

УДК 631.1.004

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В ПРОЦЕСІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПРИ ЗБЕРІГАННІ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ

І. М. Кузьмич

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція автора: beliy1994@meta.ua.

Історія статті: отримано – квітень 2021, акцептовано – серпень 2021, опубліковано – 30 вересня 2021 року.
Бібл. 28, рис. 2, табл. 4.

Анотація. Вирішення загальнолюдських, глобальних проблем енерго- та ресурсозбереження як у машинобудуванні, так і в агропромисловому комплексі нерозривно пов'язані з вирішенням питань захисту техніки від корозії.

Сучасна сільськогосподарська техніка, і самохідні зернозбиральні комбайни зокрема, експлуатуються періодично протягом одного або двох сезонів на рік. Більшість зернозбиральних комбайнів зберігається на відкритих майданчиках підприємств агропромислового комплексу, при цьому вона піддається агресивному впливу довкілля (коливанням температури, вологості, впливу вітру, сонячної радіації, пилу та інших). Основним видом впливу зовнішнього середовища на техніку є атмосферна корозія та викликане нею корозійне зношування матеріалів, деталей та вузлів, що призводить до її передчасних відмов. Так втомна міцність виробів із сталі при зберіганні протягом 12 місяців на відкритому майданчику знижується на 28–58%.

Для забезпечення тимчасового протикорозійного захисту зернозбиральних комбайнів застосовується велика кількість консерваційних та робітничо-консерваційних мастил. Однак невирішеність низки питань теоретичного та практичного характеру призводить до необґрунтованого застосування захисних засобів, які або не забезпечують необхідну тривалість зберігання техніки, або збільшують витрати на її консервацію. Стандартизовані методи випробувань антикорозійних мастильних матеріалів в переважній кількості мають велику кількість недоліків, найголовнішим з яких є те, що оцінка захисних властивостей проводиться в одиницях, які не дозволяють оцінити термін їхньої дії, а лише показують величину корозії металу.

Ключові слова: антикорозійність, мастильні матеріали, збереженість, ефективність, комбайн.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день вивчено накопичений багаторічний досвід у галузі процесів корозії та захисту різної техніки та виробів від впливу

навколишнього середовища [1], а також розглянуто питання оцінки експлуатаційних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів [2], від якості яких багато в чому залежить вирішення проблеми, що вирішується у статті [3].

В результаті вивчення раніше виконаних досліджень встановлено [4], що в 40% випадків зниження та втрата експлуатаційних якостей виробів і матеріалів автотракторної та сільськогосподарської техніки пов'язані з впливом температури навколишнього середовища [5], яка надає вирішальний вплив на швидкість перебігу процесів корозії [6], а решта кліматичних факторів лише прискорюють процес корозійних руйнувань як металів [7], і антикорозійних мастильних матеріалів [8].

У ході аналізу розроблених та стандартизованих раніше методів випробувань та дослідницьких робіт з вивчення процесів атмосферної корозії встановлено: 1) відсутність теоретичних положень, що точно описують фізико-хімічний механізм зміни антикорозійних мастильних матеріалів [9], оскільки роботи з вивчення термодинамічних аспектів цих змін не вийшли за рамки лабораторних експериментів [10] та не отримали наступні роки логічного продовження; 2) відсутність у результатах численних досліджень положень [11], що дають кількісну (математичну) модель процесу кінетики та зміни експлуатаційних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів; 3) відсутність достатньо адекватних експериментальних методів випробування антикорозійних мастильних матеріалів [12], що призвело до малої придатності теоретичних основ та висновків, на яких базувалися раніше розроблені методи випробувань [13].

Основними загальними недоліками сучасних методів випробувань антикорозійних мастильних матеріалів є те, що вони не враховують вплив негативних температур, внаслідок чого вони мають невисоку точність та низьку адекватність даним, отриманим в умовах реальної експлуатації, а також характерна тривалість одного циклу випробувань, перевищення температури випробувань понад 60 °C та як наслідок, спотворення кінетики механізму корозійного процесу [14].

Великий внесок у вивчення та встановлення закономірностей кінетики корозії, старіння та зберігання металовиробів, прогнозування зміни експлуатаційних якостей антикорозійних мастильних матеріалів внесли праці [15].

Аналіз останніх досліджень

Математичне моделювання процесів зміни фізико-хімічних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів при експлуатації зернозбиральних комбайнів на підставі факторного аналізу проведено ранжування факторів, що впливають на процес атмосферної корозії (при аналізі та ранжируванні фактори приводилися до нормальних умов) [16]. В результаті факторного аналізу варіацій зовнішніх (кліматичних) факторів, що впливають протягом 2020–2021 рр. та внутрішніх (якісних) факторів, які зумовлюють корозійну стійкість сталей, а саме хімічний склад сталей (S) та вміст активної речовини антикорозійних мастильних матеріалів (l), (табл. 1), проведено ранжування факторів, що впливають на систему «метал-плівка антикорозійних мастильних матеріалів» (табл. 2).

Ранжування варіацій зовнішніх (кліматичних) факторів показало [17], що при розробці теоретичної моделі процесу атмосферної корозії необхідно враховувати такі параметри [18], як температура навколишнього середовища (T), відносна вологість

повітря (φ), атмосферний тиск (P), швидкість вітру (w) та внутрішні фактори системи – властивості антикорозійних мастильних матеріалів, які можна оцінити рядом їх теплофізичних та хімічних показників [19].

Таблиця 1. Якісні фактори.

Table 1. Qualitative factors.

Експозиція	s	l
Ст. 3 + К-17	1,000	0,160
Ст. 3 + ПВК	1,000	1,000
Ст. 3 + Мовіль	1,000	0,500
Ст. 3 + Тектіл	1,000	0,420
сталь 08 + К-17	0,843	0,160
сталь 08 + ПВК	0,843	1,000
сталь 08 + Мовіль	0,843	0,500
сталь 08 + Тектіл	0,843	0,420

На підставі ранжування зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на процес корозії [20], а також аналізу низки теоретичних досліджень, виконаних раніше, було встановлено, що процес корозії визначається таким показником [21], як його швидкість.

