

Л.Є. Пелевін, к.т.н., проф.;
 М.М. Балака, асистент (КНУБА, Київ);
 Г.О. Аржаєв, магістр (МБК КНУБА, Миколаїв)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ «ПНЕВМАТИЧНА ШИНА – ОПОРНА ПОВЕРХНЯ, ЩО ДЕФОРМУЄТЬСЯ»

АНОТАЦІЯ. У статті наведено результати експериментальних досліджень параметрів реологічних моделей колеса з пневматичною шиною розміром 27.00-33 моделі В-71 та опорної поверхні, що деформується, у вигляді ґрунту типу суглинок. Одержані результати дозволяють аналітично визначити тягово-зчіпні властивості колеса з пневматичною шиною при його взаємодії з опорною поверхнею, що деформується, з урахуванням комплексу геометричних, кінематичних і силових факторів.

Ключові слова: реологічна модель, пневматична шина, опорна поверхня, деформація, жорстке колесо, експериментальне дослідження, модуль деформації, коефіцієнт в'язкості, нормальна жорсткість, загасаючі коливання.

АННОТАЦИЯ. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований параметров реологических моделей колеса с пневматической шиной размером 27.00-33 модели В-71 и деформирующейся опорной поверхности в виде почвы типа суглинок. Полученные результаты позволяют аналитически определить тягово-сцепные свойства колеса с пневматической шиной при его взаимодействии с деформирующейся опорной поверхностью с учетом комплекса геометрических, кинематических и силовых факторов.

Ключевые слова: реологическая модель, пневматическая шина, опорная поверхность, деформация, жесткое колесо, экспериментальное исследование, модуль деформации, коэффициент вязкости, нормальная жесткость, затухающие колебания.

SUMMARY. The paper presents results of experimental studies of the rheological models parameters of wheel with pneumatic tire sizes 27.00-33 model В-71 and the deformed base surface in the form of soil type loam. The received results allow to determine analytically the traction-clutch properties of wheel with pneumatic tire and its interaction with the deformed base surface, with allowing for complex geometric, kinematic and force factors.

Key words: rheological model, pneumatic tyre, base surface, deformation, hard wheel, experimental study, modulus of deformation, viscosity factor, normal stiffness, damped vibrations.

Вступ Одним із перспективних напрямів удосконалення математичного опису взаємодії пневматичної шини (еластичного колеса – ЕК) з плоскою опорною поверхнею, що деформується – ПДОП (ґрунтом, землею, сніговою цілиною тощо) є перехід від механічних моделей тіл, що контактують, [1] до їх реологічних аналогів [2].

Аналіз публікацій і стан проблеми

Для опису силової взаємодії шини з опорною поверхнею в [3] запропоновано моделі ЕК (великогабаритної пневматичної шини – ВГШ згідно до класифікації [4, 5]) і ПДОП (піщано-глинистого ґрунту типу суглинок), що складаються з нескінченно великого числа елементів різної реологічної природи, тобто паралельно розташованих тіл Гука, Ньютона і Сен-Венана для ЕК та Гука і Ньютона для ПДОП, що одночасно деформуються у радіальному напрямі (рис. 1), а в

[6] – залежності для переходу від параметрів механічної моделі ЕК до її реологічних аналогів.

Що стосується параметрів реологічних моделей опорних поверхонь руху позашляхових технологічних засобів (ПТЗ), то в [7, 8] розроблено методику та інформаційно-вимірювальне забезпечення їх визначення.

Мета та постановка задачі

Експериментальні дослідження параметрів реологічних моделей колеса з пневматичною шиною (ЕК) розміром 27.00-33 моделі В-71 за результатами його статичних та динамічних випробувань, а також ПДОП у вигляді зв'язного щільного (свіжозрізаного) ґрунту типу суглинок при коченні жорсткого колеса (ЖК) на веденому режимі його силового навантаження [9], причому геометричні

та вагові параметри ЖК повинні повністю відповідати параметрам зазначеного ЕК.

