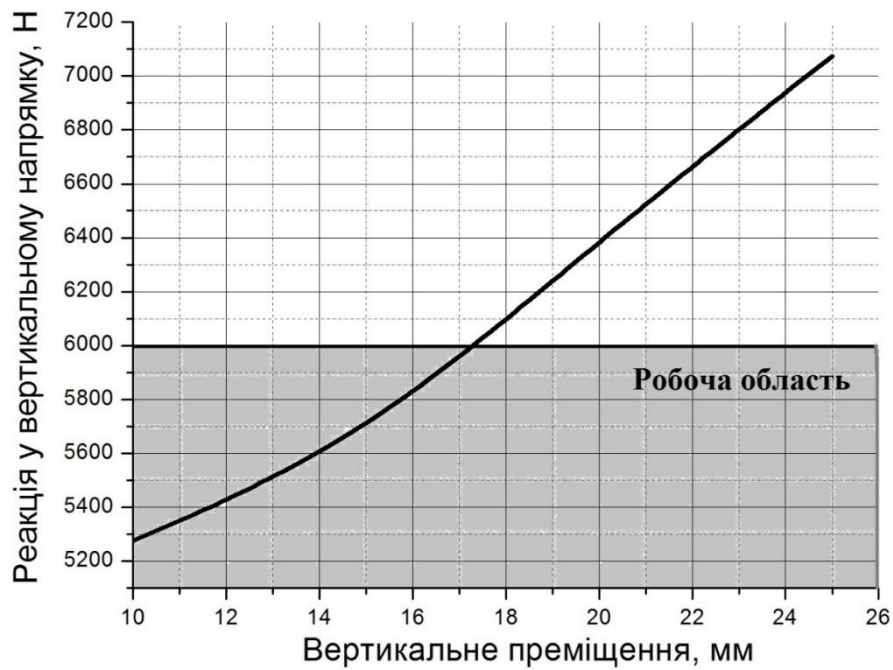


Рис. 7 – Залежність вертикальної складової реакції від рівня вертикального навантаження

Ступінь контактної взаємодії, в свою чергу, характеризується площею плями контакту, контактним тиском та розміром контактних напружень. На рис. 8 зображені плями контакту на різних масштабах розгляду: для сектору у 45 та 15 градусів зі значенням внутрішнього тиску 0.21 МПа і вертикальним переміщенням дорожньої основи на 25 мм. Проаналізував дані результати можна зробити висновок, що зі зменшенням масштабу пляма контакту суттєво уточнюється. Області, що зовсім не були в контакті перейшли в області проковзування. А значна частина плями, що належала до області проковзування перейшла у повний контакт.

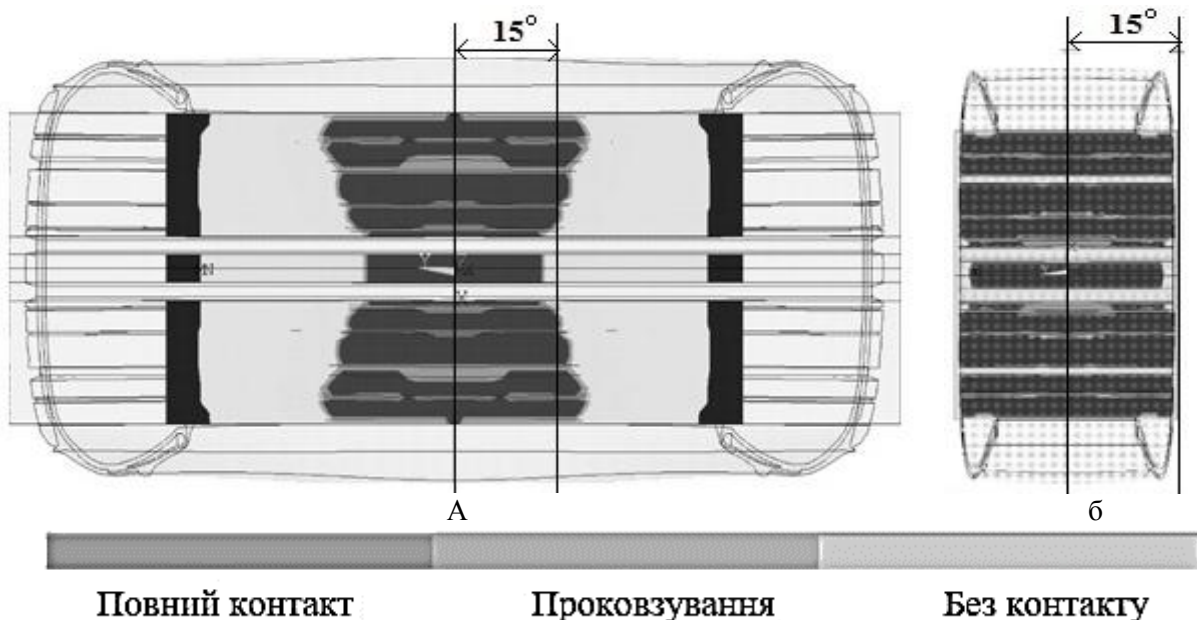


Рис. 8 – Залежність розміру і якості плями контакту від масштабу розгляду
 а – 45-градусний елемент, б – 15-градусний елемент