Швидкість будь-якого корозійного процесу можна визначити з рівняння:

$$V_{кр} = m/\tau, \quad \text{кг/с} \quad (1)$$

де m – маса металу прокородуваного, кг; τ – час процесу корозії, с.

Таблиця 2. Аналіз зовнішніх та якісних факторів.

Table 2. Analysis of external and qualitative factors.

Фактор	Значення	Дисперсія, %	Накопичені значення	Накопичена дисперсія, %
T , К	2,56	42,61	2,56	42,61
φ , %	1,02	16,92	3,57	59,53
P , кПа	1,00	16,67	4,57	76,20
w , м/с	1,00	16,67	5,57	92,87
s	0,31	5,19	5,88	98,06
l	0,12	1,94	6,00	100,00

Маса металу, що бере участь у процесі корозії, визначається за виразом:

$$m = \Delta h \cdot S_d \cdot \rho_m, \quad (2)$$

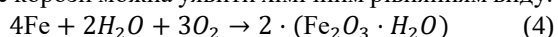
де Δh – глибина проникнення корозії у метал, м; S_d – площа поверхні деталі, м²; ρ_m – щільність продукту корозії (рівня 5240 кг/м³).

Тоді швидкість корозії дорівнюватиме:

$$V_{кр} = (\Delta h \cdot S_d \cdot \rho_m) / \tau \quad (3)$$

Для забезпечення гарантованого захисту СГТ необхідно забезпечити умови, у яких процес корозії не протікає, тобто: $\Delta h \rightarrow 0$, тоді $m \rightarrow 0$ та $V_{кр} \rightarrow 0$.

Щоб досягти в умовах зберігання техніки нульової корозії параметри, що характеризують цей процес, необхідно розглянути як хімічний процес корозії та її енергетику [22]. З термохімії знаємо, що процес корозії можна уявити хімічним рівнянням виду.



а енергетичний баланс цього хімічного процесу можна описати відповідно до термодинамічного закону збереження енергії:

$$\Delta H = \Delta G - T \cdot \Delta S,$$

$$C_p \cdot m \cdot \Delta T = -R \cdot T \cdot \ln K_p - T \cdot \Delta S \quad (5)$$

де ΔH – зміна ентальпії, у процесі корозії, Дж; ΔG – вільна енергія Гіббса, яка витрачається на корозійний процес, Дж; T – наведена температура процесу, $T=298$ К; ΔS – зміна ентропії процесу під впливом зовнішніх хімічних та фізичних впливів атмосфери, Дж/К; C_p – питома теплоємність металу, Дж/(кг·К); ΔT – зміна температури за аналізований період зберігання, $\Delta T=313-232=81$ К; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); K_p – константа хімічної рівноваги процесу, моль.

Маса продукту реакції за час τ з урахуванням (2) та (5) складе:

$$\Delta h \cdot S_d \cdot \rho_{см} = \frac{T \cdot (\Delta S - R \cdot \ln K_p)}{C_p \cdot \Delta T} \quad (6)$$

З метою кількісної оцінки енергетики даного процесу величину $R \cdot \ln K_p$ визначимо для стандартної енергії Гіббса за рівнянням:

$$\Delta G_{298}^0 = -5,71 \cdot \lg K_p \quad (7)$$

За результатами розрахунків величина $R \cdot \ln K_p = 2485,8$ Дж/К і підставивши її в рівняння (6), отримаємо, що маса заліза, що прокородував, складе:

$$m = \frac{T \cdot (\Delta S - 2485,8)}{C_p \cdot \Delta T} \quad (8)$$

З формули (8) видно, що маса іржі, що утворилася, залежить від температури і величини накопиченої зміни ентропії процесу [23]. Використовуючи довідкові дані, що характеризують наведену стандартну хімічну реакцію (4) для якої $V_{kp} = 200$ мкм на рік, $\tau = 1$ рік, $S_0 = 1$ м², отримаємо:

$$\begin{aligned} h/\gamma &= \Delta S - 2485,8 \\ e\gamma &= T/\rho_m \cdot C_{pm} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (9)$$

Як видно з рівняння (9) щоб зменшити величину енергії корозійних руйнувань необхідно створити умови (забезпечити протикорозійний захист), за яких глибина проникнення $h=0$. З формули (9) видно, що це можливо в тому випадку, якщо $\Delta S = 2485,8$ Дж/(кг·К). Отже [24], якщо захисна плівка мастила за рік матиме накопичена зміна ентропії менша або дорівнює величині зміни ентропії системи від зовнішніх енергетичних впливів навколишнього середовища за рік (для умови відсутності корозії на металі), то метал буде захищений від корозії [25]. Виходячи з цього, можна записати умову збереження металу під шаром мастила, яке матиме вигляд:

$$\Delta S_{cm} = \Delta G,$$

$$\text{при } \Delta S_{cm} \leq \Delta S = 2485,8, \text{ Дж/(кг·К)}, \quad (10)$$

де ΔS_{cm} – зміна накопиченої ентропії мастила за період зберігання, Дж/(кг·К).