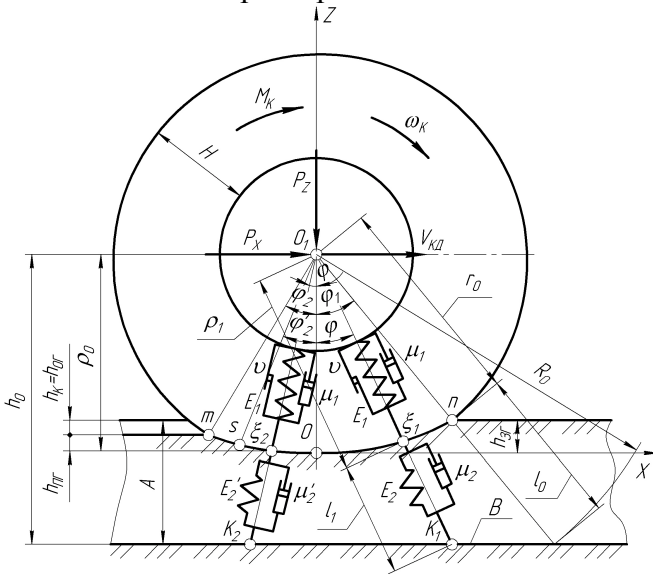


Рис. 1. Схема щодо визначення силової взаємодії ЕК з ПДОП при коченні колеса (при дії на вісь колеса тільки сили P_x для веденого режиму його силового навантаження, а під час прикладання до колеса тільки крутного моменту M_K – для вільного режиму): E_1, μ_1 – відповідно модуль деформації та коефіцієнт в'язкості шини (ЕК); E_2, μ_2, E'_2, μ'_2 – відповідно модулі деформації і коефіцієнти в'язкості ґрунту (ПДОП) в зонах завантаження (nO) і розвантаження (Om); ν – коефіцієнт, що показує, яку частину модуля деформації шини E_1 складають контактні напруження, що обумовлені постійним внутрішнім тертям у шині; A – величина шару ґрунту, що зазнає деформації; B – шар ґрунту, який не деформується

Виклад основного матеріалу

Експериментальні дослідження параметрів реологічних моделей ЕК і ПДОП було проведено авторами за програмою Міждержавної співпраці в галузі виробництва та випробувань пневматичних шин для позашляхових транспортно-технологічних засобів різного призначення в країнах СНД у липні – вересні 2011 року в умовах Полігону будівельно-дорожніх машин Воронежського державного архітектурно-будівельного університету під загальним керівництвом канд. техн. наук Василенко А.В. (Росія).

В якості об'єкта досліджень було прийнято пневматичну шину розміром 27.00-33 (760-838) моделі В-71 за ГОСТ 8430-2003 «Шины пневматические для строительных,

дорожных, подъемно-транспортных и рудничных машин. Технические условия», яка є найбільш характерним представником ВГШ індексів навантаження (LI) від 200 до 205 (відповідно зі стандартами Європейської організації з питань шин і ободів – ETRTO і Американської асоціації шин і ободів – TRA) для будівельно-дорожньої, підйомно-транспортної та рудничної техніки з максимальною швидкістю руху до 50 км/год, що застосовується, зокрема, на самохідних скреперах ДЗ-13Б і ДЗ-115А типорозміру СС-15.

Визначення параметрів реологічної моделі ЕК. При отриманні характеристик нормальної жорсткості – $P_Z = P_Z(h_Z)$, тобто при статичних випробуваннях ЕК, що не обертається ($\omega_K = 0$), і загасаючих коливань – $h_Z = h_Z(t)$, тобто при динамічних випробуваннях на плоскій опорній поверхні, що не деформується (ПНОП), передня (nO) і задня (Om) ділянки контакту ЕК з ПНОП симетричні та їх реологічні моделі працюють однаково.

Плоский напружено-деформований стан у контакті ЕК з ПНОП при $\omega_K = 0$ має вигляд [6]

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 E_1 + \dot{\varepsilon}_1 \mu_1 + \nu E_1 \operatorname{sgn} \varepsilon_1, \quad (1)$$

де $\varepsilon_1, \dot{\varepsilon}_1$ – відповідно відносні деформації та швидкості деформацій ЕК; sgn – функція Кронекера.

