



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОЛЕСА З ПНЕВМАТИЧНОЮ ШИНОЮ НА ОПОРНІЙ ПОВЕРХНІ, ЩО ДЕФОРМУЄТЬСЯ

Балака М.М., Пелевін Л.Є., Аржаєв Г.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури,

Василенко А.В.

Воронезький державний архітектурно-будівельний університет, Росія

Розглянуто випробувальний стенд для дослідження роботи колеса з пневматичною шиною при прямолінійному русі на опорній поверхні, що деформується. Представлено результати експериментальних досліджень у вигляді залежностей, які характеризують вплив виду та стану опорної поверхні, розмірів і робочих характеристик пневматичних шин, внутрішнього тиску повітря в шинах на тягово-зчіпні властивості пневмоколісного рушія землерійно-транспортних машин.

Ключові слова: колесо з пневматичною шиною, опорна поверхня, деформація, експериментальне дослідження, пневмоколісний рушій, випробувальний стенд, тягово-зчіпні властивості, землерійно-транспортна машина.

Вступ. У цей час значну частину земляних робіт при створенні об'єктів промислового, цивільного, сільськогосподарського, гідротехнічного і дорожнього будівництва, а також відкритого видобування деяких корисних копалин і меліорації земель виконують землерійні, землерійно-транспортні та навантажувальні машини. Серед них все більшого розповсюдження набувають самохідні пневмоколісні машини, що мають низку суттєвих переваг у порівнянні з гусеничними машинами відповідних видів, до основних з яких слід віднести: більш високі транспортні швидкості та мобільність, суттєве зниження матеріалоемності ходового обладнання та експлуатаційних витрат [1].

Застосування колісних землерійно-транспортних машин (ЗТМ) підвищеної одиничної потужності й вантажопідйомності під час виконання значних обсягів земляних робіт дає суттєву економію коштів та енергоносіїв за рахунок більш ефективного використання потужності рушійної установки, зниження показників питомої витрати енергоносія на одиницю об'єму розробленого ґрунту, збільшення продуктивності праці та скорочення термінів будівництва. Шини в цих машинах є важливими конструктивними елементами їх ходового обладнання і значною мірою визначають експлуатаційні та техніко-економічні показники [2]. Тому підвищення ефективності колісних ЗТМ нерозривно пов'язане з дослідженням роботи пневмоколісного рушія і поліпшенням його робочих характеристик.

Актуальність досліджень. Для робочого циклу колісних ЗТМ характерними є два режими руху – тяговий і транспортний. Причому, тривалість тягового режиму роботи машини займає значну частину від загальної тривалості технологічного циклу. Так для скреперів і одноківшевих навантажувачів ця частка складає 10...20 %, для бульдозерів – 20...25 %, для автогрейдерів – 75...80 % [1, 3]. Враховуючи особливості роботи колісних ЗТМ, найбільший інтерес представляє прямолінійний рух машини, при якому реалізуються максимальні значення сили тяги, тягової потужності та інших тягово-зчіпних властивостей пневмоколісного рушія, зокрема, колеса з великогабаритною пневматичною шиною (ВГШ) [3, 4]. При цьому, зусилля на робочому органі, що долає опір ґрунту копанню, створюється за рахунок сили тяги, яка розвивається пневмоколісним рушієм. З погляду на реалізацію сили тяги, транспортний режим машини можна розглядати як окремий випадок більш загального – тягового режиму [3], при якому пневмоколісний рушій працює на ведучому режимі його силового навантаження.

У процесі експлуатації колесо з пневматичною шиною піддається силовому впливу від базової машини та опорної поверхні руху. Механічні властивості пневматичної шини чинять істотний вплив на здатність колеса сприймати і перетворювати зовнішні



навантаження в силу тяги. Пневмоколісний рушій при коченні по опорній поверхні сприймає зовнішні навантаження, що спричиняють до появи складних деформацій в пневматичній шині, зокрема, в її каркасі та брекері [4]. В свою чергу, оболонка пневматичної шини навантажена надлишковим внутрішнім тиском повітря, а деформації, що відбуваються в області контакту, викликають зміну внутрішнього тиску, частково перерозподіляючи їх дію на іншу частину оболонки. Розв'язання задачі визначення механічних властивостей пневматичної шини за її окремими параметрами, до яких можна віднести: конструктивні особливості, геометричні розміри, внутрішній тиск повітря тощо, навіть із застосуванням сучасних методів чисельного аналізу представляють досить значні труднощі [5], тому експериментальні дослідження роботи колеса з пневматичною шиною зберігають свою актуальність.