З ентропійної теорії старіння мастил, розробленої професором В.В. Салмін, уявимо, що в процесі корозії, накопичення ентропії мастилом відбувається циклічно. Представимо його у вигляді фізичної моделі, що складається з циклів, що періодично повторюються, що включають 6 ідеальних термодинамічних процесів [26]. Даний цикл представимо графічно, в T, S координатах (рис. 1) і математично залежністю виду:

$$\Delta S_{cm}(1 \text{ цикл}) = \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} + \Delta S_{3-4} + \Delta S_{4-5} + \Delta S_{5-6} + \Delta S_{6-7}, \text{ Дж/(кг·К)}. \quad (11)$$

Запропонована фізична модель складається з наступних процесів:

-процес 1-2 при $T_1 = T_2 = \text{const}$ -ізотермічний процес витримки деталей (або АММ) у нічний час. Тривалість процесу $\tau = 4$ – з 00.00 год до 4.00 год;

-процес 2-3 при $P_{2-3} = \text{const}$ - ізобарний процес нагрівання мастила. Характеризується зміною її температури, залежно від температури повітря. Тривалість $\tau = 4$ год – з 4.00 до 8.00 год;

-процес 3 - 4 за $T_3 = T_4 = \text{const}$, ізотермічний процес витримки мастила при денній температурі. Тривалість процесу $\tau = 4$ год – з 8.00 до 12.00 год;

- процес 4 - 5 при $\Delta Q = \text{const}$ -адіабатний процес охолодження мастила із денних температур до вечірніх. Тривалість процесу $\tau = 4$ год – з 12.00 до 16.00 год;

- процес 5 - 6 при $T_5 = T_6 = \text{const}$ -ізотермічний процес витримки деталей (АММ) увечері. Тривалість процесу $\tau = 4$ год. – з 16.00 до 20.00 год;

- процес 6 - 7 $\Delta Q = \text{const}$, адіабатний процес охолодження мастила з вечірніх до нічних температур. Тривалість процесу $\tau = 4$ год. – з 20.00 до 00.00 год.

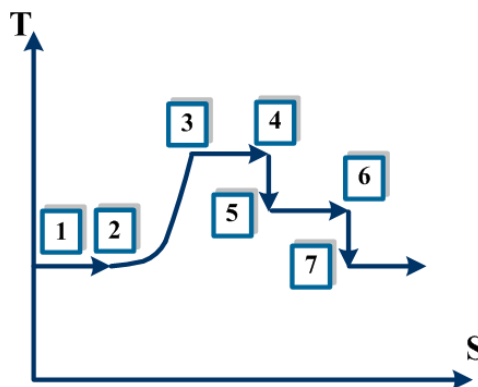


Рис. 1. Фізико-математична модель накопичення ентропії мастильних матеріалів у процесі атмосферної корозії.

Fig. 1. Physico-mathematical model of entropy accumulation of lubricants in the process of atmospheric corrosion.

Зміну ентропії у кожному з 7 процесів визначимо, як

$$\Delta S_i = \Delta Q_i / T_i, \text{ Дж/(кг·К)} \quad (12)$$

де T_i – наведена температура i -го процесу, К; ΔQ_i – теплота зовнішніх впливів у i -му процесі, що складається з теплоти хімічних реакцій Q_x та теплоти фізичних впливів Q_ϕ у i -му процесі.

Теплоту зовнішніх впливів визначаємо за такою формулою:

$$\Delta Q_i = Q_x + Q_\phi, \text{ Дж}. \quad (13)$$

Теплоту хімічних реакцій представимо як

$$Q_x = R_{cm} \cdot \Delta T_{1-2} \cdot \ln(P_1/P_2), \text{ Дж/кг}, \quad (14)$$

де R_{cm} – питома газова стала мастила, Дж/(кг·К); ΔT_i – зміна температури в i -му процесі, К; P_1 і P_2 – тиску на початку та наприкінці i -го процесу, Па.

Теплоту фізичних впливів у всіх процессах (крім 2–3) представимо як теплоту конвективного теплообміну:

$$Q_\phi = Q_{\text{кон}} = (\alpha_i / (\rho_{cm} \cdot h)) \cdot \tau_i \cdot \Delta T_i, \text{ Дж/кг}, \quad (15)$$

де α_i – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); τ_i – тривалість i -го процесу, с; ΔT_i – зміна температури у процесі, К; ρ_{cm} – щільність мастила, кг/м³; h – товщина деталі, покритої мастилом, м.

Величину теплового потоку витрачається на нагрівання мастила у процесі 2–3, визначимо із закону Стефана-Больцмана:

$$Q_\phi = Q_{\text{луч}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \tau_{2-3} \cdot \frac{3600}{\rho_{cm} \cdot h} \cdot \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \quad (16)$$

де ε – ступінь чорноти тіла, для змашення приймаємо $\varepsilon \approx 0,96$; C_0 – постійна Стефана-Больцмана, $C_0 = 5,67$ Вт/(м² К⁴); $S_d = F_{cm}$ – площа поверхні, покрита мастилом, м²; τ_{2-3} – час ізобарного процесу нагрівання мастила, $\tau_{2-3} = 4$ год.

При адіабатному процесі ентропія $\Delta S_{4-5} = \Delta S_{6-7} = 0$. Ентропії ізотермічних процесів ΔS_{1-2} , ΔS_{3-4} та ΔS_{5-6} визначаються аналогічно з урахуванням

змін температури, барометричного тиску, швидкості вітру та вологості, часу доби [27].

Розрахувавши для кожного циклу значення накопиченої ентропії мастила ($\Delta S_{\text{цикл}}$), і знаючи максимальну ентропію її руйнування $\Delta S_{\text{max}} = \Delta S_{\text{см}} = 2485,8$ Дж/(кг·К), за рік можна визначити гарантований час зберігання металу під шаром мастила за формулою:

$$\tau_{\text{хр}} = \beta \cdot n \cdot 24 = \frac{\Delta S_{\text{max}} \cdot \beta}{\Delta S_{\text{цикл}}} \cdot 24 \quad (17)$$

де β – коефіцієнт заданої (потрібної) тривалості зберігання, рівний відношенню кількості заданих (необхідних) місяців зберігання техніки до 12 місяців (1 рік); n – кількість циклів, які можуть витримати захисна плівка; 24 – тривалість одного циклу, год.

