

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЖУРАВЕЛЬ ДМИТРО ПАВЛОВИЧ**

УДК 631.3–192:662.63

**МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ  
БІОПАЛЬНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Мелітополь – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському державному агротехнологічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Дідур Володимир Аксентійович**, Таврійський державний агротехнологічний університет, завідувач кафедри технічного сервісу в АПК

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України, заслужений діяч науки і техніки України, **Черновол Михайло Іванович**, Центральноукраїнський національний технічний університет, ректор;

доктор технічних наук, професор **Войтов Віктор Анатолійович**, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, завідувач кафедри транспортних технологій і логістики;

доктор технічних наук, професор **Войтюк Валерій Дмитрович**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П. Момотенка.

Захист відбудеться 07 червня 2018 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті за адресою: 72310, Запорізька область, м. Мелітополь, проспект Б.Хмельницького, 18, аудиторія 1.111.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету за адресою: 72310, Запорізька область, м. Мелітополь, проспект Б.Хмельницького, 18.

Автореферат розісланий 27 квітня 2018 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О.Ю. Вовк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ефективність сільськогосподарського виробництва значною мірою залежить від працездатності сільськогосподарської техніки в різних умовах експлуатації. Сучасна сільськогосподарська техніка являє собою складні енергонасичені комплекси, працездатність яких залежить від надійності її функціональних систем.

Нині в Україні щорічно використовується більше 50 млн. тонн моторних паливних, вироблених з нафти, із них 5,5 млн. тонн припадає на дизельне пальне (ДП), з яких 1,9 млн. тонн застосовується в АПК.

Підвищення цін на пально-мастильні матеріали (ПММ) викликane, головним чином, зменшенням нафти у надрах Землі і залежністю держави у нафтопродуктах за рахунок імпорту на 85...90%. Крім того, застосування мінеральних ПММ призводить до значної кількості шкідливих викидів, що забруднюють навколишнє середовище. Ці факти спонукають до впровадження альтернативних видів ПММ рослинного походження. В більшості своїй вони значно відрізняються від нафтових своїми фізико-хімічними властивостями, які впливають як на організацію робочого процесу, так і на екологічні та техніко-економічні показники сільськогосподарської техніки (СГТ), призводячи до збільшення відмов вузлів і агрегатів функціональних систем. Таким чином, існує **народно-господарська проблема** підвищення надійності використання СГТ при застосуванні альтернативних видів ПММ рослинного походження. Суть проблеми полягає в тому, що внаслідок використання ПММ рослинного походження щорічно відмовляє додатково 15...20 % СГТ, яка експлуатується в Україні. Негативними наслідками вказаної проблеми є підвищення експлуатаційних витрат на утримання СГТ у працездатному стані при використанні біопально-мастильних матеріалів (БПММ). Причиною існування цієї проблеми є наступне: конструкційні матеріали, які застосовують для виготовлення деталей вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ, не призначені до роботи в середовищі БПММ. Шляхами вирішення вказаної проблеми є адаптація вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ до роботи в середовищі БПММ та раціональний підбір ПММ рослинного походження.

Вирішення даної народногосподарської проблеми неможливе без вирішення **науково-технічної проблеми**. Сутність якої полягає в розробленні методології підвищення надійності сільськогосподарської техніки при використанні БПММ. Усе це обумовлює необхідність проведення наукових досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності з концепцією Державної цільової науково-технічної програми розвитку виробництва та використання біологічних видів палива, яка схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України N 276-р від 12 лютого 2009 р.; згідно закону України «Про альтернативні види палива» № 1391-XIV від 14.01.2000 р., та «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року», яка схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013р.; Наказом Мінфіна України № 631 від 04.07.2006 р. «Про визначення Пріоритетних напрямів енергозбереження»; постановою Кабінету Міністрів №1774 від 22.12.2006

р. «Програма розвитку біопалива». З комплексною програмою наукових досліджень Інституту механізації тваринництва Національної академії аграрних наук України 05.1-2/01 НТП «Біосировина», Підпрограма 05 «Промислова переробка джерел біосировини», розділ «Створити наукові основи глибокої переробки та використання біосировини для енергетичного і кормового забезпечення виробництва тваринницької продукції на період 2008...2010р.р».(№ держреєстрації 0108U005350). З комплексною програмою наукових досліджень НДІ Механізації землеробства півдня України Таврійського державного агротехнологічного університету, НТП «Розробка наукових основ, систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки південного регіону України на період 2007...2010 р.р», підпрограма «Виробництво біосировини та раціональне використання паливо-мастильних матеріалів» (№ держреєстрації 0107U008952); НТП «Розробка технології створення та використання експериментальних зразків для переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії» (№ держреєстрації 0111 U 001950); НТП «Удосконалення організації, технології та засобів технічного сервісу складних сільськогосподарських енергетичних засобів в Запорізькій області на період 2010...2015р.р. (на прикладі Мелітопольського району) (№ держреєстрації 0111U002560); НТП «Підвищення надійності технічних і зрошувальних систем та комплексів АПК», розділ «Розробка технологій та апаратів для очищення та контролю від забруднення поливної води, робочих та мастильних рідин на період 2016...2020 р.р».(№ держреєстрації 0116U002743).

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення надійності сільськогосподарської техніки при застосуванні альтернативних видів ПММ рослинного походження за рахунок дотримання відповідних умов її експлуатації і раціонального підбору як пально-мастильних, так і конструкційних матеріалів деталей вузлів і агрегатів.

*Задачі дослідження:*

1. Встановити фактори, які впливають на надійність вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів.
2. Дослідити хімотологічні і триботехнічні властивості біопально-мастильних матеріалів.
3. Розробити методику оцінки надійності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів.
4. Удосконалити методику прогнозування ресурсу вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів.
5. Дослідити вплив біопально-мастильних матеріалів на надійність вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки.
6. Розробити науково-практичні рекомендації щодо підвищення надійності вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів та провести техніко-економічну оцінку ефективності запропонованих наукових вирішень проблеми.

*Об'єкт дослідження* – хімотологічні і триботехнічні процеси, які впливають на надійність функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу основних факторів на показники надійності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів.

**Методи дослідження.** Робота виконана теоретико-експериментальним методом із застосуванням елементів системного аналізу.

Для розроблення математичних моделей і методів розрахунку використано основні положення вищої математики, хімотології, триботехніки, надійності багатоелементних систем і теорії ймовірностей, методи ідентифікації та імітаційного моделювання.

Ресурсна оцінка надійності функціональних систем сільськогосподарської техніки, при використанні біопально-мастильних матеріалів, проводилася в аграрних підприємствах при виконанні сільськогосподарських робіт.