Як було зазначено вище, контактна взаємодія в першу чергу характеризується площею плями контакту, яка суттєво залежить як від рівня вертикального навантаження. На рис. 8 зображено залежність від розміру вертикального навантаження площі плями контакту в області

повного стисненого контакту та в зоні, де контактна взаємодія спостерігається, але є області з нещільним стисканням (проковзування). Найбільші значення площі плями контакту спостерігаються при значенні переміщень, викликаних вертикальним навантаженням 25 міліметрів. Залежність площі плями контакту від вертикального навантаження має суттєво нелінійний характер, що обумовлюється якісними змінами у характері розподілу плями контакту при збільшенні навантаження.

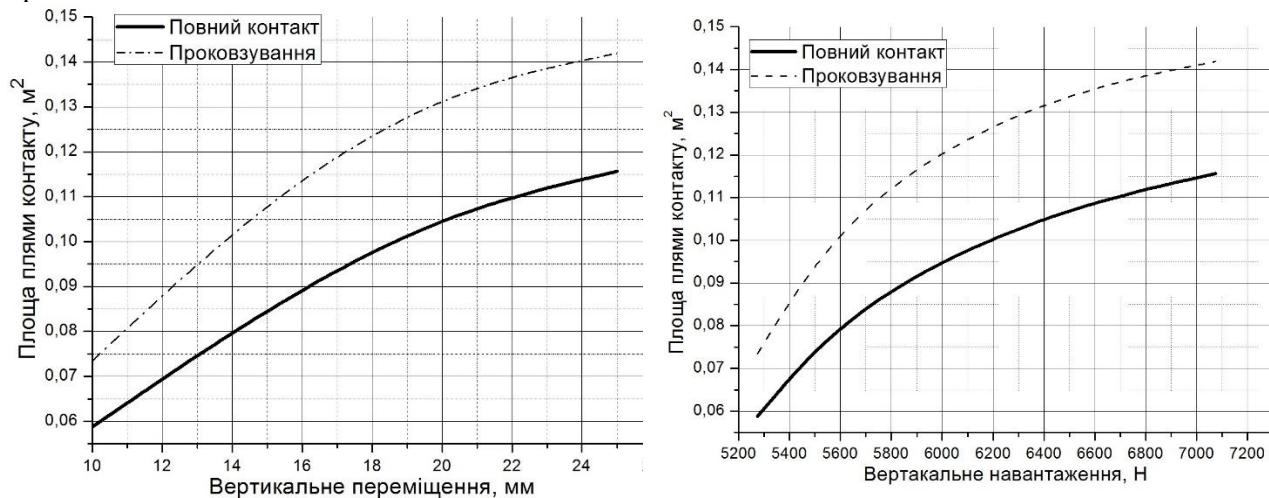


Рис. 8 – Залежність площі плями контакту від вертикального навантаження

Висновки. В даній роботі проведені розрахунки щодо визначення чисельних та якісних характеристик контактної взаємодії пневматичної шини з дорожнім покриттям в залежності від навантаження та масштабу розглядання.

Для цього було створено низку скінчено-елементних моделей ПШ, які враховують основні її структурні особливості. Проведено розрахунок напружено-деформованого стану, що утворився під дією внутрішнього тиску 2.1 МПа і переміщень у вертикальному напрямку, що виникли у наслідок дії вертикального навантаження, розміри яких варіювалися. Розрахунки проводились з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей.

На основі СЕ моделей, із застосуванням багатомасштабного підходу здійснено аналіз залежності площі плям контакту і контактного тиску від значення вертикального навантаження. Аналіз результатів таких розрахунків показав, що використання багатьох масштабів моделювання суттєво уточнює, як якісні так і кількісні характеристики плями контакту. Найбільші значення площі плями контакту спостерігаються при значенні переміщень 25 міліметрів.

Отримані дані також дозволяють оцінити жорсткість ПШ, шляхом визначення інтегральної реакції ПШ в контакті

Результати представлені у вигляді кривих залежності реакції від рівня вертикального навантаження.

1. J. Aguilar-Martínez, L. Alvarez-Icaza, Analysis of tire-road contact area in a control oriented test bed for dynamic friction models/ Aguilar-Martínez J, Alvarez-Icaza L// Revista Mexicana de Trastornos Alimentarios, 2015. – pp. 461-471.

2. K. Yong-Woo, Micromechanically consistent calculation of rotational stiffness of radial tire/ Yong-Woo K. // Journal of Mechanical Science and Technology 23, 2009. – pp. 1294 – 1305.

3. Ларін, О.О. Визначення циклів напружень елементів пневматичної шини з використанням процедури субмоделювання [Текст] / Ларін О.О., Петрова Ю.А. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динаміка та міцність машин №57 - Вестник НТУ "ХПИ", 2014. - С. 37-49.

Стаття надійшла в редакцію 30.04.2016