Таким чином, визначивши тривалість процесу гарантованого зберігання металу під шаром мастила, необхідно встановити необхідну товщину захисної плівки та масу мастила, що наноситься на поверхню металу. Для вирішення цього завдання скористаємося температурним законом Арреніуса, відповідно до якого швидкість процесу руйнування захисної плівки ($V_{\text{см}}$) дорівнюватиме:

$$V_{\text{см}} = V_0 \cdot \exp(-E_a/RT), \text{ м/с}, \quad (18)$$

де V_0 – початкова швидкість руйнування мастильного покриття, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, визначається експериментально або розраховується за формулою $V_0 \approx a_0 \sqrt{T_0}$ тут a_0 – вільний член, $a_0 \approx 0,001$ м/(с·К), $T_0 = 273,15$ К; T – наведена температура процесу, К; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); E_a – енергія активації, Дж/моль.

Прийнявши, що $E_a = T \cdot \Delta S_{\text{цикл}} \cdot \mu_{\text{см}}$, (де $\mu_{\text{см}}$ – молекулярна маса мастила, кг/моль), і припустивши, що термін зберігання деталі визначається часом роботи захисного покриття (випаровуванням активної речовини та зменшенням товщини плівки), товщину захисної плівки визначимо з величини швидкості (18) та часу процесу зберігання (17) за рівнянням виду

$$\delta_{\text{см}} = 3600 \cdot V_{\text{см}} \cdot \tau_{\text{хр}}, \text{ м}. \quad (19)$$

Як видно з формули (19), швидкість процесу в даному випадку визначає швидкість зменшення товщини плівки захисного покриття. Якщо прийняти, що енергія активації процесу – є зміна ентропії (що більша енергія руйнування, тим більше буде ентропія мастильного захисного матеріалу), то масу захисної плівки, необхідної для захисту деталі від корозії, можна розрахувати за формулою:

$$m_{\text{см}} = 3600 \cdot \tau_{\text{хр}} \cdot \rho_{\text{см}} \cdot S_{\text{д}} \cdot V_0 \cdot \exp\left(\frac{n \cdot \Delta S_{\text{цикл}} \cdot \mu_{\text{см}}}{R}\right) \rightarrow 0, \quad (20)$$

В умовах реального зберігання в енергетику процесу руйнування захисної плівки необхідно ввести складову механічних руйнувань від вітрового навантаження. Механічна складова визначається тиском, що створюється від одиниці вітрового навантаження, і може бути визначена за формулою

$$P = 0,5 \cdot \rho_{\text{пов.}} \cdot w_{\text{пов.}}^2, \text{ Па}. \quad (21)$$

де $\rho_{\text{пов.}}$ – щільність повітря, кг/м^3 ; $w_{\text{пов.}}$ – швидкість повітря (вітру), м/с.

Енергетику цього механічного впливу можна розрахувати із залежностей:

$$Q_{\text{мех}} = F \cdot \delta_{\text{см}} = P \cdot V_{\text{см}}, \text{ Дж}, \quad (22)$$

$$q_{\text{мех}} = \frac{0,5 \cdot \rho_{\text{пов.}} \cdot w_{\text{пов.}}^2}{\rho_{\text{см}}}, \text{ Дж/кг}, \quad (23)$$

де F – сила вітру, що діє на масляну плівку, Н; $V_{\text{см}}$ – об'єм мастила, м^3 .

Таким чином, залежність для визначення маси захисного покриття з урахуванням механічного впливу набуде вигляду:

$$m_{\text{см}} = 3600 \cdot \tau_{\text{хр}} \cdot \rho_{\text{см}} \cdot S_{\text{д}} \cdot V_0 \cdot \exp\left[\frac{(n \cdot T \cdot \Delta S_{\text{цикл}} + q_{\text{мех}}) \cdot \mu_{\text{см}}}{R \cdot T}\right] \rightarrow 0 \quad (24)$$

Так як добові зміни атмосферних параметрів можуть досягати значних перепадів, а сам процес розрахунку є досить трудомістким [28], то з метою його спрощення та отримання середніх, більш стабільних, значень атмосферних параметрів необхідно використовувати середньомісячні статистичні дані змін властивостей зовнішніх факторів (атмосферного тиску, температури, відносної вологості та швидкості вітру). Крім того, щоб оцінити достовірність та адекватність розроблених моделей за результатами натурного та лабораторного експериментів, при визначенні величини корозії необхідно перейти до стандартного показника корозії «К», який можна розрахувати за формулою:

$$K = \frac{1}{1000 \cdot S_{\text{д}}} \cdot \left[\frac{T \cdot \left(\Delta S - m_{\text{см}} \cdot \frac{\tau_{\text{хр}}}{24 \cdot \beta} \cdot \Delta S_{\text{цикл}} \right) - 2485,8}{C_p \cdot \Delta T} \right], \text{ м/м}^2. \quad (25)$$

Розроблені фізико-математичні моделі дозволяють провести імітаційне моделювання процесів, що відбуваються у шарі мастила, та з високою точністю (похибка не більше 1,5–2,5 %) визначити показник корозії «К».

Мета досліджень

Мета досліджень – забезпечення збереження зернозбиральних комбайнів шляхом підбору захисних антикорозійних матеріалів.

Результати досліджень

Для проведення експериментальних досліджень як мастил (марок-представників) було обрано: К-17, ПВК, МЛ-1 (Мовіль), МЛ-2 (Тектил-МЛ), а металу – сталі звичайної якості Ст. 3 та якісна конструкційна сталь – Сталь 08.

Для проведення прискорених лабораторних випробувань застосовувалося форсування факторів, що впливають. Це досягалося шляхом збільшення значення факторів системи, що впливають. Відповідно до існуючих прийомів форсування і на підставі аналізу, виконаного в першому та другому розділах дисертації, доцільно для прискорення процесу збільшувати значення температури та відносної вологості.