Постановка задачі. Провести випробування колеса з пневматичною шиною на опорній поверхні, що деформується, з метою отримання експериментальних залежностей, які характеризують вплив виду та стану опорної поверхні, розмірів і робочих характеристик ВГШ, внутрішнього тиску повітря в шинах на тягово-зчіпні властивості пневмоколісного рушія при прямолінійному русі.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження роботи окремого колеса з ВГШ можливі за наявності випробувального стенда, який дозволяє моделювати робочі процеси, характерні при роботі колеса на ЗТМ. Стендові випробування дозволяють зменшити похибку вимірювань порівняно з випробуваннями на машині за рахунок виключення впливу на досліджуваний процес конструктивної схеми ходового обладнання машини, особливо багатовісної [6]. Цей метод не тільки забезпечує отримання результатів з високим рівнем їх достовірності та відтворюваності, але й дозволяє значно скоротити витрати, у порівнянні з методом натурних випробувань.

Як стверджує д.т.н., професор Л. А. Хмара, створення в Україні власного центру випробувань і сертифікації продукції будівельно-дорожнього машинобудування, оснащеного, зокрема, універсальним стендом для дослідження ВГШ [7] і мехатронним комплексом для тягових випробувань ЗТМ [8], є дуже актуальною задачею, але потребує в цей час значних капітальних витрат і часу [9]. Разом з тим, протягом більше 30 років, на навчально-дослідницькому полігоні будівельно-дорожніх машин Воронежського державного архітектурно-будівельного університету (Росія, м. Воронеж) під керівництвом д.т.н., професорів М. О. Ульянова і П. І. Нікуліна та їх учнів було створено унікальну в СНД експериментальну базу [7, 10] для випробувань ВГШ розробки Державного НДІ великогабаритних шин (Україна, м. Дніпропетровськ).

У зв'язку з чим, експериментальні дослідження проводились авторами на самохідному стенді для дослідження роботи окремого колеса з ВГШ при прямолінійному русі за програмою Міждержавної співпраці в галузі виробництва, випробувань і експлуатації пневматичних шин для позашляхових транспортно-технологічних засобів різного призначення в країнах СНД у липні – серпні 2011 року в умовах Полігону будівельно-дорожніх машин Воронежського державного архітектурно-будівельного університету.

Стенд вибрано з умов можливості проведення експериментальних досліджень процесу взаємодії окремого колеса з пневматичними шинами діаметром від 1,45 до 2,8 м, шириною профілю до 1,3 м і вантажопідйомністю до 250 кН, за різних режимів його силового навантаження при прямолінійному русі на різних видах опорних поверхонь, в умовах, максимально наближених до реальних [10].

В якості об'єктів досліджень було прийнято серійні пневматичні шини розміром 27.00-33 моделі В-71 і 37.5-39 моделі Ф-7 за ГОСТ 8430-2003 і ГОСТ 26585-2003, що є характерними представниками ВГШ для будівельно-дорожньої, підйомно-транспортної та рудничної техніки з максимальною швидкістю руху до 50 км/год і які застосовуються на колісних ЗТМ підвищеної одиничної потужності й вантажопідйомності, зокрема, на самохідних скреперах ДЗ-13Б, ДЗ-115А і ДЗ-107А типорозмірів СС-15 і СС-25 відповідно.



Стенд (рис. 1) представляє собою систему з двох агрегатів: привідного агрегату, що забезпечує навантаження і привід колеса при випробуваннях, та гальмівного агрегату. В якості гальмівного агрегату застосовувався гусеничний трактор Т-100МГБ від роторного екскаватора ЭР-7А, обладнаного розширеним гусеничним ходом і ходозменшувачем, що забезпечує при русі «вперед» 12 ступенів швидкостей в діапазоні від 0,086 до 0,86 м/с [10].

