

Гаврон Н.Б.,  
Кучвара І.М.,  
Шевчук О.С.,  
Конончук О.,  
Матвіїшин А.Й.,  
Коваль Ю.Б.

Тернопільський національний  
технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
м. Тернопіль, Україна,  
E-mail: ivan.kuchvara@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО  
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

УДК 669.539

*В роботі обґрунтовано методику та представлено результати польових експериментальних досліджень сільськогосподарського причепа типу ПТС. Встановлено точні значення величин напружень, що виникають в конструкції несучої рами транспортного засобу при експлуатації в польових умовах. Також наведено аналітичні залежності для визначення критеріїв локального руйнування для оцінювання показників довговічності відкритих, або замкнутих тонкостінних профілів несучих систем досліджуваної техніки.*

**Ключові слова:** сільськогосподарська транспортна техніка, транспортування, напруження, експлуатаційні властивості, тракторний причеп, надійність.

**Вступ.** На сучасному рівні розвитку с/г техніки, можливостей розвитку технічних засобів та відповідного програмного забезпечення, актуальним є розвиток нових методів обґрунтування експлуатаційної надійності і живучості мобільних машин. Вимоги, що ставляться до надійності с/г машин передбачають забезпечення заданого рівня довговічності їхніх несучих систем, які, як правило, мають мати довговічність, рівну ресурсу машини до капітального ремонту або списання. Оцінка втомної довговічності металоконструкцій несучих систем мобільних с/г машин, зокрема транспортних с/г причепів, які працюють в складних експлуатаційних умовах при циклічних навантаженнях, пов'язана з вирішенням ряду основних завдань: оцінкою параметрів експлуатаційного навантаження, визначенням характеристик опору втомі натурних вузлів рамної конструкції, обмежуючих її довговічність, розрахунком довговічності, також аналітичних досліджень формування складних напружено – деформованих та граничних станів, систем критеріїв деформацій та руйнування. Характерною особливістю є те, що граничні стани з достатньою точністю ідентифікуються на етапі проектування при певному досвіді експлуатації аналогічних об'єктів, але є важко ідентифікованими прогнозованими для малосерійних об'єктів [1, 5, 10].

**Аналіз літературних джерел.** В цілому, граничним станом є технічний стан розглядуемого об'єкта, при якому його подальша експлуатація недопустима. Для характеристик умов і моменту настання граничного стану, контролю показників надійності встановлюються критерії відказів і граничних станів, які є базою розрахункової оцінки показників надійності технічних систем [1, 2]. Критеріальна оцінка міцності і прогнозування ресурсу роботи металоконструкцій сільськогосподарських машин складається з теоретичної та експериментальної частин [3]. Складність вироблення критеріїв оцінки міцності і прогнозування ресурсу роботи, полягає перш за все у різнопрофільному наборі складових елементів цих конструкцій та специфіки їх з'єднань між собою. Оптимізувати такі конструкції складно через відсутність фактичних характеристик їх циклічної дефектостійкості зі структурною зміною матеріалу в біляшовній зоні у відповідності до конкретної технології виготовлення, особливо, складних зварних стикових з'єднань, а також

геометрії поперечних перетинів тонкостінних елементів, відкритого та замкнутого профілю. Реалізація методики вироблення критеріїв оцінки міцності і прогнозування ресурсу роботи конструкцій, включає одержання аналітичних залежностей для визначення критеріїв локального руйнування, в даному випадку відкритих або замкнутих тонкостінних профілів [3, 4]:

1. критичне значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН)  $K_{Ic}$ ,  $K_{IIc}$ ,  $K_{IIIc}$ ;
2. критичне розкриття берегів тріщини в її вершині  $\delta_c$ ;
3. густину енергії руйнування або ефективну поверхневу енергію  $\gamma_e$  – роботу яку необхідно затратити на утворення одиниці вільної поверхні.

Також з метою кількісної оцінки опору розвитку тріщини застосовують поняття інтенсивності вивільнення енергії деформації  $G_{Ic}$ ,  $J$ -інтеграл.

Так як тонкостінні елементи тримких конструкцій сільськогосподарських машин часто працюють при дії сил розтягу і згинальних моментів, то їх руйнування частіше всього відбувається шляхом розвитку тріщин нормального відриву. В такому випадку НДС залежить від величини  $K_I$  [5].