Для визначення чисельних значень величин факторів, що забезпечують форсування процесів корозії, було проведено аналіз статистичних даних щодо змін температурно-вологісного комплексу для помірної кліматичної зони з 2019 по 2021 р. на території експлуатації зернозбиральних комбайнів (Київська область). З аналізу виділено найбільш характерні режими варіацій зовнішніх (кліматичних) факторів кожному за макрокліматичного району.

Температурний режим має три найбільш характерні інтервали: негативні, середні та позитивні температури. Відносна вологість – 75,1%. Атмосферний тиск – 98,7...100,2 кПа. Сума середніх тривалостей впливу температур кожного з інтервалів становить 8760 год, або один рік. При цьому кожен із інтервалів температур впливає на зернозбиральні комбайни, що знаходяться на зберіганні, приблизно протягом 1/3 року.

Таким чином, при обґрунтуванні методики проведення лабораторного експерименту було встановлено, що найбільш раціональне моделювання режимів зберігання техніки досягається у наступній послідовності: вплив підвищеної температури ($t \leq 60^\circ\text{C}$) та вологості ($\varphi \approx 70\%$); ступінчасте зниження температури при вологості $\varphi \approx 70\%$; охолодження зразків до температури середнього інтервалу $t = 5 \dots 6^\circ\text{C}$ та вологості $\varphi \approx 70\%$; витримка зразків при негативних температурах $t = -10^\circ\text{C}$ та вологості

$\varphi \approx 70\%$. При цьому попередній контакт поверхні з 3% розчином NaCl дозволяє знизити поріг критичної вологості при проведенні лабораторних випробувань до 55%.

Враховуючи фізичну модель, що описує накопичення ентропії, та зміну експлуатаційних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів при зберіганні зернозбиральних комбайнів, було запропоновано режими лабораторних випробувань, наведені у табл. 3. Випробування проводилися у спеціально виготовленій камері, з терморегулятором для автоматичного регулювання температури. Під час проведення випробування на дно камери в лоток заливався соляний розчин у кількості 5 л і встановлювалася потрібна методика температура. Випробування проводилося циклічно. Кількість циклів – 12 по 24 год. Цикл складався з 3 режимів (по 8 год кожен), що моделюють вплив позитивних, середніх та негативних температур.

Таблиця 3. Режими лабораторних випробувань.

Table 3. Modes of laboratory tests.

Номер режиму	Температура, $^\circ\text{C}$	Вологість, %	Тиск, кПа	Тривалість режиму, год
1	60±2	83,4±2	99,5±0,2	8
2	20±2	Не контролюється		8
3	-4±0	65,9±2	99,5±0,2	8

На підставі теоретичних та попередніх експериментальних досліджень було отримано значення накопичених ентропій, які дозволили визначити коефіцієнт прискорення корозійного процесу в системі «метал-плівка антикорозійних мастильних матеріалів», що досягається при лабораторних випробуваннях (табл. 4).

Таблиця 4. Ентропія натурних та лабораторних випробувань.

Table 4. Entropy of field and laboratory tests.

Час випробувань, міс. (цикл)	$\Delta S_{\text{нат}}$, Дж/(кг·К)	$\Delta S_{\text{лаб}}$, Дж/(кг·К)
1	26,5	23,5
2	31,4	23,5
3	26,6	23,5
4	18,6	23,5
5	16,6	23,5
6	28,0	23,5
7	8,0	23,5
8	1,4	23,5
9	7,8	23,5
10	18,1	23,5
11	3,0	23,5
12	5,7	23,5
Нагромадження	191,7	282,0

$$y = \frac{\Delta S_{\text{лаб}}}{\Delta S_{\text{нат}}}$$

Теоретичний розрахунок показує, що з проведенні випробувань очікуваний коефіцієнт прискорення для експозиції Ст. 3+К-17 складе:

$$y^{(Cm.3+K-17)} = \frac{282,0}{191,7} = 1,4.$$

При відпрацюванні режимів лабораторних випробувань антикорозійних мастильних матеріалів з метою уточнення характеру та кінетики зміни оціночних показників об'єктів дослідження було проведено натурні випробування щодо зберігання зразків на відкритому майданчику протягом 12 місяців.

Натурні випробування проводилися відповідно до ДСТУ 9.909 та 9.906. Періодичність знімів зразків була встановлена програмою випробувань після закінчення 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11 та 12 місяців зберігання.

Чисельні значення корозії, отримані в результаті випробувань, визначені ваговим методом, оцінені по середньому арифметичному результату значень, визначених на пластинках, що паралельно випробовуються, по п.п. 1.5.10. та 1.5.11. ДСТУ 9.054. Як оцінний показник використовувався показник корозії «К», г/м².

У ході випробувань забезпечувалася така достовірність результатів:

1) Для натурального експерименту довірча ймовірність не нижче 90% за відносної помилки не більше 10%.

2) Для лабораторного експерименту довірча ймовірність 95% за відносної помилки не більше 5%.

Обробка експериментальних даних здійснювалася на персональному комп'ютері за допомогою пакету прикладних програм Statistica 16.0 та Excel 2016.

У ході аналізу отриманого експериментального матеріалу було підтверджено всі виявлені при фізичному та математичному моделюванні

закономірності зміни від часу показника корозії «К» (рис. 2).