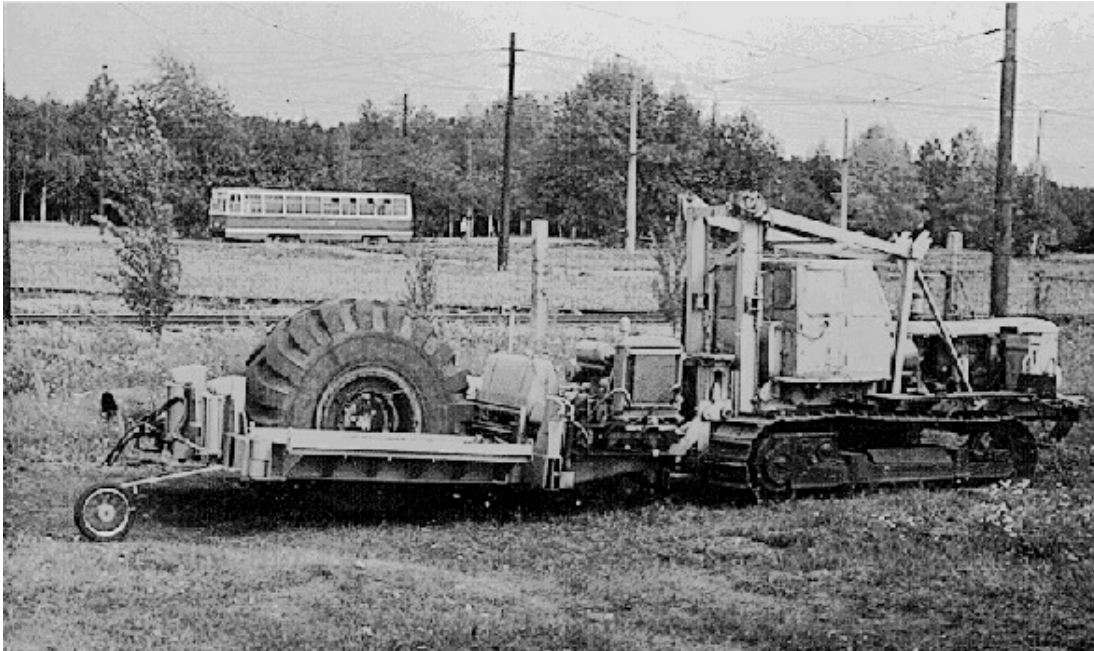


Рисунок 1 – Загальний вигляд стенда при випробуваннях колеса з пневматичною шиною розміром 37.5-39 моделі Ф-7

Перед початком проведення експериментальних досліджень виконувалася підготовка стенда, вимірювально-реєструвальної апаратури й опорної поверхні.

Підготовка стенда містила наступні операції: монтаж випробуваної ВГШ і встановлення її на стенд; завантаження стенда баластом для отримання відповідного вертикального навантаження на колесо з подальшим визначенням його величини за допомогою вірцевих динамометрів системи Токарева; монтаж вимірювально-реєструвальної апаратури; змащення і регулювання окремих вузлів; встановлення відповідного тиску повітря в шині.

Підготовка вимірювальних перетворювачів полягала у збиранні, регулюванні під відповідний розмір ВГШ та їх таруванні. Для забезпечення надійності та достовірності вимірювань, калібрування вимірювальних перетворювачів виконувалася двічі: до та після проведення випробувань.

Дослідження роботи окремого колеса з ВГШ проводилися на щільному свіжозрізаному і розпушеному ґрунтах типу суглинок. Для створення умов, наближених до тих, в яких працюють колісні ЗТМ, виконувалась відповідна підготовка ґрунтової опорної поверхні. Щільний свіжозрізаний ґрунт отримувался шляхом пошарового зрізання ґрунту та наступним плануванням перед проведенням дослідів на випробувальному майданчику довжиною біля 100 м і шириною до 5 м. Насипний розпушений ґрунт відсипався на ущільнену основу шаром товщиною 50 см, що відповідає шарам, які відсипаються потужними ЗТМ на будівництві. Після того, як шар відсипного ґрунту досягав потрібної товщини, його поверхня остаточно планувалася вручну. Після кожного дослідів виконувалось розпушення і розрівнювання поверхні, що дозволило проводити дослідів практично в ідентичних умовах. Геометричні параметри поздовжнього і поперечного профілю майданчика витримувалися у відповідності до вимог



ГОСТ 27247-87 (ИСО 7464-83), а фактичний профіль майданчика в процесі випробувань контролювався нівеліром.