Основні характеристики тріщиностійкості зв'язані наступним співвідношенням [1, 4]

$$2 \cdot \gamma_e = \sigma_0 \cdot \delta_c = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot K_{Ic}^2 = G_{Ic} = J_{Ic}. \quad (1)$$

**Результати досліджень.** У с/г машинобудуванні поширеними є металокопункції тримких рам мобільних машин, які виготовляються з гнучого чи гарячекатаного швелера, тонкостінних труб. Оскільки для швелера найбільш ймовірним місцем зародження тріщин є вершина його полицок, КІН визначається у вершині тріщини при дії на швелер відповідного зовнішнього силового фактору. Рішення аналогічної задачі теорії тріщин пов'язане із значними труднощами, які виникають з причини складної для даних розрахунків конфігурації швелера. Для розв'язання такої задачі застосовується інтерполяційний метод Нейбера.

Для знаходження величини розкриття тріщини, яка виходить з вершини полиці швелера, що знаходиться під дією згинального моменту у залежності від її розмірів доцільним є застосування відомого методу еквівалентних станів, у результаті одержується

$$\begin{aligned} \delta_I = & 6,394 \cdot \frac{\sigma_T}{I^2 \cdot E} \cdot \ln \left( \sec \left( \frac{\pi \cdot \sigma_{(0)}}{2 \cdot \sigma_T} \right) \right) \times \\ & \times \frac{\left( \left( 1 - \frac{l}{H + 2 \cdot b} \right) \cdot l \cdot h \right)}{\left( \left( 1 - \frac{l}{H + 2 \cdot b} \right) \cdot h + ((H + 2 \cdot b) + 7,99 \cdot l) \right)} \times \\ & \times \left[ \left( \frac{H}{2} \right)^{0,5} - \left( \frac{h}{2} \right)^{0,5} \cdot \left( 1 - \frac{h}{h-l} \right) \right]^4 \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\delta_I$  – величина розкриття тріщини;  $\sigma_{(0)}$  – напруження якими розтягується пластина;  $\sigma_T$  – межа текучості металу швелера;  $E$  – модуль пружності першого роду.

При розгляді тонкостінної прямокутної труби, що знаходиться під дією стисненого кручення (наприклад, з'єднання поперечини і лонжерона с/г причепа), яка ослаблена наскрізною тріщиною, що поширюється з кута перетину у напрямку кожної з стінок КІН для горизонтальної стінки  $K_{I(1)}$  і для вертикальної стінки  $K_{I(2)}$

$$\begin{cases} K_{I(1)} = \sigma_{\omega} \sqrt{a \cdot \varepsilon_1} \cdot F_1^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1) \\ K_{I(2)} = \sigma_{\omega} \sqrt{b \cdot \varepsilon_2} \cdot F_2^{(B_{\omega})}(\varepsilon_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$F_1^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_2} \begin{pmatrix} 1.058 + 4.684 \varepsilon_1 + 9.126 \varepsilon_1^2 - \\ - 25.254 \varepsilon_1^3 + 40.602 \varepsilon_1^4 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$F_2^{(B_{\omega})}(\varepsilon_2) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_1} \begin{pmatrix} 1.193 + 9.099 \varepsilon_2 + 126.653 \varepsilon_2^2 - \\ - 704.649 \varepsilon_2^3 + 1864.595 \varepsilon_2^4 - \\ - 2234.832 \varepsilon_2^5 + 1019.341 \varepsilon_2^6 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

де  $\sigma_{\omega}$  – нормальні секторальні напруження при стисненому крученні, МПа;  $a$  і  $b$  ширина горизонтальної та вертикальної стінки профілю, м;

$$\varepsilon_1 = \frac{l}{a}, \quad \varepsilon_2 = \frac{l}{b}, \quad S_1 = a \cdot \delta_1, \quad S_2 = b \cdot \delta_2 \quad (6)$$

$F_1^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1, \varepsilon_2), F_2^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$  – функції поправки, які враховують зміну геометрії тонкостінного замкнутого профілю при поширенні у ньому втомної тріщини.