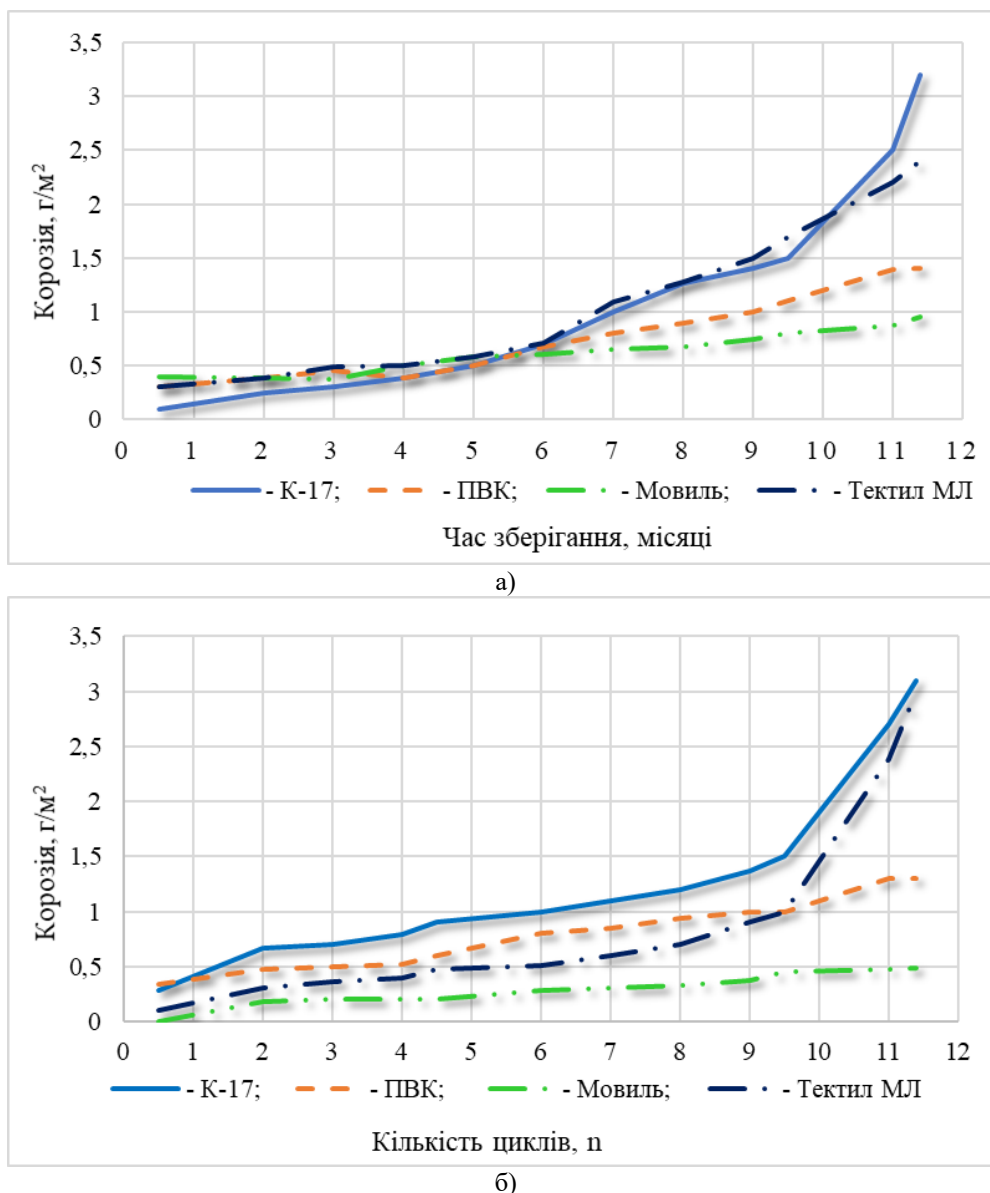


Рис. 2. Корозія сталі Ст. 3 в умовах натурного експерименту (а) та корозія Сталі 08 при лабораторних випробуваннях (б).

Fig. 2. Corrosion of steel Steel 3 in the conditions of field experiment (a) and corrosion of Steel 08 in laboratory tests (b).

Також було встановлено, що при підвищенні температури вологість повітря знижується, це призводить до уповільнення корозії, але водночас веде до висушування мастила, його розтріскування і надалі призводить до збільшення показника корозії через конденсацію вологи на металі. При негативних температурах відбувається виморожування повітря і волога випадає поверхню деталі як снігу (інею), що також значно інтенсифікує процес корозії.

Висновки

1. З аналізу літератури й у результаті ранжування чинників, які впливають процес атмосферної корозії,

встановлено, частка впливу кожного чинника має такі величини: температура T – 42,61...53,15 %; відносна вологість φ – 16,92...26,27 %; атмосферний тиск P – 14,34...16,67%; швидкість вітру w – 4,33...16,67, хімічний склад сталі s – 5,19%, вміст активної речовини антикорозійних мастильних матеріалів l – 1,94%.

2. На підставі ентропійної теорії старіння мастила розроблена фізична модель, що дозволяє: оцінити величину захисних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів за величиною накопиченої ентропії, при цьому $\Delta S_{cm} \leq 2485,8$ Дж/(кг·К); графічно в T, S координатах уявити процес атмосферної корозії протягом доби; прогнозувати тривалість зберігання зернозбиральних комбайнів за умов атмосферної

корозії; визначати швидкість процесу корозії та необхідну товщину та масу антикорозійних мастильних матеріалів, необхідну для захисту деталей зернозбиральних комбайнів від атмосферної корозії протягом заданого терміну зберігання; виконати імітаційне моделювання процесів, що відбуваються у шарі мастила та визначити показник корозії «К» з точністю 1,5...2,5 %.

3. На підставі натурного та теоретичного експериментів було розроблено метод прискорених лабораторних випробувань антикорозійних мастильних матеріалів, що дозволяє провести фізичне моделювання процесів атмосферної корозії та оцінити їхню кінетику. Лабораторні випробування проводилися на режимах, що моделюють вплив негативних, середніх та позитивних температур. Лабораторна установка має коефіцієнт прискорення 0,5...1,4 і дозволяє з довірчою ймовірністю 0,95 та відносною помилкою 0,05 проводити оцінку експлуатаційних властивостей антикорозійних мастильних матеріалів протягом 12 циклів тривалістю 24 год.