Перевірка гіпотез і обробка експериментальних даних виконана за стандартними та розробленими програмами.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше встановлено, що показники надійності функціональних систем при періодичному режимі роботи нижчі, ніж при постійному в процесі експлуатації сільськогосподарської техніки на біопально-мастильних матеріалах, що дозволило встановити чисельні значення цих показників та виявити основні фактори, які впливають на надійність окремих елементів вузлів і агрегатів.

2. Удосконалено методику покращення та контролю паливних і гліцеринових фракцій в біопально-мастильних матеріалах акустичним методом, що дозволяє обґрунтовувати частоту, час та інтенсивність ультразвукової обробки з одночасним контролем якісних показників.

3. Удосконалено математичні моделі надійності функціональних систем сільськогосподарської техніки, які дозволяють виявляти їх "слабкі ланки" при експлуатації на біопально-мастильних матеріалах.

4. Вперше встановлено коефіцієнти середовища і режиму роботи, що дозволило моделювати процеси зношування вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки на біопально-мастильних матеріалах.

5. Удосконалено методику визначення ресурсу вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки за допомогою коефіцієнта зносу, що дає змогу враховувати силові, швидкісні та конструктивні параметри трибоспряжень.

6. Отримала подальший розвиток методика оцінки триботехнічних характеристик металів і сплавів в середовищі біопально-мастильних матеріалів, що дозволяє приймати оптимальні рішення у виборі матеріалів трибоспряжень вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки.

7. Удосконалено методику прогнозування ресурсу вузлів і агрегатів, що дозволило обґрунтувати міжремонтний ресурс функціональних систем сільськогосподарської техніки.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблено практичні рекомендації по забезпеченню надійності роботи сільськогосподарської техніки на біопально-мастильних матеріалах, які прийнято до впровадження: Департаментом агропромислового розвитку Запорізької ОДА, ННЦ «ІМЕСГ», ПМВКП «Ассоль», ТОВ ВТК «Юждизельмаш», ТОВ «Мелітопольська машинобудівна компанія», ПП «Калюжний», ПНВП «Кермек», ПП «Ниса-2010», ПП «Скробогатько».

2. Розроблено рекомендації по уточненню міжремонтних періодів сільськогосподарської техніки при експлуатації на біологічних ПММ з метою підвищення її експлуатаційної надійності і зниження витрат на пально-мастильні матеріали. Рекомендовано фактичні терміни напрацювання функціональних систем сільськогосподарської техніки, які прийнято до впровадження ФГ «Лаванда» Гуляйпольського району Запорізької області.

3. Розроблено рекомендації по застосуванню матеріалів трибоспрямих сільськогосподарської техніки для кормовиробництва при експлуатації її на БПММ. Встановлено, що використання хромистих сталей в механізмах і агрегатах функціональних систем сільськогосподарської техніки, яка експлуатувалась на біологічних пально-мастильних матеріалах повинно бути обмежене із-за інтенсивності водневого зкрихчування, які прийнято до впровадження НДІ Механізації тваринництва НААН України.

4. Розроблено рекомендації по застосуванню фторкаучуку для ущільнюючих прокладок і кілець паливної апаратури сільськогосподарської техніки при експлуатації на біопальному. Встановлено, що ресурс вказаних ущільнюючих прокладок і кілець становить не менше 12000 мото-год. Це відповідає нормованому ресурсу ПНВП, які прийнято до впровадження ПП «Сократ» Приморського району Запорізької області.

5. Розроблено спосіб оцінки триботехнічних характеристик матеріалів через узагальнений показник зносу, що дозволяє враховувати силові, швидкісні, ресурсні характеристики, а також середовище і режим роботи трибоспрямих сільськогосподарської техніки (патент України на корисну модель № 70695).

6. Розроблено методику контролю якісних показників біодизеля акустичним методом (патент України на корисну модель № 98876).

7. Розроблено номограми та комп'ютерні програми для прогнозування ресурсу функціональних систем сільськогосподарської техніки на мінеральних і біологічних ПММ.

8. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, які відображають суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Постановка завдань, аналіз і трактування результатів виконано спільно з науковим консультантом.

У наукових працях, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- визначенні комплексного показника оцінки зносостійкості матеріалів вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки [1,3-5,10,51];

- визначенні критеріїв оцінки стійкості матеріалів трибоспряжень вузлів і агрегатів функціональних систем до зношування [13,19];

- оцінці триботехнічних властивостей біопально-мастильних матеріалів для вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки і розробці методів та засобів їх контролю [7,8,14-18,19,20-24,28,30,32-34,36,39,45,53,55-57];

- визначенні основних хімотологічних властивостей біопально-мастильних матеріалів [2,6];

- визначенні експлуатаційних показників роботи сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів [9,11,12];

- моделюванні оцінки надійності вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки при експлуатації її на біопально-мастильних матеріалах [46,47,58,59].

Дослідження проводилися в наукових лабораторіях ТДАТУ і у виробничих умовах – в сервісних та аграрних підприємствах Вінницької та Запорізької областей.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях (м. Мелітополь, ТДАТУ (ТДАТА), 2003...2017 р.р.); міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (м. Харків, ХНТУСГ, 2008 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві» (м. Запоріжжя, ІМТ НААНУ, 2010 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» пам'яті академіка П.М. Василенка (м. Луганськ, ЛДАУ, 2012 р.); международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и информационных технологий» (г. Белгород, БелГСА им. В.Я.Горина (Россия), 2012 г.); международной научной конференции «Проблемы экономического развития аграрного сектора регионов». – г. Кишинёв (Молдова), 2012г; IX международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК» ФГБОУ ВПО Ставропольский государственный аграрный университет. – г. Ставрополь (Россия), 2013г.; LXIX науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів національного транспортного університету. – м. Київ, 2013р.; международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве». – г. Минск (Беларусь), 2013г; VI міжнародній науково-технічній конференції присвяченій пам'яті академіка І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України». – м. Мелітополь, 2015 р.; XVII міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченій 116-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодієвича Василенка. – м. Суми, 2016 р.; XIII міжнародній науковій конференції «Рациональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2017» присвяченій 116-й річниці з дня народження Момотенка Миколи Петровича. – м. Київ, 2017 р.; XI міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». – м. Кропивницький, 2017 р.