Отже, для проведення повної і ефективної критеріальної оцінки несучих рам мобільних с/г машин необхідно визначити силові фактори, які діють у найбільш небезпечних перетинах. Оптимальним є встановлення силових факторів при проведенні тензометричних досліджень напруженості несучої рами машини в реальних умовах експлуатації.

Приведені результати уточнюючих експериментальних досліджень на основі результатів польових досліджень несучої рами с/г причепа, проведених на полях Зборівського коледжу ТНТУ ім. І. Пулюя (Тернопільська обл.). Для зменшення трудомісткості експериментальних досліджень причепа тракторного 2ПТС – 4, при збереженні необхідної точності результатів вимірів, застосовано наступні методичні прийоми [6, 7]:

— для попереднього аналізу і обґрунтування режиму випробувань опрацювали інформацію для тих типових варіантів експлуатації, при яких амплітуди напружень можуть перевищувати межі витривалості деталей. При транспортних роботах довжина гону становила 1200 м.;

— для тензометрування вибрали типові для даної машини операції;

— на підставі досліджень літературних джерел [4, 5, 6, 7, 10, 13] кількість тензорезисторів, наклеєних на несучу металоконструкцію причепа, була обмежена;

— датчики встановлюються в місцях з одновісним напруженим станом, отже вимірювання напружень є можливим за допомогою одного тензорезистора, наклеєного вздовж осі дії сили, тензорезистори наклеювалися симетрично з обох сторін рами.

З урахуванням попередніх полігонних випробувань вказаного сільськогосподарського причепа, для проведення експериментальних досліджень у польових умовах використано 12 тензорезисторів КФ5ПІ – 1- 200, які розміщувались у найбільш навантажених місцях з високою концентрацією напружень (рис.1) [7, 8]. Враховуючи симетричність конструкції тензорезистори наклеювалися в зонах зварних з'єднань лонжеронів з поперечинами на відстані 10мм від країв з обох сторін причепа (рис. 1). В цілому, стабільність режиму досліджень контролюється дотриманням швидкості руху, завантаження причепа, тиском у шинах коліс.

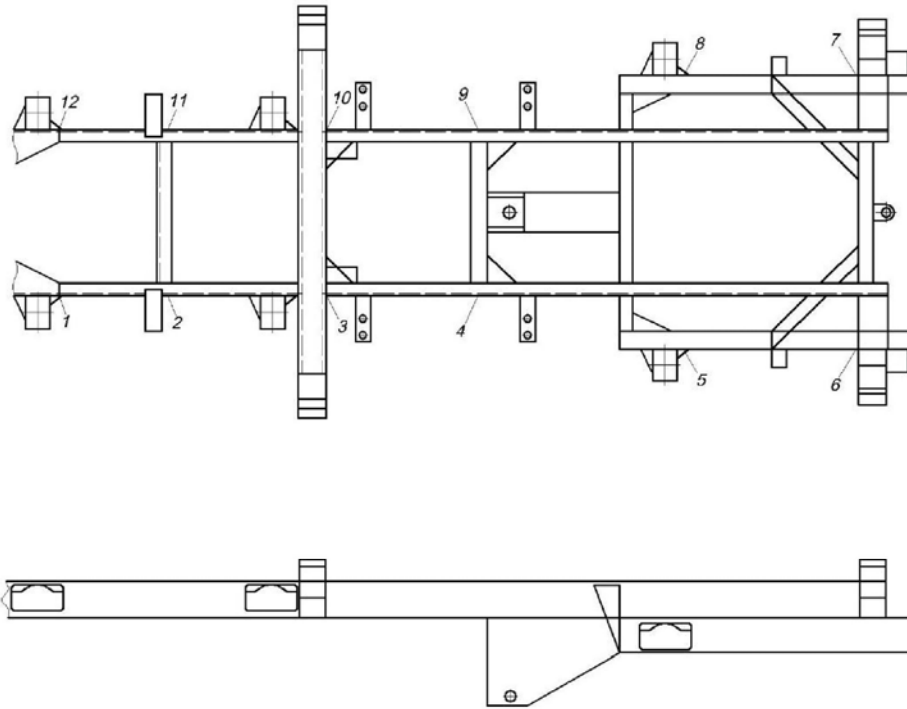


Рис.1 –Схема розміщення тензорезисторів на металокопструкції несучої рами причепа сільськогосподарського 2ПТС – 4