Для дослідження необхідної кількості процесів, що одночасно відбуваються при роботі окремого колеса з ВГШ (без урахування енергетичних витрат силової установки), використовувалися датчики, встановлені на стенді [10, 11], за допомогою яких вимірювалися наступні параметри: крутний момент, що підводиться до пневмоколісного рушія – M_K ; сила тяги – T ; радіальна – Δ_r і тангенційна – Δ_T деформації шини; нормальні напруження в області контакту шини з опорною поверхнею (по виступу – σ_B і лобовій поверхні – σ_L ґрунтозачіпу протектора шини); швидкість проковзування елемента протектора шини – $\Delta V_{ПЗ}$; частота обертання колеса – n_K і мірного колеса – $n_{МК}$; час дослідження – t . Зібраний масив експериментальних даних було оброблено за допомогою комп'ютерних програм MathCAD і Excel.

Оскільки пневматична шина представляє собою оболонку з достатньо тонкими стінками, то її механічні властивості та здатність деформуватися під дією зовнішніх навантажень істотним чином залежать від величини внутрішнього тиску повітря, що представлено на рис. 2а. Аналіз залежності показав, що збільшення внутрішнього тиску повітря в шині спричинює непропорційне зниження величини радіальної деформації.

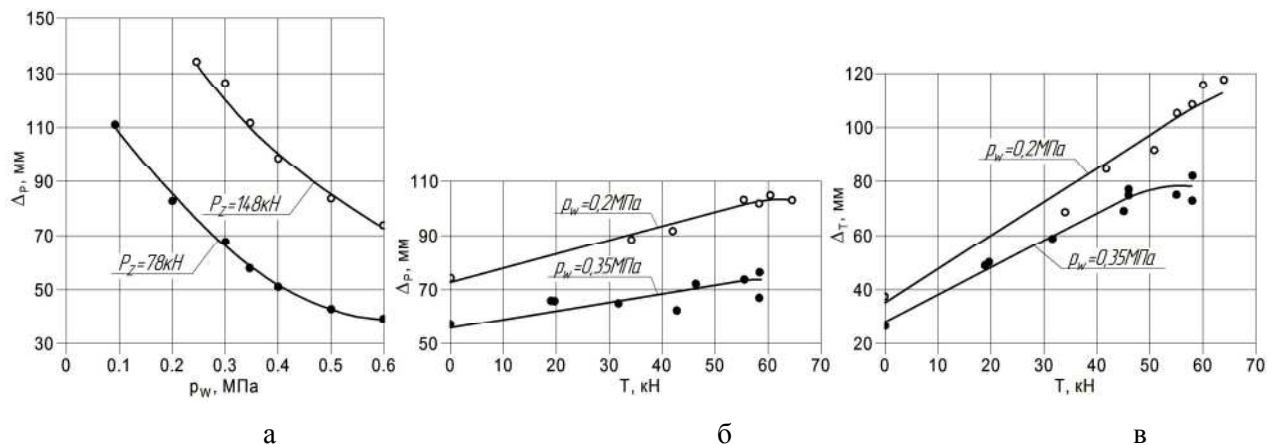


Рисунок 2 – Залежності радіальної деформації Δ_r (а) шини від внутрішнього тиску повітря p_w при різних P_z , радіальної Δ_r (б) і тангенційної Δ_T (в) деформацій шини від сили тяги T при різних p_w , при коченні колеса з шиною розміром 27.00-33 моделі В-71 по щільному суглинку

Величина і характер навантажень колеса чинять істотний вплив на деформаційний стан пневматичної шини [2, 3]. Для оцінки їх впливу у вигляді вертикального (нормального) навантаження – P_z і сили тяги – T на деформаційні характеристики шини використовувалися результати, що отримано під час проведення випробувань пневмоколісного рушія на тяговому режимі його силового навантаження при прямолінійному русі на щільному свіжозрізаному суглинку, і які показано на рис. 2.