Список літератури

1. Savickas D. Combine harvester fuel consumption and air pollution reduction. *Water, Air & Soil Pollution*. 2020. Vol. 231. P. 95. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4466-5>.
2. Meng A. Modeling and experiments on Galfenol energy harvester. *Acta Mechanica Sinica* 2020. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00943-6>.
3. Li P. Design and experimental study of broadband hybrid energy harvester with frequency-up conversion and nonlinear magnetic force. *Micro- and Nanosystems Information Storage and Processing Systems*. 2020. Issue 5. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04716-5>.
4. Beneš L., Novák P., Mašek J., Petrášek S. John Deere combine harvesters fuel consumption and operation costs. *Engineering for Rural Development*. 2015. Vol. 15. P. 13-17.
5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Saeys W. Fault diagnostic systems for agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 106(1). P. 26-36.
6. Toro A., Gunnarsson C., Lundin G., Jonsson N. Cereal harvesting – strategies and costs under variable weather conditions. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 111(4). P. 429-439.
7. Findura P., Turan J., Jobbágy J., Angelovič M., Ponjican O. Evaluation of work quality of the green peas harvester Ploeger EPD 490. *Research in agricultural engineering*. 2019. Vol. 59. P. 56-60.
8. Hanna H. M., Jarboe D. H. Effects of full, abbreviated, and no clean-outs on commingled grain during combine harvest. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. Vol. 27(5). P. 687-695.
9. Korenko M., Bujna M., Földešiová D., Dostál P., Kyselica P. Risk analysis at work in manufacturing organization. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2015. Vol. 63. P. 1493-1497.
10. Lee D. H., Kim Y. J., Choi C. H., Chung S. O., Nam Y. S., So J. H. Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016. Vol. 9(4). P. 33-44.
11. Pristavka M., Bujna M. Use of satatical methods in quality control. *Acta Technologica Agriculturae. SUA in Nitra*. 2013. Vol. 13. P. 33-36.
12. Pristavka M., Bujna M., Korenko M. Reliability monitoring of grain harvester in operating conditions. *Journal of Central European Agriculture*. 2013. Vol. 14. P. 1436-1443.
13. Singh M., Verma A., Sharma A. Precision in grain yield monitoring technologies: a review. *AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*. 2012. Vol. 43(4). P. 50-59.
14. Žitňák M., Kollárová K., Macák M., Pristavková M., Bošanský M. Assessment of risks in the field of safety, quality and environment in post-harvest line. *Research in Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 61. P. 26-36.
15. Žitňák M., Macák M., Korenko M. Assessment of risks in implementing automated satellite navigation systems. *Research in Agricultural Engineering*. 2014. Vol. 60. P. 16-24.
16. Viba J., Lavendelis E. Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. *Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME*, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. P. 95-98.
17. Luo A.C.J., Guo Y. *Vibro-impact Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 213 p.
18. Astashev V., Krupenin V. Efficiency of vibration machines. *Engineering for Rural Development*. 2017. Vol. 16. P. 108-113.
19. Zagurskiy O., Ohienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole. Poland, 2018. P. 64-74.
20. Тімова Л. Л., Ничай І. М. Методологічні положення технічного рівня використання комплексу сільськогосподарських машин. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. № 3. P. 151-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.151>.
21. Rogovskii I. L. Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10. No 3. P. 181-187. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.
22. Rogovskii I. L. Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2019. Vol. 10. No 4. P. 145-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.
23. Rogovskii I. Л. Алгоритмічність визначення періодичності відновлення працездатності сільськогосподарських машин за ступенем витрат їх паливу. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 1.

P. 155-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.01.155>.

24. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 291-298.

25. Rogovskii Ivan. Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. *MOTROL*. Lublin. 2016. Vol. 18. No 3. P. 155-164.

26. Роговський І. Л. Модель стохастичного процесу відновлення працездатності сільськогосподарської машини в безінерційних системах із запізненням. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2020. Vol. 11. No 3. P. 143-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.143>.

27. Роговський І. Л. Моделі формування альтернатив інженерного менеджменту в методах підвищення виробництва зерна в сільськогосподарських підприємствах. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.

28. Rogovskii I. L. Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 2. P. 123-131. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.

References

1. Savickas D. (2020). Combine harvester fuel consumption and air pollution reduction. *Water, Air & Soil Pollution*. 231. 95. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4466-5>.

2. Meng A. (2020). Modeling and experiments on Galfenol energy harvester. *Acta Mechanica Sinica*. <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00943-6>.

3. Li P. (2020). Design and experimental study of broadband hybrid energy harvester with frequency-up conversion and nonlinear magnetic force. *Micro- and Nanosystems Information Storage and Processing Systems*. 5. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04716-5>.

4. Beneš L., Novák P., Mašek J., Petrášek S. (2015). John Deere combine harvesters fuel consumption and operation costs. *Engineering for Rural Development*. 15. 13-17.

5. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Saeys W. (2020). Fault diagnostic systems for agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 106(1). 26-36.

6. Toro A., Gunnarsson C., Lundin G., Jonsson N. (2021). Cereal harvesting – strategies and costs under variable weather conditions. *Biosystems Engineering*. 111(4). 429-439.

7. Findura P., Turan J., Jobbágy J., Angelovič M., Ponjican O. (2019). Evaluation of work quality of the green peas harvester Ploeger EPD 490. *Research in agricultural engineering*. 59. 56-60.

8. Hanna H. M., Jarboe D. H. (2021). Effects of full, abbreviated, and no clean-outs on commingled grain during combine harvest. *Applied Engineering in Agriculture*. 27(5). 687-695.

9. Korenko M., Bujna M., Földešiová D., Dostál P., Kyselica P. (2015). Risk analysis at work in manufacturing organization. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 63. 1493-1497.

10. Lee D. H., Kim Y. J., Choi C. H., Chung S. O., Nam Y. S., So J. H. (2016). Evaluation of operator visibility in three different cabins type Far-East combine harvesters. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 9(4). 33-44.

11. Prístavka M., Bujna M. (2013). Use of statistical methods in quality control. *Acta Technologica Agriculturae. SUA in Nitra*. 13. 33-36.