У зв'язку зі світовими тенденціями розвитку експериментальних досліджень складних несучих металокопструкцій в реальних умовах експлуатації, випробування причепа проводились з використанням універсальної вимірювальної системи (УВС) [8], яка працює у автономному режимі через вбудований мікрокомп'ютер з реєстрацією інформації на зовнішній ПК при з'єднанні через LPT-порт. Дана система складається з комплексу різноманітних датчиків: тензорезисторів, датчиків кутових швидкостей, віброакселерометрів, динамометрів, пристроїв для енергетичної оцінки машин та ін., які безпосередньо кріпляться на металокопструкції досліджуваної машини, УВС, яка забезпечує підсилення, фільтрацію і реєстрацію статодинамічних сигналів, а також пакету програм для функціонування системи та статистичної обробки одержаних даних. Універсальність системи визначається можливістю підключення різноманітних датчиків, що забезпечується вимірювальними модулями з універсальними вимірювальними каналами (1-8). Дана схема реалізується при автономному режимі роботи системи. При роботі з зовнішнім комп'ютером загальне число вимірювальних каналів 32, з яких 8 – універсальні, а 24 (9-32) забезпечують роботу тільки з вихідними сигналами у вигляді напруги з нижнім діапазоном  $\pm 1,25\text{В}$ .

Основні технічні характеристики універсальних вимірювальних каналів:

- мінімальний опір резистивних датчиків: 50 Ом;
- живлення датчиків напругою постійного струму: 0,5В; 2,0В; 5,0В;
- коефіцієнт підсилення в режимі роботи з тензорезисторами: 100×1; 2; 4; 8; 16; 32; 64; 128;
- режим вимірювань – статодинаміка; діапазон початкового балансування тензомостів  $\pm 2\%$ ;
- температурний дрейф нуля, не більше  $\pm 1\text{мкВ}/^\circ\text{C}$ ; основна похибка каналу не більше  $\pm 0,2\%$ ;
- діапазон компенсації можливого зміщення нуля:  $\pm 5\text{В}$ ;
- частоти зрізу ФНЧ: 4; 8; 16; 20; 32; 40; 64; 80; 128Гц.

Перед проведенням випробувань проводилося тарування датчиків (у кількості 10% відібраної партії) та тензометричних каналів реєструючої системи.

Польові тензометричні випробування проводилися з урахуванням пробігів тракторних причепів різними типами доріг [10]: пробіг асфальтовими дорогами становить, в середньому, 40%, загальний пробіг ґрунтовими дорогами різних категорій становить до 60%. Навантаження причепа - 4400 кг (вище від номінального на 10%) при рівномірному розміщенні вантажу на платформі кузова, тиск у шинах – 3.5 атм., швидкість змінювалася у залежності від режиму транспортування: на ґрунтовій дорозі - 20 км/год., при русі по полю, поперек борін - 8 км/год. Дослідження проведено при агрегуванні причепа з трактором МТЗ – 50, результати відображено у табл.1.

Таблиця 1

**Результати уточнюючих тензометричних досліджень несучої рами сільськогосподарського причепа 2ПТС – 4 в експлуатаційних умовах**

№ п/п	№ датч.	Ґрунтова дорога, робоча швидкість V=20 км/год., довжина гону 1200 м., тиск у шинах коліс 3.5 атм. Навантаження причепа 4.4 т.			Рух полем поперек борін, робоча швидкість V=8 км/год, довжина гону 400 м., тиск у шинах коліс 3.5 атм. Навантаження причепа 4.4 т.		
		Амплітуда макс. напруж. $A_{max}$ , МПа	Амплітуда середн. напруж. $A_{сер.}$ МПа	Амплітуда мін. напруж. $A_{min}$ , МПа	Амплітуда макс. напруж. $A_{max}$ , МПа	Амплітуда середн. напруж. $A_{сер.}$ МПа	Амплітуда мін. напруж. $A_{min}$ , МПа
1.	I	89	62	35	135	64	37
2.	II	66	50	34	90	56	32
3.	III	129	69	31	186	78	30
4.	IV	95	60	34	180	77	31
5.	V	120	49	32	189	81	39
6.	VI	75	55	33	159	69	36
7.	VII	88	61	34	133	63	38
8.	VII	67	51	35	94	55	31
9.	IX	130	68	32	182	77	29
10.	X	94	61	33	177	76	32
11.	XI	121	50	31	185	80	38
12.	XII	95	56	32	161	68	35