Аналіз отриманих залежностей показав, що при збільшенні сили тяги значення обох складових деформацій збільшуються практично лінійно, але до певної межі, обмеженої змінами пружних властивостей шини і умовами прогресивного збільшення глибини колії при значному буксуванні колеса. Слід зазначити, що збільшення тангенційної деформації (див. рис. 2, в) проходить інтенсивніше за зростання радіальної деформації шини (див. рис. 2, б).

Сукупність зовнішніх силових факторів, що діють на пневмоколісний рушій в процесі його руху, врівноважується дією нормальних і дотичних напружень, що виникають при цьому в області контакту колеса з опорною поверхнею. Причому дотичні напруження контактуючих тіл і реалізуються у вигляді сил тертя і зсуву при заглибленні ґрунтозачепів в опорну поверхню, що деформується [3]. Розміри і форма поверхні контакту безпосередньо пов'язані з величиною і характером розподілу контактних



напружень, які, в свою чергу, пов'язані з відношенням механічних властивостей контактуючих тіл, спрямованістю і величиною зовнішніх навантажень [5].

Визначення контактних напружень шини розміром 37.5-39 моделі Ф-7 при внутрішньому тиску повітря $p_w = 0,2$ МПа здійснювалося при коченні колеса по розпушеному вологому суглинку ($w = 26\%$) на вільному режимі його силового навантаження. На рис. 3 наведено епюри нормальних контактних напружень σ_B по довжині і ширині контакту шини в центральних поздовжній (координата x) і поперечній (координата y) площинах колеса.

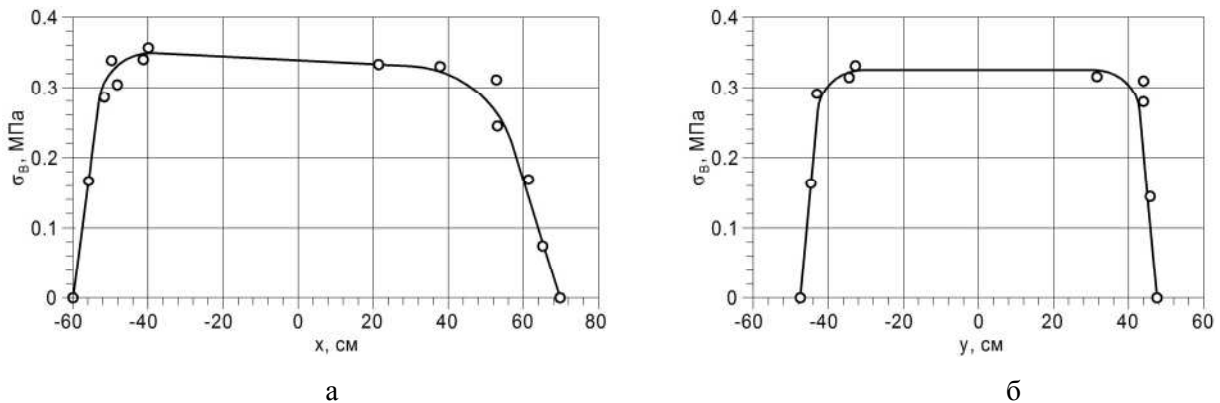


Рисунок 3 – Епюри нормальних контактних напружень σ_B по довжині (а) і ширині (б) контакту шини розміром 37.5-39 моделі Ф-7, при коченні колеса по розпушеному суглинку при $p_w = 0,2$ МПа

Характер епюр нормальних контактних напружень в області контакту шини розміром 37.5-39 моделі Ф-7 з опорною поверхнею, що деформується, повністю відповідає експериментальним даним, що отримано в [3], наприклад, для шини розміром 21.00-33 моделі ВФ-166А.

Опір коченню, поряд із тяговим к.к.д., є одним з показників, що дозволяє оцінити ефективність роботи пневмоколісного рушія. Величина опору коченню пневмоколісного рушія, що прийнято оцінювати моментом опору коченню M_f або безрозмірним коефіцієнтом опору коченню f , залежить від багатьох параметрів пневматичної шини, механічних властивостей опорної поверхні і режиму навантаження колеса під час його руху [3, 6].