Використовуючи рівняння рівноваги колеса $P_Z = 2 \int_0^{\varphi_1} \sigma_1 \cos \varphi B_{\Pi} \rho d\varphi$, отримаємо

$$P_Z = 2 B_{\Pi} r_0 E_1 \cos \varphi_1 \left(\frac{\lambda}{2 \cos \varphi_1} \cdot \frac{r_0}{H} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\tau \dot{h}_Z}{H} \ln \frac{(1 + \sin \varphi_1)}{(1 - \sin \varphi_1)} \pm \nu \varphi_1 \operatorname{sgn} h_Z \right), \quad (2)$$

де h_Z – нормальна деформація шини; \dot{h}_Z – швидкість нормального деформування шини; λ – безрозмірний множник; φ_1 – центральний кут половини довжини контакту ЕК з ПНОП.

Вираз для λ має вигляд

$$\lambda = 2 \cos \varphi_1 \left[\varphi_1 - \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + \sin \varphi_1)}{(1 - \sin \varphi_1)} \cos \varphi_1 \right] \approx 0,551 \varphi_1^{2,88}. \quad (3)$$

Представимо рівняння (2) у наступному вигляді

$$P_Z = P_{ZE} \pm P_{Z\mu} \pm P_{Zv}, \quad (4)$$

де P_{ZE} , $P_{Z\mu}$, P_{Zv} – долі вертикального (нормального) навантаження, що врівноважується відповідно пружними силами, силами внутрішнього тертя, що пропорційні \dot{h}_Z , і силами постійного внутрішнього тертя.

При статичних випробуваннях ЕК

$$P_Z = P_{ZE} \pm P_{Zv}.$$

Тоді залежності для визначення E_1 і ν відповідно [6] мають вигляд:

$$E_1 = \frac{(P_Z - P_{Zv})H}{B_{II}r_0^2\lambda}; \quad (5)$$

$$\nu = \frac{P_{Zv}}{2B_{II}E_1r_0\phi_1 \cos \phi_1}. \quad (6)$$

Зазначити, що елементу Сен-Венана реологічної моделі ЕК властива відома невизначеність при відсутності переміщень (при $\dot{\epsilon} = 0$ він може приймати значення від $-\nu$ до $+\nu$, включаючи нульове). Тому рівняння (1) застосовне тільки до точок, у яких відбувається деформування шини або відновлення її деформації.

При загасаючих коливаннях відносно положення, відповідного h_{Z0} (рис. 2, б), які сполучаються силою P_Z ЕК деформуванням її до h_{Zmax} і подальшим швидким звільненням, виконується наступна умова рівноваги [6]

$$P_Z - P_{ZE} \pm P_{Zv} \pm P_{Z\mu} \pm P_{Zj} = 0,$$

де P_{Zj} – сила інерції мас, що разом коливаються, включаючи масу колеса з шиною.

У момент часу, що відповідає деформації h_{Z0} ,

$$P_Z = P_{ZE}; \quad P_{Zv} + P_{Z\mu} = P_{Zj},$$

тобто сили внутрішнього тертя долаються силою інерції, що обумовлена уповільненням руху \ddot{h}_{Z0} .

Таким чином,

$$P_{Z\mu} = P_{Zj} - P_{Zv}. \quad (7)$$

Запишемо

$$P_{Zj} = \frac{P_Z \cdot \ddot{h}_Z}{g}, \quad (8)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Тоді з урахуванням (7) і (8) з (2) маємо

$$\mu_4 = \frac{(P_Z \cdot \ddot{h}_{Z0} / g - P_{Zv})H}{B_{II}r_0\dot{h}_{Z0} \ln[(1 + \sin \phi_1) / (1 - \sin \phi_1)] \cos \phi_1}. \quad (9)$$

На рис. 2 наведені експериментальні характеристики статичної нормальної жорсткості (а) і вільних загасаючих коливань (б) колеса з пневматичною шиною розміром 27.00-33 моделі В-71 при внутрішньому тиску повітря $p_W = 0,35$ МПа.