**Висновки.** Подано результати проведених експериментальних польових досліджень причепа тракторного 2ПТС – 4. На основі чого запропоновано створення відправної бази вироблення критеріїв оцінки міцності найбільш поширених перетинів несучих металоконструкцій с/г причепів з позицій тріщинотривкості виходячи з факторів їх початкової дефектності у поєднанні з експлуатаційними дослідженнями в реальних умовах експлуатації машин на найбільш характерних рельєфах з вибором особливостей оброблюваних площ.

**Література:**

1. Москвичев В. В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений: В 3 т. – Т.1: Постановка задач и анализ предельных состояний. – Новосибирск: Наука, 2002. – 106 с.
2. РД 50-650-86. Методические указания. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований к надежности. - М.: Изд-во стандартов, 1988. -22с.

3. Рибак Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин. Підручник-посібник. Тернопіль. "Збруч", 2003. -332с.
4. Попович П. В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва / П. В. Попович — Тернопіль, 2015. — 443 с.
5. Попович П.В. Алгоритм оцінки базових експлуатаційних властивостей колісних сільськогосподарських транспортних засобів / Попович П., Шевчук О., Ляшук О.Л., Матвіїшин А.Й. // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2017. – Вип. № 181. – С. 198 - 203.
6. Ускоренные ресурсные испытания складного прицепа для легкового автомобиля / А.Бажанов, С. Чабан, О. Возненко // Труды Одесского политехнического университета. Выпуск 2(8)'- 1999. – С. 108-113.
7. Методика ускоренных прочностных испытаний несущих систем машин на полигоне КубНИИТиМ//Всесоюзное объединение „Союзсельхозтехника” Совета Министров СССР. - Новокубанск: КубНИИТиМ, 1968. -213с.
8. Універсальна вимірвальна система для дослідження динаміки сільськогосподарських машин / Т.І. Рибак, М.І. Підгурський, В.І. Костюк, В.О. Тесленко, В.І. Залужний // Надійність і довговічність машин і споруд, 2005. – Вип. 25. – С. 112-119.
9. P. Popovych. The study of fatigue failure performance of vehicle metal structures used in transportation of corrosive materials //P. Popovych, L. Poberezhna, O. Tson, O. Shevchuk, O. Lyashuk/ Acta Mechanica Slovaca Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Košice. Vol. 21, № 1. P. 48-52.
10. Щурин К.В. Прогнозирование и повышение усталостной долговечности несущих систем сельскохозяйственных тракторных средств/ Диссерт. докт. техн. наук. – Оренбург: ОПИ, 1994. – 423с.
11. Popovych. P. V. The service life evaluation of fertilizer spreaders undercarriages / P. V., Popovych; O. L., Lyashuk; I. S., Murovanyi; V. O., Dzyura; O. S., Shevchuk; V. D., Myndyuk // INMATEH – Agricultural Engineering. Sep-Dec 2016, Vol. 50, Issue 3, pp.39–46.
12. Popovych. P. V. Influence of organic operation environment on corrosion properties of metal structure materials of vehicles/ Popovych P.V., Lyashuk O.L., Shevchuk O.S., Tson O.P., Bortnyk I. M., Poberezhna L.Ya. // INMATEH – Agricultural Engineering. 2017, Vol. 52, Issue 2, pp.113–119.
13. Попович П. Комплексний аналіз надійності несучих систем тракторних причепів при їхній експлуатації //Попович П., Рибак Т./ Механізація сільськогосподарського виробництва. - Вісник ХНТУСГ, Вип. 93 Харків, 2010. -С. 411-414.