Численними дослідженнями встановлено, що навантаження колеса поздовжньою силою призводить до зростання опору коченню. Цю залежність наочно представлено на рис. 4а при коченні колеса з шиною 37.5-39 моделі Ф-7 по розпушеному вологому суглинку ($w = 26\%$) при внутрішньому тиску повітря в шині $p_w = 0,3$ МПа і вертикальному навантаженні $P_z = 92$ кН.

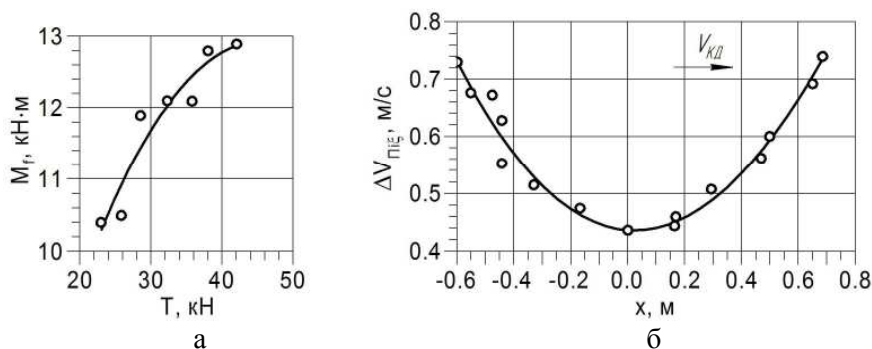


Рисунок 4 – Залежності моменту опору коченню M_f від сили тяги T (а) і швидкості проковзування елемента протектора ΔV_{pg} від поздовжньої координати контакту x (б), при коченні колеса з шиною розміром 37.5-39 моделі Ф-7 по розпушеному суглинку



Основні причини цього явища полягають в наступному: під дією сили тяги зростає тангенційна деформація шини, що призводить до збільшення зміщення рівнодіючої нормальних елементарних сил в контактні від вертикалі, яка проходить через вісь колеса і, крім того, збільшуються складові сил тертя в контактні. При цьому, зсув ґрунту в контактні відбувається інтенсивніше і при значному буксуванні це призводить до прогресивного збільшення глибини колії.

Аналіз залежності, представленої на рис. 4б, показав, що збільшення швидкості проковзування елементів протектора шини відносно опорної поверхні, що деформується, суттєво вплине на тягово-зчіпні властивості рушія, а також призведе до значного збільшення абсолютної величини шляху проковзування шини відносно опорної поверхні та до більш інтенсивного зношення протектора шини і зниження терміну її служби.

Найбільш повне уявлення про тягово-зчіпні властивості пневмоколісного рушія дає тягова характеристика. Стосовно тягових випробувань з використанням спеціальних стендів мова йде про окреме колесо з пневматичною шиною, що дозволяє за допомогою тягової характеристики проаналізувати потенційні тягово-зчіпні можливості пневмоколісного рушія незалежно від особливостей ходового обладнання базової машини [6].