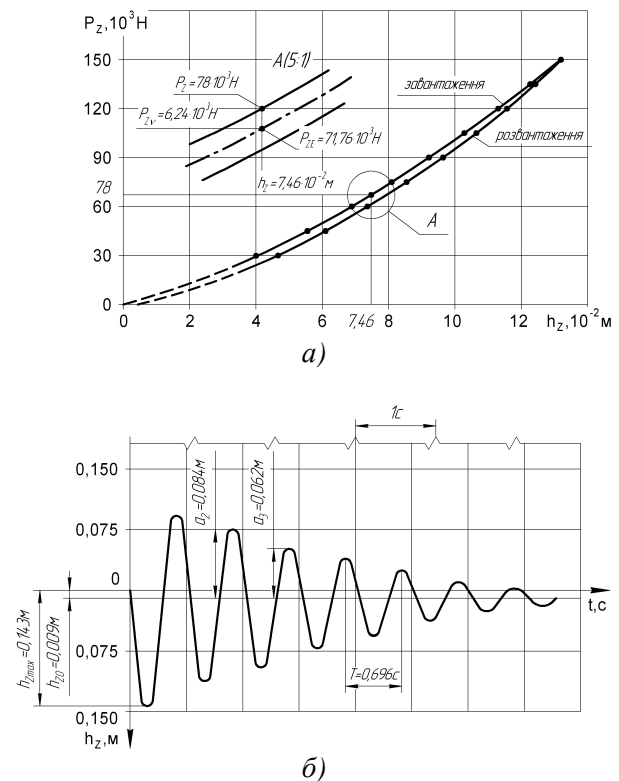


Рис. 2. Експериментальні характеристики статичної нормальної жорсткості (а) і вільних загасаючих коливань (б) колеса з пневматичною шиною розміром 27.00-33 моделі В-71 при $p_W = 0,35$ МПа і висоті скидання $H = 1,0$ м

Експериментальні характеристики $P_Z = P_Z(h_Z)$ і $h_Z = h_Z(t)$ отримані на стенді для дослідження криволінійного руху колеса [10] на цементобетонній поверхні за допомогою пристрою для вимірювання деформацій пневматичної шини (однокомпонентний варіант) [11] і світлопроменевого осцилографа К20-22.

При відомих геометричних і вагових параметрах вертикального навантаження ЕК – $r_0 = 1,115$ м; $H = 0,696$ м; $B_{II} = 0,725$ м; $P_Z = 78 \cdot 10^3$ Н і експериментально визначених параметрів контакту $\varphi_1 = 21^\circ$, що відповідає нормальній жорсткості $C_Z = 1045 \cdot 10^3$ Н/м, $P_{Zv} = 6,24 \cdot 10^3$ Н, за допомогою виразів (5) і (6) отримані значення $E_1 = 1811 \cdot 10^3$ Н/м² і $\nu = 6,229 \cdot 10^{-3}$.

Використання залежності (9) для отримання коефіцієнта в'язкості ЕК – μ_1 ускладнюється тим, що необхідні експериментальні дані щодо швидкості \dot{h}_{Z0} і прискорення \ddot{h}_{Z0} на момент, який відповідає нормальній деформації ЕК, тобто h_{Z0} . Задача може бути розв'язана або шляхом графічного диференціювання осцилограм коливань, тобто залежності $h_Z = h_Z(t)$ [6], що, однак, вносить значну похибку до визначення μ_1 , або за рахунок використання спеціальних датчиків (диференційних ланок), що ускладнює експериментальні дослідження.

Тому визначення μ_1 здійснювалося за формулою [12]

$$\mu_1 = -\frac{2m}{TL_K} \cdot \ln \frac{a_{i+1}}{a_i}, \quad (10)$$

де m – приведена маса ЕК, включаючи масу шини – m_{III} і обода – m_{OB} , кг; T – період коливань, с; L_K – довжина контакту при h_{Z0} , м; a_i, a_{i+1} – будь-які дві послідовні амплітуди загасаючих коливань, м.