**Публікації.** Основний зміст і результати дисертаційної роботи опубліковані в 59 наукових працях. Зокрема, 42 статті – у фахових виданнях, 8 статей – у міжнародних виданнях та у фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 8 публікацій тез матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій, отримано 9 патентів України, із яких 1 патент України на винахід та 8 патентів України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 438 сторінках машинописного тексту формату А4 і включає вступ, 7 розділів основної частини, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 265 найменувань. Робота містить 17 таблиць, 134 рисунки та 13 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз факторів, які впливають на надійність сільськогосподарської техніки» приведено аналіз основних показників біопально-мастильних матеріалів та конструктивних особливостей вузлів і агрегатів, які впливають на надійність СГТ. Також проаналізовано існуючі методи надійності та прогнозування технічного стану вузлів і агрегатів СГТ.

Важливий вклад в підвищення експлуатаційної надійності вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки внесли такі вчені: В.Д. Войтюк, М.А. Григорьев, В.А. Дідур, В.П. Коваленко, А.Т. Лебедев, Р.М. Матвеевський, О.С. Проніков, В.Є. Черкун, Г.Є. Топілін, М.І. Черновол та багато інших.

Аналіз процесів, які відбуваються при використанні ПММ біологічного походження детально описано такими вченими, як В.А. Войтов, Г.А. Голуб, С.М. Девянін, В.А. Дідур, Г.М. Калетник, Д.А. Коршунов, В.М. Кюрчев, П.А. Лебедев, В.А. Марков, В.Т. Надикто, В.В. Остріков, В.Г. Семенов та багато інших.

Проведений аналіз показав, що використання біологічних ПММ для СГТ потребує додаткових досліджень із підвищення надійності вузлів та агрегатів її функціональних систем з врахуванням середовища та режиму роботи.

Тому в основу роботи покладені дослідження з розроблення методології підвищення надійності СГТ при використанні БПММ.

У другому розділі «Хімотологічні і триботехнічні властивості біопально-мастильних матеріалів» приведені основні хімотологічні і триботехнічні властивості БПММ, а також методи покращення та контролю їх якісних показників. Обґрунтовано оптимальний склад БПММ для забезпечення надійної і ефективної роботи функціональних систем сільськогосподарської техніки: для біодизеля – 25...30% метилових ефірів ріпакової оливи (МЕРО) і 70...75% ДП, для гідравлічних олів – 40...45% ріпакової оливи (РО) і 55...60% мінеральної оливи (МО).

В зв'язку з тим, що одним із недоліків БПММ є малий термін зберігання, то для його збільшення запропоновано проводити їх ультразвукову обробку. В результаті досліджень визначено параметри такої ультразвукової обробки: час – 10...12 хв., номінальна частота – 22 кГц і інтенсивність – 0,8...1,2 Вт/см<sup>2</sup>, що дозволило зменшити коефіцієнт тертя на 19 % і в'язкість на 3,5 %, а термін зберігання збільшити в 2 рази. Контроль якості здійснювали розробленим



електроакустичним комплексом за вмістом гліцеринової фракції в біодизелі і паливної фракції в біооливі в діапазоні 0...5%, з похибкою вимірювання 0,8 %.

Для покращення властивостей біоолив необхідно вводити в них добавки і присадки. В результаті досліджень встановлено, що для забезпечення метало-плакувального ефекту необхідно вводити в біооливи 0,8...1,0 % багатофункціональних добавок типу МКФ-18, а для покращення антифрикційних властивостей в умовах граничного тертя необхідно вводити 6...8 % антифрикційних присадок типу SMT 2514.

У третьому розділі «**Моделювання надійності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів**» розроблені моделі надійності функціональних систем СГТ. При обробці експериментальних даних використовували методи математичної статистики, зокрема статистики випадкових процесів та часових рядів.

Для побудови математичного опису процесу зміни параметра керувалися теорією випадкових функцій (теоремою Байєса) та теорією ймовірностей, враховуючи принципи функціональних взаємодій для системного підходу та використовуючи теорію надійності.

Методи теорії моделювання складних функціональних систем є базою для формування імітаційної моделі процесу технічної експлуатації машин. В процесі експлуатації СГТ із-за зношування її деталей і порушення герметичності змінюються параметри, які характеризують працездатність вузлів і агрегатів в цілому.

Сільськогосподарська техніка складається із комплексу складних функціональних систем, які поділяються на нерезервовані і резервовані відновлювальні системи.

Критеріями надійності нерезервованих відновлюваних систем є:

$K_{\Gamma}(t)$  – функція готовності (ймовірність того, що система готова до роботи в довільний момент часу  $t$ ).

$K_{\Gamma}$  – функція готовності (фінальна ймовірність того, що система справна в довільний момент часу  $t$ ).

$T$  – наробіток на відмову (середній час між відмовами).

$T_B$  – середній час відновлення системи.

$\varpi(t)$  – параметр потоку відмов.

Між цими показниками існує залежність виду:

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B},$$

$$K_{\Gamma} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\Gamma}(t) \quad (1)$$

Показники надійності відновлювальних і невідновлювальних систем пов'язані між собою інтегральним рівнянням:

$$\varpi(t) = f(t) = \int_0^t \varpi(\tau) \cdot f(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

де  $f(t)$  – щільність розподілу часу до відмови невідновлювальної системи.

Рішення інтегрального рівняння (2) не дозволяє в явному вигляді отримати залежність функції готовності від показників надійності системи, тобто ймовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов, наробітку на відмову, середнього часу відновлення системи та інших.

Тому необхідно розглядати надійність відновлюваної системи, як одного елемента.

Складність розрахунку показників надійності полягає в обчисленні функції готовності  $K_{\Gamma}(t)$  – ймовірність того, що система готова до роботи в довільний момент часу  $t$ .

Функція готовності відповідає інтегральному рівнянню (формули включають згортки функцій які позначені символом  $*$ ). Вираз  $f^{*(i)}(t) = \underbrace{f * f * \dots * f}_i(t)$  виражає  $i$ -кратну згортку функції  $f(t)$ .

$$K_{\Gamma}(t) = f * g(t)K_{\Gamma}(t) + P(t), \quad (3)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної системи;  $g(t)$  – щільність розподілу часу відновлення системи. Рішенням рівняння (3) є функція:

$$K_{\Gamma}(t) = P(t) + \sum_{k=1}^{\infty} f^{*(k)} * g^{*(k)} * P(t) \quad (4)$$

Згортка функції  $f * g(t)$  для постійної інтенсивності розраховується за формулою:

$$f * g(t) = \int_0^{b(t)} f(t-x) \mu \cdot e^{-\mu x} dx, \quad (5)$$

де  $b(t) = \min(t, a) = \min\left(t; -\frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{\varepsilon}{\mu}\right)\right)$ ,  $\varepsilon$  – точність обчислень,

$\mu$  – інтенсивність відновлення системи.