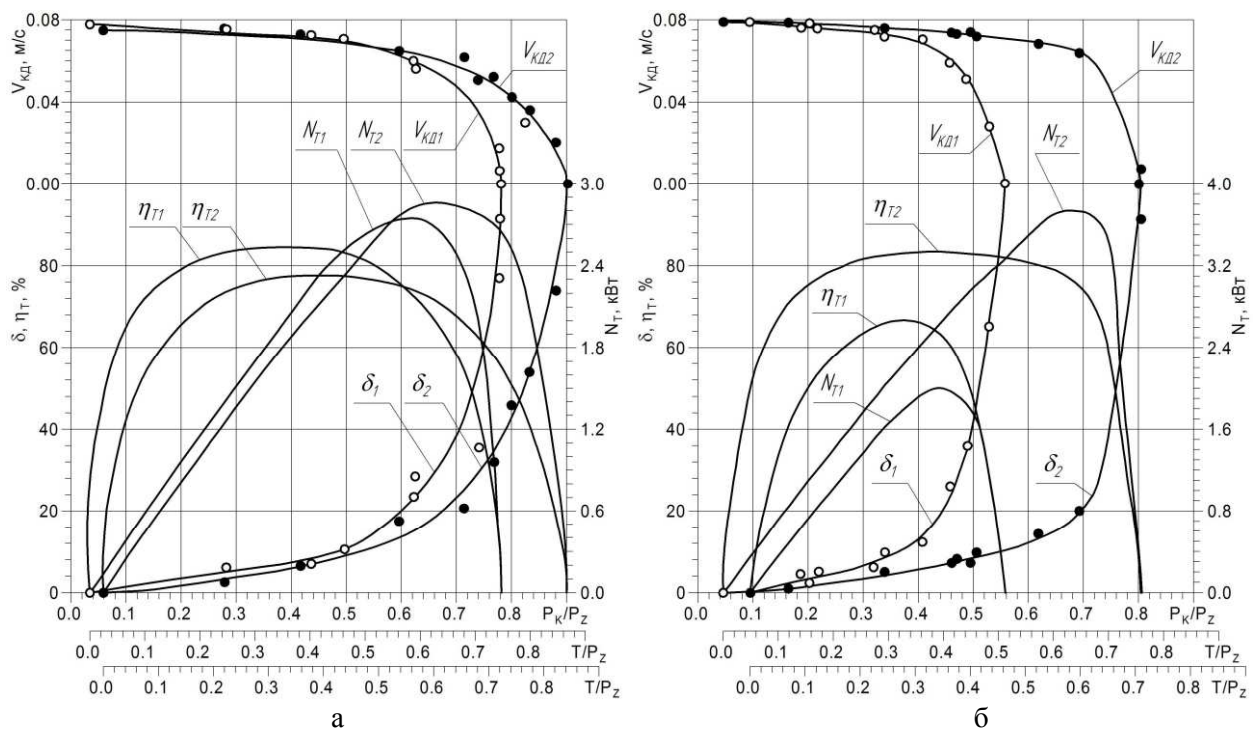


Рисунок 5 – Тягові характеристики колеса з пневматичною шиною розміром:
 а – 27.00-33 моделі В-71 на щільному суглинку при $p_w = 0,35$ МПа (1) і $p_w = 0,2$ МПа (2);
 б – 37.5-39 моделі Ф-7 на розпушеному (1) і щільному (2) суглинку при $p_w = 0,2$ МПа

На рис. 5а представлено експериментальну тягову характеристику колеса з пневматичною шиною розміром 27.00-33 моделі В-71 на щільному суглинку при вертикальному навантаженні $P_z = 78$ кН і різних значеннях внутрішнього тиску повітря p_w . Аналіз тягової характеристики показує, що зниження внутрішнього тиску повітря в шині p_w від 0,35 до 0,2 МПа призводить до збільшення коефіцієнта зчеплення φ на 12 %, максимального значення тягової потужності N_{Tmax} на 4 % і супроводжується загальним зниженням інтенсивності проковзування пневмоколісного рушія. Водночас знижується максимальна величина тягового к.к.д. η_T на 9 %, що спричинено зростанням опору коченню.

Для наочної демонстрації впливу виду опорної поверхні на тягово-зчіпні властивості пневмоколісного рушія, на рис. 5б представлено експериментальну тягову



характеристику колеса з пневматичною шиною розміром 37.5-39 моделі Ф-7 на щільному і розпушеному суглинку при вертикальному навантаженні $P_z = 92$ кН. Зниження міцності та зв'язності ґрунтової поверхні значно погіршило характер і основні показники тягової характеристики. При цьому, зменшились величина коефіцієнта зчеплення φ на 40 %, максимальне значення тягового к.к.д. η_T на 20 %, а максимальне значення тягової потужності $N_{T_{\max}}$ на 45 %.

Висновки. На самохідному стенді [10] за допомогою вимірювально-реєструвальної апаратури [11] проведено випробування окремого колеса з пневматичною шиною за різних режимів його силового навантаження при прямолінійному русі на різних видах опорних поверхонь, в умовах, максимально наближених до реальних. Представлені результати експериментальних досліджень показали, що до числа факторів, які суттєво впливають на тягово-зчіпні властивості колеса з ВГШ, слід віднести величину внутрішнього тиску повітря в шині, а також вид і стан опорної поверхні руху колеса.