При відомих $m = m_{III} + m_{OB} = 795 + 168 = 963$ кг і експериментально визначених $T = 0,696$ с, $L_K = 0,195$ м, $\ln \frac{a_3}{a_2} = \ln \frac{0,062}{0,084} = -0,3037$ за виразом (10) отримано значення $\mu_1 = 4,31 \cdot 10^3$ Н·с/м².

Визначення параметрів реологічної моделі ПДОП. Для ПДОП, з якими взаємодіє пневмоколісне ходове обладнання ПТЗ, деформованість її елементарних

об'ємів достатньо коректно відображає механічна модель тіла Кельвіна (паралельно з'єднаних фундаментальних тіл Гука і Ньютона, див. рис. 1), якій відповідає реологічне рівняння

$$\sigma_2 = \varepsilon_2 E_2 \pm \dot{\varepsilon}_2 \mu_2, \quad (11)$$

де $\varepsilon_2, \dot{\varepsilon}_2$ – відповідно відносні деформації та швидкості деформацій ПДОП.

Деформування ПДОП у зоні її контакту з ЕК відбувається як і останнього в радіальному напрямі по відношенню до його центра, тоді при коченні ЖК вона (відповідно до схеми на рис. 3) деформуватиметься, наприклад, в напрямках $\xi_1 K_1$ ($\xi_2 K_2$), а відносні деформації ε_2 і швидкості деформацій $\dot{\varepsilon}_2$ її елементарних об'ємів (в межах кута $d\varphi$) визначатимуться за формулами:

у зоні завантаження (nO) –

$$\varepsilon_{21} = (A + r_0 \cdot \cos \varphi_1) (1 - \cos \varphi_1 / \cos \varphi) / A;$$

$$\dot{\varepsilon}_{21} = -\omega_K \cdot \varepsilon_{21} \cdot \cos \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi / (\cos \varphi - \cos \varphi_1);$$

у зоні розвантаження (Om) –

$$\varepsilon_{22} = (A + r_0 \cdot \cos \varphi_1) (1 - \cos \varphi_2 / \cos \varphi) /$$

$$/ [A + r_0 (1 - \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2) \cdot \cos \varphi_1];$$

$$\dot{\varepsilon}_{22} = -\omega_K \cdot \varepsilon_{22} \cdot \cos \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi / (\cos \varphi - \cos \varphi_2).$$

Рівняння (11) для відповідних ділянок контакту ЖК з ПДОП (nO – індекс «21», Om – індекс «22», див. рис. 3) мають вид:

$$\sigma_{21} = \varepsilon_{21} E_2 + \dot{\varepsilon}_{21} \mu_2;$$

де E'_2 і μ'_2 визначаються за формулами $E'_2 = k_{ПП} \cdot E_2$ і $\mu'_2 = k_{ПП} \cdot \mu_2$ (тут $k_{ПП}$ – коефіцієнт пружності ПДОП).

Згідно з [13] $k_{ПП}$ визначається за формулою

$$k_{ПП} = \frac{h_{ПП}}{h_Z} = \frac{1 - \cos \varphi_2}{1 - \cos \varphi_1}, \quad (12)$$

де $h_{ПП}, h_Z$ – відповідно пружна і загальна деформація ПДОП; φ_1, φ_2 – відповідні кути контакту ЖК з ПДОП (рис. 3).