Функція  $K_{\Gamma}(t)$  наведена в аналітичному вигляді, проте не дає можливості обчислень в інженерних розрахунках.

Передбачені окремі випадки, що допускають чисельне і аналітичне вирішення.

Стосовно нормального розподілу випадкових величин наробітку на відмову функція імовірності безвідмовної роботи машини приймає вид:

$$P(t)_M = \left[ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t_n - t_u)^2}{2\sigma^2}} dt \right] \cdot \prod_{j=2}^m P(t)_j^{1/m},$$

(6)

де  $t_H$  – наробіток на відмову найслабшого вузла;

$\bar{t}_u$  – середнє значення наробітку на відмову;  
 $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення наробітку;  
 $j$  – інші складові машини від  $j = 2$  до  $j = m$ .

$$P(t)_j = \left[ 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t_j - \bar{t}_j)^2}{2\sigma^2}} dt \right] \quad (7)$$

Якщо випадкові величини наробітку на відмову підпорядковуються закону розподілу Вейбулла, то наведені показники визначаються:

$$P(t)_M = \left( e^{-\frac{t^k}{\bar{t}^k}} \right) \cdot \prod_{j=2}^m P(t)_j^{1/m}, \quad (8)$$

де  $k$  – параметр розподілу закону,

$$P(t)_j = e^{-\frac{t_j^k}{\bar{t}^k}} \quad (9)$$

Функція готовності нерезервованої системи, що складається з елементів має загальний вигляд:

$$K_{\Gamma}(t) = \sum_{t_1=0}^{\infty} \sum_{t_2=0}^{\infty} \dots \sum_{t_n=0}^{\infty} \left( f_1^{*(t_1)} * P_1 \cdot f_2^{*(t_2)} * P_2 \dots f_n^{*(t_n)} * P_n \right) \cdot \left( t - \sum_{k=1}^n i_k \cdot T_{Bi_k} \right), \quad (10)$$

де  $f_j(t)$  – щільність розподілу безвідмовної роботи;

$P_j(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи  $j$  – го елемента;

$g_j(t)$  – щільність розподілу часу відновлення  $j$  – го елемента,  
 $j = 1, 2, \dots, n$ .

де

$$T_{B_j} = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{\mu_j}}{\sum_{j=1}^k \lambda_j} \quad \text{– середній час відновлення системи;}$$

$$T_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} - \text{середнє значення наробітку на відмову.}$$

На підставі формули 4 отримані формули для практичного застосування, зокрема для випадків:

1) час безвідмовної роботи  $j$  – го елементу, має нормальний розподіл ймовірностей з параметрами  $(T_j, \sigma_j)$ , тоді:

$$f_j^{*(t_j)} * P_j(t) = \Phi_0\left(\frac{t - i_j T_j}{\sqrt{k} \cdot \sigma_j}\right) - \Phi_0\left(\frac{t - (i_j + 1)T_j}{\sqrt{k+1} \cdot \sigma_j}\right), \quad (11)$$

де  $\Phi_0(t)$  – функція Лапласа. Відповідно формули (10) коефіцієнт готовності системи дорівнює:

$$K_\Gamma(t) = \sum_{t_1=0}^{\infty} \sum_{t_2=0}^{\infty} \dots \sum_{t_n=0}^{\infty} \prod_{j=1}^n \left( \Phi_0\left(\frac{t - i_j T_j - \sum_{k=1}^n i_k \cdot T_{Bi_k}}{\sqrt{t_j} \cdot \sigma_j}\right) - \Phi_0\left(\frac{t - (i_j + 1)T_j - \sum_{k=1}^n i_k \cdot T_{Bi_k}}{\sqrt{t_j + 1} \cdot \sigma_j}\right) \right). \quad (12)$$

Передбачається, що час відновлення елементів системи постійний  $g_j(t) = \delta_{T_{Bj}}(t)$ .

2) час безвідмовної роботи  $j$  – го елементу, має гамма-розподіл ймовірностей з параметрами  $(\alpha_j, \beta_j)$ , тоді:

$$f_j^{*(i_j)} * P_j(t) = \Gamma\left(i_j \alpha_j, \frac{1}{\beta_j}\right) - \Gamma\left((i_j + 1) \alpha_j, \frac{1}{\beta_j}\right), \quad (13)$$

відповідно коефіцієнт готовності системи дорівнює:

$$K_\Gamma(t) = \sum_{t_1=0}^{\infty} \sum_{t_2=0}^{\infty} \dots \sum_{t_n=0}^{\infty} \prod_{j=1}^n \left( \Gamma\left(i_j \alpha_j, \frac{1 - \sum_{k=1}^n i_k \cdot T_{Bi_k}}{\beta_j}\right) - \Gamma\left((i_j + 1) \alpha_j, \frac{1 - \sum_{k=1}^n i_k \cdot T_{Bi_k}}{\beta_j}\right) \right), \quad (14)$$

де  $\Gamma(k, t)$  – неповна гамма-функція.

Істотним недоліком отриманих коефіцієнтів є відсутність спільності законів розподілу і використання для систем з числом елементів, що не перевищують кількох десятків. Функція готовності нерезервованої системи з великим числом елементів, підлеглих не експоненціальним законам розподілу часу до відмови, може бути отримана із формули:

$$K_\Gamma(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{K_{ni}(t)}{K_{\Gamma i}(t)}}, \quad (15)$$

де  $K_{ni}(t)$  – функція простою,  $K_{\Gamma i}(t)$  – функція готовності  $i$  – го елементу.

Методи розрахунку показників надійності резервованих відновлюваних систем, як правило, є складними в інженерному застосуванні. Цього можна уникнути при деяких припущеннях, виділяючи системи в класи з простими алгоритмами для обчислення показників надійності. До них відносяться: спрощення структурної схеми розрахунку надійності; незалежність елементів по відмовах і відновленню; експоненціальні закони розподілу часу безвідмовної роботи і часу відновлення елементів; певні правила обслуговування, відмови елементів; стаціонарний характер показників надійності системи.

При оцінці надійності стаціонарних і нестаціонарних показників надійності відновлюваних систем найчастіше використовують методи одновимірних і багатовимірних марковських випадкових процесів. Значення показників надійності є наближеними і розраховуються наближеними методами.