## Summary

**Havron N.B., Kuchvara I.M., Shevchuk O.S., Kononchuk O., Matviishyn A.Y., Koval Y.J.** Experimental investigation of agricultural vehicle operative loading

*In paper methodology is substantiated and results are presented for field experimental researches of an agricultural trailer. The exact values of the stresses that arise in the design of the carrier frame of the vehicle during operation in field conditions are established. Also analytical dependencies for determining the criteria of local destruction to assess the durability indicators, in the case, open or closed thin-walled profiles of the investigated machine bearing systems are given.*

**Keywords:** agricultural vehicle, transportation, tension, operational properties, trailer, reliability.



### References

1. Moskvichev V. V. Osnovy konstrukcionnoj prochnosti tehniceskikh sistem i inzhenernyh sooruzhenij: V 3 t. – T.1: Postanovka zadach i analiz predel'nyh sostojanij. – Novosibirsk: Nauka, 2002. – 106 s.
2. RD 50-650-86. Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tehnikе. Sostav i obshhie pravila zadaniya trebovanij k nadezhnosti. - M.: Izd-vo standartov, 1988.-22s.
3. Ribak T.I. Poshukove konstruivannja na bazi optimizacii resursu mobil'nih sil's'kogospodars'kih mashin. Pidruchnik-posibnik. Ternopil'. “Zbruch”, 2003.-332s.
4. Popovich P. V. Metodi ocinki resursu nesuchih sistem prichipnih mashin dlja vnesennja dobriv z vrahuvannjam vplivu agresivnih seredovishh: disertacija na zdobuttja naukovoogo stupenja doktora tehnicnih nauk: 05.05.11 – mashini i zasobi mehanizacii sil's'kogospodars'kogo virobництва / P. V. Popovich — Ternopil', 2015. — 443 s.
5. Popovich P.V. Algoritm ocinki bazovih ekspluatacijnih vlastivostej kolisnih sil's'kogospodars'kih transportnih zasobiv / Popovich P., Shevchuk O., Ljashuk O.L., Matvišhin A.J. // Visnik HNTUSG. – Harkiv, 2017. – Vip. № 181. – S. 198 - 203.
6. Uskorennje resursnye ispytaniya skladnogo pricepa dlja legkovogo avtomobilja / A. Bazhanov, S. Chaban, O. Voznenko // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. Vypusk 2(8)'– 1999. – S. 108-113.
7. Metodika uskorennyh prochnostnyh ispytanij nesushhijh sistem mashin na poligone KubNIITiM//Vsesojuznoe ob#edinenie „Sojuzsel'hoztehnika” Soveta Ministrov SSSR. - Novokubansk: KubNIITiM, 1968.-213s.
8. Universal'na vimirjuval'na sistema dlja doslidzhennja dinamiki sil's'kogospodars'kih mashin / T.I. Ribak, M.I. Pidgurs'kij, V.I. Kostjuk, V.O. Teslenko, V.I. Zaluzhnij // Nadijnist' i dovgovichnist' mashin i sporud, 2005. – Vip. 25. – S. 112-119.
9. P. Popovych. The study of fatigue failure performance of vehicle metal structures used in transportation of corrosive materials //P. Popovych, L. Poberezhna, O. Tson, O. Shevchuk, O. Lyashuk/ Acta Mechanica Slovaca Faculty of Mechanical Engineering Technical University of Košice. Vol. 21, № 1. P. 48-52.
10. Shhurin K.V. Prognozirovanie i povyshenie ustalostnoj dolgovechnosti nesushhijh sistem sel's'kohozjajstvennyh traktornyh sredstv/ Dissert. dokt. tehn. nauk. – Orenburg: OPI, 1994. – 423s.
11. Popovych. P. V. The service life evaluation of fertilizer spreaders undercarriages / P. V., Popovych; O. L., Lyashuk; I. S., Murovani; V. O., Dzyura; O. S., Shevchuk; V. D., Myndyuk // INMATEH – Agricultural Engineering. Sep-Dec 2016, Vol. 50, Issue 3, pp.39–46.
12. Popovych. P. V. Influence of organic operation environment on corrosion properties of metal structure materials of vehicles/ Popovych P.V., Lyashuk O.L., Shevchuk O.S., Tson O.P., Bortnyk I. M., Poberezhna L.Ya. // INMATEH – Agricultural Engineering. 2017, Vol. 52, Issue 2, pp.113–119.
13. Popovich P. Kompleksnij analiz nadijnosti nesuchih sistem traktornih prichepiv pri ihnij ekspluatacii //Popovich P., Ribak T./ Mehanizacija sil's'kogospodars'kogo virobництва. - Visnik HNTUSG, Vip. 93 Harkiv, 2010.-S. 411-414.