12. Prístavka M., Bujna M., Korenko M. (2013). Reliability monitoring of grain harvester in operating conditions. *Journal of Central European Agriculture*. 14. 1436-1443.

13. Singh M., Verma A., Sharma A. (2012). Precision in grain yield monitoring technologies: a review. *AMA-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*. 43(4). 50-59.

14. Žitňák M., Kollárová K., Macák M., Prístavková M., Bošanský M. (2015). Assessment of risks in the field of safety, quality and environment in post-harvest line. *Research in Agricultural Engineering*. 61. 26-36.

15. Žitňák M., Macák M., Korenko M. (2014). Assessment of risks in implementing automated satellite navigation systems. *Research in Agricultural Engineering*. 60. 16-24.

16. Viba J., Lavendelis E. (2006). Algorithm of synthesis of strongly non-linear mechanical systems. *Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME*, 22 April 2006. Tallinn, Estonia. 95-98.

17. Luo A.C.J., Guo Y. (2013). *Vibro-impact Dynamics*. Berlin: Springer-Verlag. 213.

18. Astashev V., Krupenin V. (2017). Efficiency of vibration machines. *Engineering for Rural Development*. 16. 108-113.

19. Zagurskiy O., Ohienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. (2018). Global supply chain in context of new model of economic growth. *Conceptual bases and trends for development of social-economic processes*. Monograph. Opole. Poland, 64-74.

20. Titova L. L., Nichay I. M. (2020). Methodological provisions of technical level of use of complex of agricultural machines. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(3). 151-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.151>.

21. Rogovskii I. L. (2019). Systemic approach to justification of standards of restoration of agricultural machinery. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 10(3). 181-187. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.03.181>.

22. Rogovskii I. L. (2019). Consistency ensure the recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 10(4). 145-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.04.145>.

23. Rogovskii I. L. (2020). Algorithmically determine the frequency of recovery of agricultural machinery according to degree of resource's costs. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(1). 155-162. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.01.155>.

24. Rogovskii I., Titova L., Novitskii A., Rebenko V. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for Rural Development*. 18. 291-298.

25. Rogovskii Ivan. (2016). Graph-modeling when the response and recovery of agricultural machinery. *MOTROL*. Lublin. 18(3). 155-164.

26. Rogovskii I. L. (2020). Model of stochastic process of restoration of working capacity of agricultural machine in inertial systems with delay. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 11(3). 143-150. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.03.143>.

27. Rogovskii I. L. (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 12(1). 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.

28. Rogovskii I. L. (2021). Resource of removal expenses for strong agricultural period of volume of operations. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv. Ukraine. 12(2). 123-131. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.02.123>.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АНТИКОРРОЗИОННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ ХРАНЕНИИ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

И. М. Кузьмич

Аннотация. Решение общечеловеческих, глобальных проблем энерго- и ресурсосбережения как в машиностроении, так и в агропромышленном комплексе неразрывно связано с решением защиты техники от коррозии.

Современная сельскохозяйственная техника и самоходные зерноуборочные комбайны в частности, эксплуатируются периодически в течение одного или двух сезонов в год. Большинство зерноуборочных комбайнов хранится на открытых площадках предприятий агропромышленного комплекса, к тому же она подвергается агрессивному воздействию окружающей среды (колебаниям температуры, влажности, воздействию ветра, солнечной радиации, пыли и др.). Основным видом воздействия внешней среды на технику является атмосферная коррозия и вызванный ею коррозионный износ материалов, деталей и узлов, что приводит к ее преждевременным отказам. Так усталостная крепость изделий из стали при хранении в течение 12 месяцев на открытой площадке снижается на 28–58%.

Для обеспечения временной противокоррозионной защиты зерноуборочных комбайнов используется большое количество консервационных и рабоче-консервационных масел.

Однако нерешенность ряда вопросов теоретического и практического характера приводит к необоснованному применению защитных средств, которые либо не обеспечивают необходимую длительность хранения техники, либо увеличивают расходы на ее консервацию. Стандартизированные методы испытаний антикоррозионных смазочных материалов в подавляющем количестве имеют большое количество недостатков, главным из которых является то, что оценка защитных свойств производится в единицах, не позволяющих оценить срок их действия, а лишь показывающих величину коррозии металла.

Ключевые слова: антикоррозионность, смазочные материалы, сохранность, эффективность, комбайн.

OPERATIONAL PROPERTIES OF ANTICORROSIVE LUBRICANTS IN PROCESS OF MAINTENANCE DURING STORAGE OF COMBINE HARVESTERS

I. M. Kuzmich

Abstract. The solution of universal, global problems of energy and resource conservation in both mechanical engineering and agro-industrial complex are inextricably linked with the solution of issues of protection of machinery from corrosion.

Modern agricultural machinery, and self-propelled combine harvesters in particular, are operated periodically for one or two seasons a year. Most combine harvesters are stored in the open areas of agro-industrial enterprises, and it is exposed to aggressive environmental influences (fluctuations in temperature, humidity, wind, solar radiation, dust and others). The main type of environmental impact on the equipment is atmospheric corrosion and the corrosion wear caused by materials, parts and components, which leads to its premature failure. Thus, the fatigue strength of steel products when stored for 12 months in the open reduces by 28–58%.

To ensure temporary corrosion protection of combine harvesters, a large number of conservation and working-conservation oils are used. However, the unresolved number of issues of theoretical and practical nature leads to the unjustified use of protective equipment, which either does not provide the required duration of storage of equipment, or increase the cost of its preservation. Standardized methods of testing anti-corrosion lubricants in the vast majority have a number of disadvantages, the most important of which is that the evaluation of protective properties is carried out in units that do not allow to estimate their service life, but only show the corrosion of the metal.

Key words: anticorrosiveness, lubricants, safety, efficiency, combine.

I. М. Кузьмич ORCID 0000-0003-1718-6123.