Коефіцієнт готовності, напрацювання на відмову, середній час відновлення і середній час безвідмовної роботи обчислювали за формулами:

$$K_T(t) = \frac{1 + \sum_{k=1}^{n-1} p_1 \dots p_k}{1 + \sum_{k=1}^n p_1 \dots p_k}, \quad T = \frac{1 + \sum_{k=1}^{n-1} p_1 \dots p_k}{\lambda_n p_1 \dots p_{n-1}}, \quad T_B = \frac{1}{\mu_n},$$

$$T_1 = \sum_{k=1}^n \frac{1 + \gamma_{k-1} + \gamma_{k-1} \gamma_{k-2} + \dots + \gamma_{k-1} \dots \gamma_1}{\lambda_k}, \quad (16)$$

де  $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ ,  $\gamma_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i}$ ,  $\lambda_i$  – інтенсивність переходів, відповідні відмови елементів системи;

$\mu_i$  – інтенсивності переходів, відповідні відновленню елементів системи;  $n+1$  – загальне число станів.

Математичною моделлю функціонування системи є система звичайних диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} p'_0(t) = -\lambda_c p_0(t) - \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot p_i(t) \\ p'_i(t) = \lambda_i p_0(t) - \mu_i \cdot p_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases}, \quad (17)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмови  $i$ -го елемента, відповідні відмовам елементів системи;  $\mu_i$  – інтенсивності відновлення  $i$ -го елемента,  $\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  – інтенсивність відмови системи,  $p_0(t) = K_T(t)$  – ймовірність того, що в момент  $t$  система справна,  $p_i(t)$  – ймовірність того, що в момент  $t$  система знаходиться в несправному стані внаслідок відмови  $\bar{i}$  – го елемента.

Систему (17) лінійних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами можливо вирішувати аналітично (для обмеженого числа елементів при фіксованому

значенні інтенсивностей відмови і відновлення) і чисельним (наближеним, зокрема Рунге - Кутта).

Статистичний аналіз по функціональним системам СГТ дозволив визначити розподіл їх відмов (рис.1).

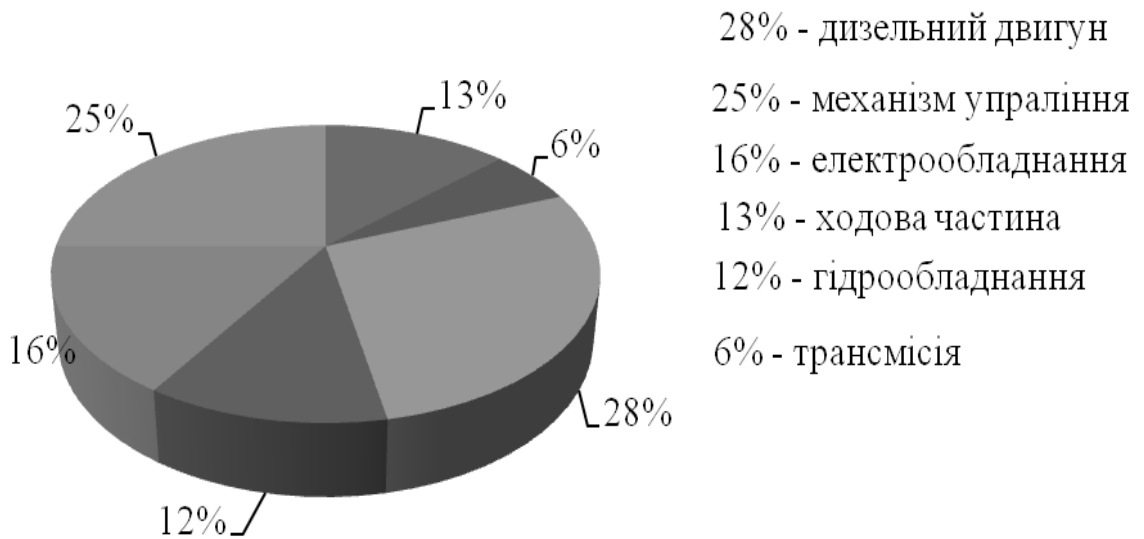


Рисунок 1 - Розподіл відмов по функціональним системам СГТ

Опис основних вузлів і агрегатів функціональних систем сільськогосподарської техніки наведено у вигляді графу, тобто наочного зображення взаємозв'язку елементів вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ (рис. 2). Графова модель  $G\{V, P\}$  складається з двох множин – множини  $V$  об'єктів вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ і множини  $P$  зв'язків - інтенсивностей їх відмов. В основу покладено один із основних принципів надійності – принцип забезпечення рівної безвідмовності елементів шляхом виявлення і усунення «слабкої ланки».

Графову модель використовували з метою комп'ютерного моделювання процесу функціонування елементів вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ.

Взаємозв'язок елементів вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ наведений наступним чином: 0 – мобільна техніка; 1 –дизельний двигун; 2 – трансмісія; 3 – ходова частина; 4 – гідрообладнання; 5 – електрообладнання; 6 – механізм управління; 11 – кривошипно-шатунний механізм; 12 – система змащення; 13 – електрообладнання; 14 – система запуску; 15 – газорозподільний механізм; 16 – паливна апаратура; 41 – насос; 42 – гідролінії; 43 – гідроциліндр; 44 – розподільник; 45 – ущільнення гідравлічної системи; 21 – механічна трансмісія; 51 – вали шліцеві; 52 – шестерні; 53 – підшипники; 54 – синхронізатори; 55 – ущільнення трансмісійної системи; 22 – гідростатична трансмісія; 61 – насос підпитки; 62 – качаючий вузол насоса; 63 – качаючий вузол гідромотора; 64 – клапанна коробка; 65– система управління; 71 – паливний бак; 72 – підкачуючий насос; 73 – паливний фільтр; 74 – паливний насос високого тиску; 75 – форсунка; 76 – трубопроводи; 81 – плунжерна пара; 82 – клапан; 83 – підкачуючий насос; 84 – ущільнення паливної системи.