Використання отриманих результатів, в подальшому, при визначенні зношення протектора шини і строку її служби, дозволить обґрунтувати і розрахувати потреби у матеріально-технічних засобах на експлуатацію ЗТМ підвищеної одиничної потужності й вантажопідйомності, зокрема, самохідних скреперів типорозмірів СС-15 і СС-25, обладнаних пневматичними шинами розміром відповідно 27.00-33 і 37.5-39.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дорожно-строительные машины : учебник / [Вавилов А. В., Леонович И. И., Максименко А. Н. и др.]. – Минск : Технопринт, 2000. – 515 с.
2. Балака М. М. Тенденції розвитку колісних землерийно-транспортних машин / М. М. Балака // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів, 6–8 листоп. 2012 р. : Тези доп. – К. : КНУБА, 2012. – Ч. 1. – С. 83-84.
3. Ульянов Н. А. Колесные движители строительных и дорожных машин : теория и расчет / Н. А. Ульянов. – М. : Машиностроение, 1982. – 279 с.
4. Скорняков Е. С. Крупногабаритні шини автомобілів та тракторів : монографія / Е. С. Скорняков. – Дніпропетровськ : Пороги, 2000. – 264 с.
5. Бухин Б. Л. Введение в механику пневматических шин / Б. Л. Бухин. – М. : Химия, 1988. – 224 с.
6. Петрушов В. А. Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В. А. Петрушов, С. А. Шукшин, В. В. Московкин. – М. : Машиностроение, 1975. – 225 с.
7. Пелевін Л. Є. Аналіз технічних рішень випробувальних стендів для дослідження роботи колеса з пневматичною шиною / Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв, М. М. Балака // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2007. – Вип. 69. – С. 64-70.
8. Балака М. М. Застосування принципів мехатроніки при тягових випробуваннях позашляхових технологічних засобів / М. М. Балака, Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв // Вестник Харьк. нац. автомобильно-дорожного ун-та. – 2012. – Вип. 57. – С. 55-58.
9. Хмара Л. А. Анализ тенденций и перспектив развития в Украине подъемно-транспортных, дорожно-строительных и землеройных машин / Л. А. Хмара // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – 2008. – Вип. 46. – С. 5-8.
10. Стенды для испытания крупногабаритных пневматических шин / Н. А. Ульянов, П. И. Никулин, Н. П. Куприн, А. В. Василенко // Строительные и дорожные машины. – 1982. – № 6. – С. 21-22.
11. Пелевін Л. Є. Інформаційно-вимірювальне забезпечення стендових випробувань окремого колеса з пневматичною шиною / Л. Є. Пелевін, Г. О. Аржаєв, М. М. Балака // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2007. – Вип. 70. – С. 65-71.



Балака М.Н., Пелевин Л.Е., Аржаев Г.А., Василенко А.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КОЛЕСА С ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНОЙ НА ДЕФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрен испытательный стенд для исследования работы колеса с пневматической шиной при прямолинейном движении на деформирующейся опорной поверхности. Представлены результаты экспериментальных исследований в виде зависимостей, характеризующих влияние вида и состояния опорной поверхности, размеров и рабочих характеристик пневматических шин, внутреннего давления воздуха в шинах на тягово-сцепные свойства пневмоколёсного движителя землеройно-транспортных машин.

Ключевые слова: колесо с пневматической шиной, опорная поверхность, деформация, экспериментальное исследование, пневмоколёсный движитель, испытательный стенд, тягово-сцепные свойства, землеройно-транспортная машина.

Balaka M.N., Pelevin L.E., Arzhaev G.A., Vasilenko A.V. EXPERIMENTAL OPERATIONAL STUDIES OF THE WHEEL WITH A PNEUMATIC TYRE ON THE DEFORMATION BEARING SURFACE

The test bench for the operational study of the wheel with a pneumatic tyre while rectilinear motion on the deformation bearing surface is considered. The results of experimental studies are presented as a dependence that characterizes the influence of the type and condition of the bearing surface, sizes and performance characteristics of the pneumatic tyre, internal air pressure in the tyres on the traction-clutch qualities of the earth-moving machines pneumatic mover.

Keywords: wheel with a pneumatic tyre, bearing surface, deformation, experimental study, pneumatic mover, test bench, traction-clutch qualities, earth-moving machine.