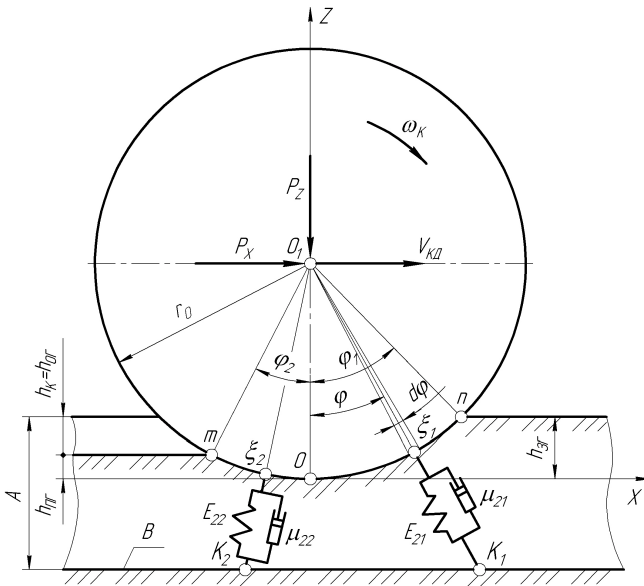


Рис. 3. Схема силової взаємодії ЖК з ПДОП

За умовою рівномірного розподілу контактних напружень по ширині протектора B_{II} у сучасних пневматичних шин [13] рівняння рівноваги ЖК на веденому режимі його силового навантаження [9] мають вигляд:

$$P_Z = B_{II} r_0 \left(\int_0^{\varphi_1} \sigma_{21} \cos \varphi d\varphi + \int_0^{\varphi_2} \sigma_{22} \cos \varphi d\varphi \right); \quad (13)$$

$$P_X = B_{II} r_0 \left(\int_0^{\varphi_1} \sigma_{21} \sin \varphi d\varphi - \int_0^{\varphi_2} \sigma_{22} \sin \varphi d\varphi \right). \quad (14)$$

У результаті спільного розв'язання (13) і (14) отримані вирази для визначення E_2 і μ_2 :

$$E_2 = \frac{P_X + P_Z \cdot C / D}{B_{II} r_0 (A + r_0 \cos \varphi_1) (F + CK / D)}; \quad (15)$$

$$\mu_2 = \frac{r_0}{V_{КД}} \cdot \frac{P_Z / [B_{II} r_0 (A + r_0 \cos \varphi_1)] - E_2 K}{D}, \quad (16)$$

де $C = \frac{\cos \varphi_1 (tg \varphi_1 - \varphi_1)}{A} +$
 $+ k_{ПП} \frac{\cos \varphi_2 (tg \varphi_2 - \varphi_2)}{A + r_0 (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) \cos \varphi_1};$
 $D = \frac{\cos \varphi_1 \ln(\cos \varphi_1)}{A} -$
 $- k_{ПП} \frac{\cos \varphi_2 \ln(\cos \varphi_2)}{A + r_0 (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) \cos \varphi_1};$

$$F = \frac{(\cos \varphi_1 - 1)^2}{2A} -$$

$$- k_{ПП} \frac{(\cos \varphi_2 - 1)^2}{2(A + r_0 (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) \cos \varphi_1)};$$

$$K = \frac{\sin \varphi_1 - \varphi_1 \cos \varphi_1}{A} +$$

$$+ \frac{\sin \varphi_2 - \varphi_2 \cos \varphi_2}{A + r_0 (1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2) \cos \varphi_1}.$$

Експериментальне визначення параметрів контакту ЖК з ПДОП – φ_1 і φ_2 , а також сили опору коченню P_X проведено за методикою та інформаційно-вимірювальним забезпеченням [8] на стенді для дослідження прямолінійного руху колеса [10]. Величина шару ґрунту – A , що зазнає деформації, визначалася за допомогою пристрою [14].

При відомих геометричних, вагових і швидкісних параметрах ЖК – $r_0 = 1,115$ м; $B_{II} = 0,725$ м; $P_Z = 78 \cdot 10^3$ Н; $V_{КД} = 0,75$ м/с та експериментально визначених параметрів контакту – $\varphi_1 = 23^\circ$, $\varphi_2 = 20^\circ$, ґрунту – $A = 0,145$ м і сили опору коченню – $P_X = 4,68 \cdot 10^3$ Н за допомогою виразів (12), (15) і (16) визначені реологічні параметри плоскої опорної поверхні, що деформується, тобто $E_2 = 448 \cdot 10^3$ Н/м², $E'_2 = 340 \cdot 10^3$ Н/м², $\mu_2 = 21,36 \cdot 10^3$ Н·с/м², $\mu'_2 = 16,21 \cdot 10^3$ Н·с/м².