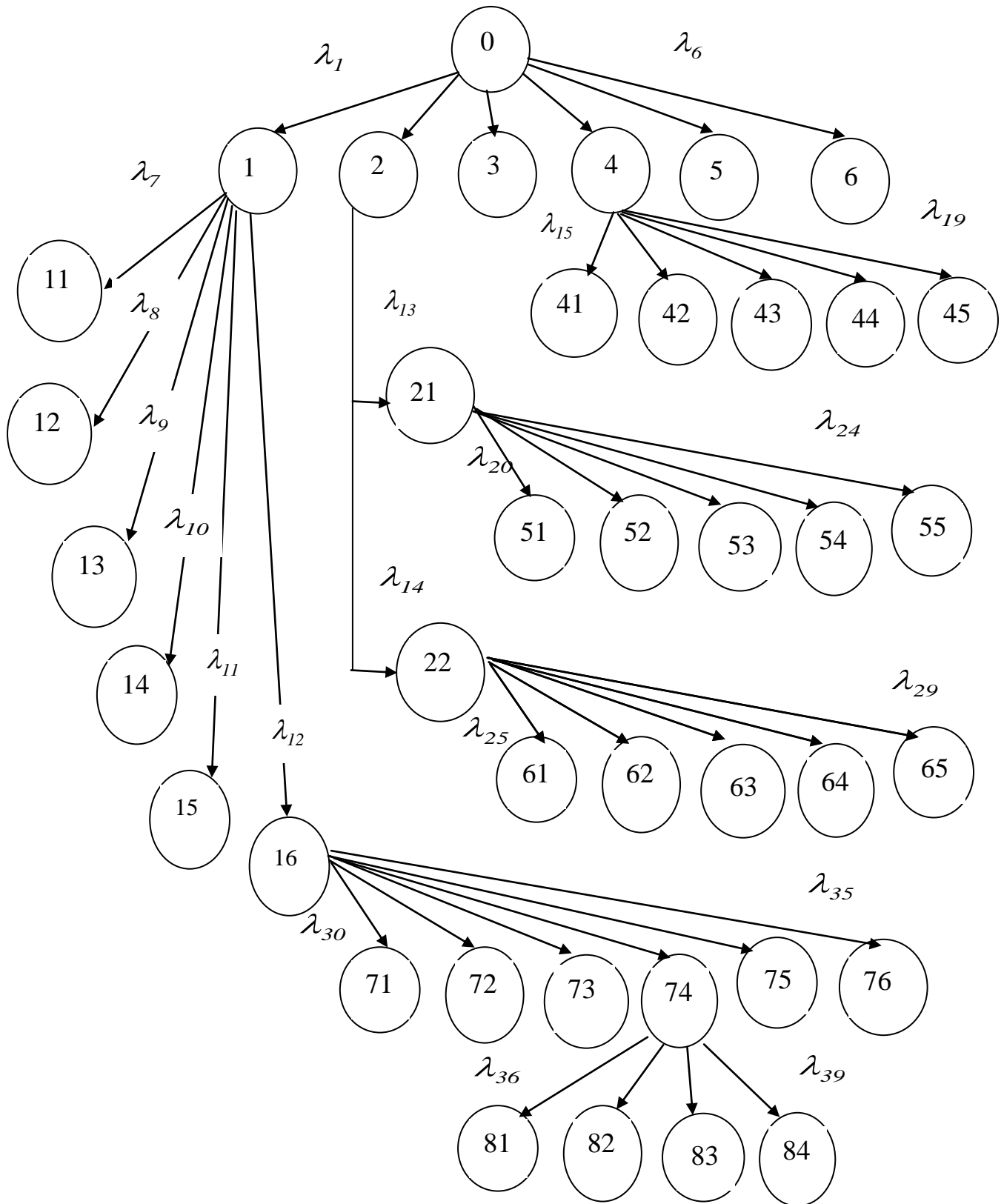


Рисунок 2 – Граф стану вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ

Система лінійних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами описує процес функціонування систем СГТ, яка має вид:

$$\#1 = \left\{ \begin{array}{l} p'_0(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6)p_0(t) + \\ \quad + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t) + \mu_3 p_3(t) + \mu_4 p_4(t) + \mu_5 p_5(t) + \mu_6 p_6(t) \\ p'_1(t) = \lambda_1 p_0(t) - (\lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12})p_1(t) + \\ \quad + \mu_7 p_{11}(t) + \mu_8 p_{12}(t) + \mu_9 p_{13}(t) + \mu_{10} p_{14}(t) + \mu_{11} p_{15}(t) + \mu_{12} p_{16}(t) \\ p'_{11}(t) = \lambda_7 p_1(t) \\ p'_{12}(t) = \lambda_8 p_1(t) \\ p'_{13}(t) = \lambda_9 p_1(t) \\ p'_{14}(t) = \lambda_{10} p_1(t) \\ p'_{15}(t) = \lambda_{11} p_1(t) \\ p'_{16}(t) = \lambda_{12} p_1(t) - (\lambda_{30} + \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + \lambda_{35})p_{16}(t) + \\ \quad + \mu_{30} p_{71}(t) + \mu_{31} p_{72}(t) + \mu_{32} p_{73}(t) + \mu_{33} p_{74}(t) + \mu_{34} p_{75}(t) + \mu_{35} p_{76}(t) \\ p'_2(t) = \lambda_2 p_0(t) - \lambda_{13} p_2(t) - \lambda_8 p_2(t) + \mu_{14} p_{22}(t) + \mu_{13} p_{21}(t) \\ p'_3(t) = \lambda_3 p_0(t) \\ p'_4(t) = \lambda_4 p_0(t) - (\lambda_{15} + \lambda_{16} + \lambda_{17} + \lambda_{18} + \lambda_{19})p_4(t) + \\ \quad + \mu_{15} p_{41}(t) + \mu_{16} p_{42}(t) + \mu_{17} p_{43}(t) + \mu_{18} p_{44}(t) + \mu_{19} p_{45}(t) \\ p'_{21}(t) = \lambda_{13} p_2(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24})p_{21}(t) \\ \quad + \mu_{20} p_{51}(t) + \mu_{21} p_{52}(t) + \mu_{22} p_{53}(t) + \mu_{23} p_{54}(t) + \mu_{24} p_{55}(t) \\ p'_{22}(t) = \lambda_{14} p_2(t) - (\lambda_{25} + \lambda_{26} + \lambda_{27} + \lambda_{28} + \lambda_{29})p_{22}(t) + \\ \quad + \mu_{25} p_{61}(t) + \mu_{26} p_{62}(t) + \mu_{27} p_{63}(t) + \mu_{28} p_{64}(t) + \mu_{29} p_{65}(t) \\ p'_{41}(t) = \lambda_{15} p_4(t) \\ p'_{42}(t) = \lambda_{16} p_4(t) \\ p'_{43}(t) = \lambda_{17} p_4(t) \\ p'_{44}(t) = \lambda_{18} p_4(t) \\ p'_{45}(t) = \lambda_{19} p_4(t) \end{array} \right.$$

де  $\lambda_{i,j}$  - інтенсивність переходу із стану  $i$  в стан  $j$ ,

$\mu_{i,j}$  - інтенсивність відновлення переходу із стану  $i$  в стан  $j$ .

Для  $t = 0$  всі елементи системи вважаються справними при початкових умовах:  $p_0(0) = 1$ ,  $p_i(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  знаходиться частний розрахунок рівняння.

Система розраховується чисельним методом Рунге-Кутта.

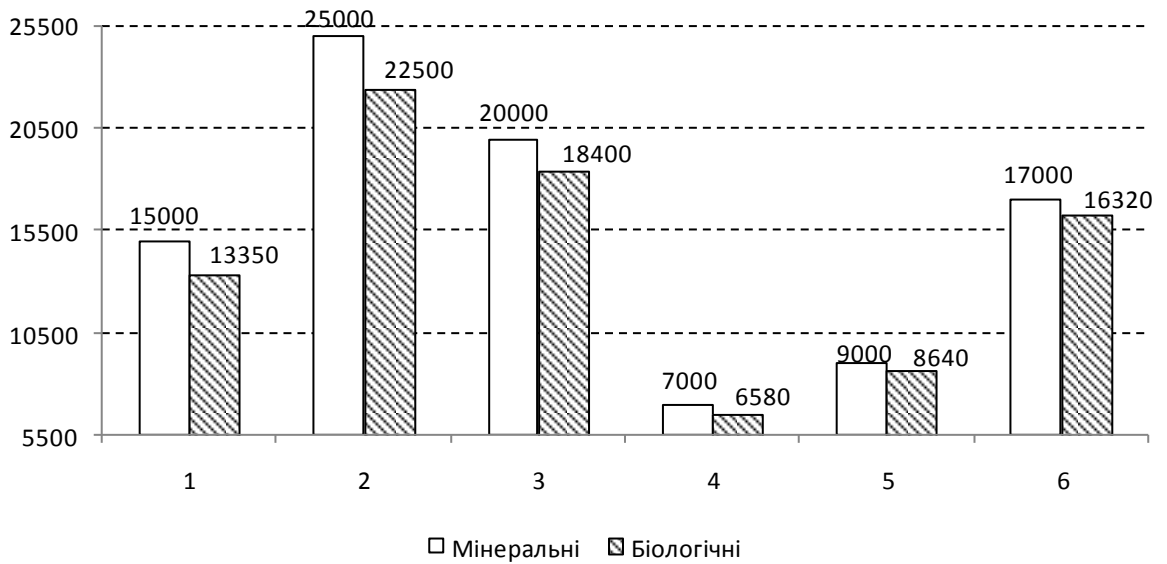


$$\#2 = \left\{ \begin{array}{l} p'_{51}(t) = \lambda_{20} p_{21}(t) \\ p'_{52}(t) = \lambda_{21} p_{21}(t) \\ p'_{53}(t) = \lambda_{22} p_{21}(t) \\ p'_{54}(t) = \lambda_{23} p_{21}(t) \\ p'_{55}(t) = \lambda_{24} p_{21}(t) \\ p'_5(t) = \lambda_5 p_0(t) \\ p'_6(t) = \lambda_6 p_0(t) \\ p'_{61}(t) = \lambda_{25} p_{22}(t) \\ p'_{62}(t) = \lambda_{26} p_{22}(t) \\ p'_{63}(t) = \lambda_{27} p_{22}(t) \\ p'_{64}(t) = \lambda_{28} p_{22}(t) \\ p'_{65}(t) = \lambda_{29} p_{22}(t) \\ p'_{71}(t) = \lambda_{30} p_{16}(t) \\ p'_{72}(t) = \lambda_{31} p_{16}(t) \\ p'_{73}(t) = \lambda_{32} p_{16}(t) \\ p'_{74}(t) = \lambda_{33} p_{16}(t) - (\lambda_{36} + \lambda_{37} + \lambda_{38} + \lambda_{39}) p_{74}(t) + \\ \quad + \mu_{36} p_{81}(t) + \mu_{37} p_{82}(t) + \mu_{38} p_{83}(t) + \mu_{39} p_{84}(t) \\ p'_{75}(t) = \lambda_{34} p_{16}(t) \\ p'_{76}(t) = \lambda_{35} p_{16}(t) \\ p'_{81}(t) = \lambda_{36} p_{74}(t) \\ p'_{82}(t) = \lambda_{37} p_{74}(t) \\ p'_{83}(t) = \lambda_{38} p_{74}(t) \\ p'_{84}(t) = \lambda_{39} p_{74}(t) \\ \sum_{i=1,..k} p_i(t) = 1 \end{array} \right.$$

Вирішення системи рівнянь є матриця ймовірностей безвідмовної роботи функціональних систем СГТ при роботі на мінеральних і біологічних ПММ

Статистичний аналіз наробітку функціональних систем СГТ, що поступають в ремонт, дозволив встановити середні значення наробітку до відмови та їх 80% ресурс, що відповідає нормованим середнім ресурсам.

Середні ресурси функціональних систем СГТ при роботі на різних видах ПММ наведені на рис.3.

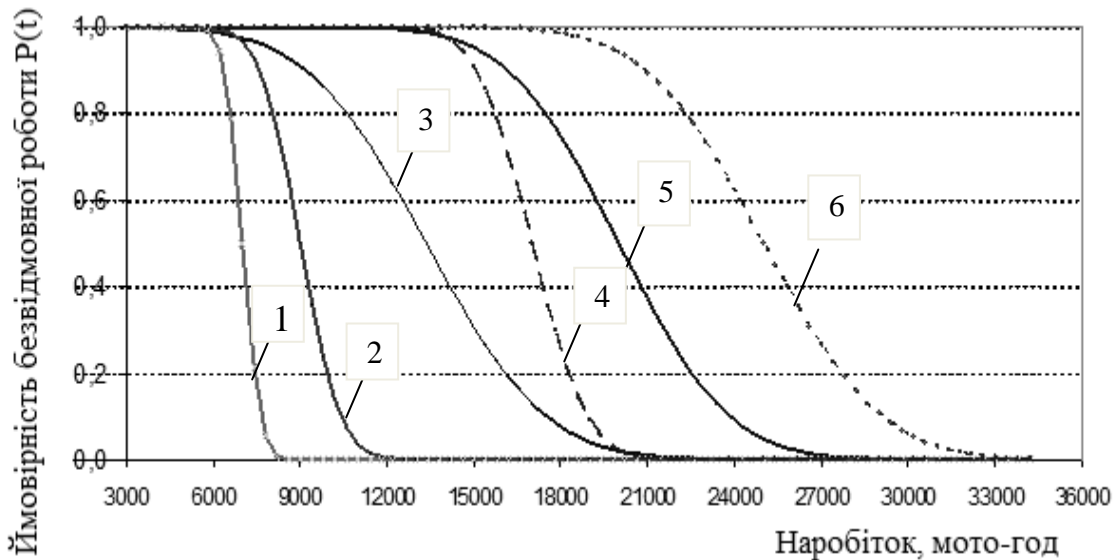


1 – дизельний двигун, 2 – трансмісія, 3 – ходова частина, 4 – гідروобладнання, 5 – електрообладнання, 6 – механізм управління