Висновки

На стендах [10] з використанням методик [6, 7] і за допомогою інформаційно-вимірювального забезпечення [8, 11, 14] експериментально визначені параметри реологічних моделей пневматичної шини розміром 27.00-33 моделі В-71 і зв'язного щільного (свіжозрізаного) ґрунту типу суглинок. Отримані дані дозволяють аналітично визначити тягово-зчіпні властивості ЕК при його взаємодії з ПДОП з урахуванням комплексу геометричних, кінематичних і силових факторів [3].

Література

1. *Баловнев В. И.* Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.
2. *Водяник И. И.* Воздействие ходовых систем на почву / И. И. Водяник. – М. : Агропромиздат, 1990. – 172 с.
3. *Пелевин Л. Е.* Силовое взаимодействие эластичного колеса с деформирующейся опорной средой / Л. Е. Пелевин, М. Н. Балака, Г. А. Аржаев // *Интерстроймех-2007: материалы междунар. науч.-техн. конф., 11-14 сентября 2007 г.* – Самара, 2007. – С. 205–209.
4. *Савельев Г. В.* Автомобильные колеса / Г. В. Савельев. – М. : Машиностроение, 1983. – 151 с.
5. *TRA.* Стандарт шинной и ободной ассоциации США, 1986.
6. *Водяник И. И.* Определение параметров реологической модели пневматической шины / И. И. Водяник. – М., 1981. – 7 с. – Деп. в НИИАвтопром № Д634.
7. *Аржаєв Г.* Визначення параметрів реологічних моделей опорних поверхонь руху позаляхових транспортно-технологічних засобів / Г. Аржаєв, Л. Пелевін, М. Балака // *Машинознавство.* – 2008. – № 10 (136). – С. 22–24.
8. *Аржаєв Г.* Методика й інформаційно-вимірювальне забезпечення експериментального визначення параметрів реологічної моделі піщано-глинистих ґрунтів / Г. Аржаєв, Л. Пелевін, М. Балака // *Машинознавство.* – 2008. – № 12 (138). – С. 40–42.
9. *Автомобили.* Качение колеса. Термины и определения : ГОСТ 17697-72. – [Введен в действие 1973-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 26 с. – (Госстандарт СССР).
10. *Стенды* для испытания крупногабаритных пневматических шин / Н. А. Ульянов, П. И. Никулин, Н. П. Куприн, А. В. Василенко // *Строит. и дор. машины.* – 1982. – № 6. – С. 21–22.
11. *А. с. 1158887 СССР,* кл. G 01 M 17/02. Устройство для измерения деформаций пневматической шины / Г. А. Аржаев, А. Н. Кузьмин, П. И. Никулин, Ю. Н. Спасибухов (СССР). – № 3678025/27–11 ; заявл. 23.12.83 ; опубл. 30.05.85, Бюл. № 10.
12. *Малиновский Е. Ю.* Динамика самоходных машин с шарнирной рамой / Е. Ю. Малиновский, М. М. Гайцгори. – М. : Машиностроение, 1974. – 176 с.
13. *Ульянов Н. А.* Колесные движители строительных и дорожных машин : теория и расчет / Н. А. Ульянов. – М. : Машиностроение, 1982. – 279 с.
14. *Пат. 50440 U* Україна, МПК G 01 L 1/00, E 02 D 1/00. Пристрій для дослідження внутрішніх напружень у ґрунтовому напівпросторі / Аржаєв Г. О., Балака М. М., Пелевін Л. Є., Цепляєв А. С.; заявник і патентовласник Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – № u2009 12724 ; заявл. 07.12.09 ; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.

Рецензент: А.В. Фомін, к.т.н., професор (КНУБА, Київ)

Отримано: 14.09.2012р.