Рисунок 3 – Середні ресурси функціональних систем СГТ при роботі на різних видах ПММ, мото-год

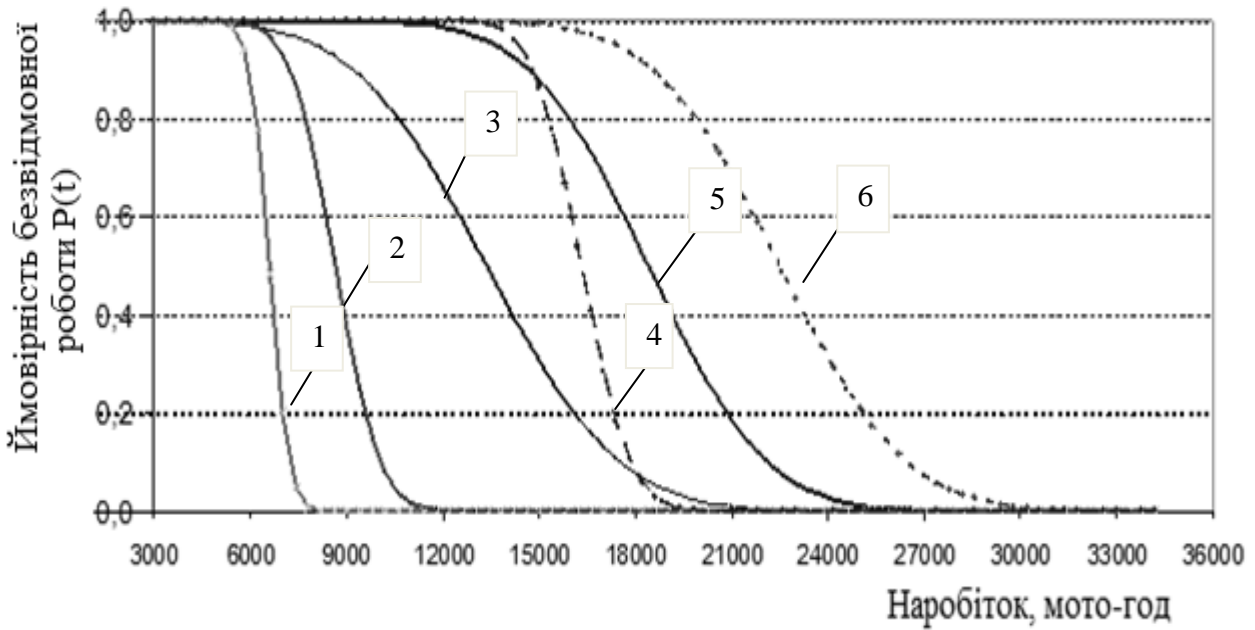
Нами встановлено, що зниження ресурсу функціональних систем СГТ при роботі на біологічних ПММ пояснюється активною дією вільних жирних кислот і метанолів біологічних ПММ на матеріали усіх елементів її функціональних систем, що призводить до руйнування поверхонь трибоспряжень і збільшення зносу деталей вузлів і агрегатів.

Ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем СГТ на мінеральних та біологічних ПММ наведені на рис.4.



1 – гідрообладнання; 2 – електрообладнання; 3 – дизельний двигун; 4 – механізм управління; 5 – ходова частина; 6 – трансмісія

Рисунок 4 – Ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем СГТ при роботі на мінеральних ПММ



1 – гідрообладнання; 2 – електрообладнання; 3 – дизельний двигун; 4 – механізм управління; 5 – ходова частина; 6 – трансмісія

Рисунок 5 – Ймовірності безвідмовної роботи функціональних систем СГТ на біологічних ПММ

Як видно з рис. 4 і 5, найменш надійними функціональними системами сільськогосподарської техніки є електро– і гідрообладнання.

Ймовірності ресурсної безвідмовності СГТ при роботі на різних видах ПММ наведені на рис.6.

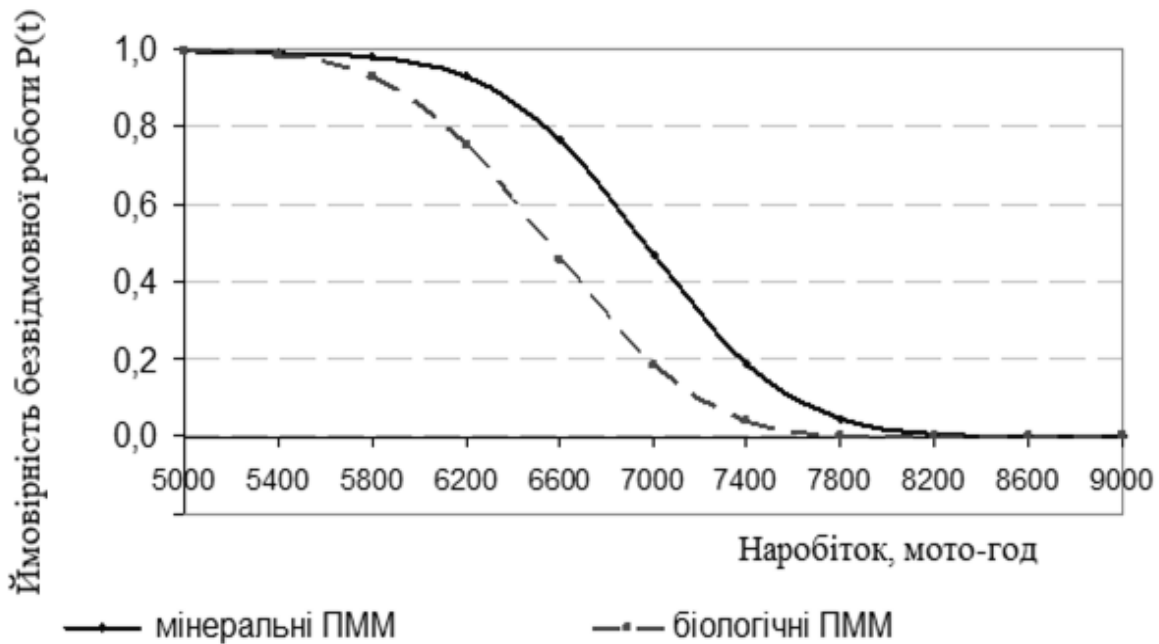
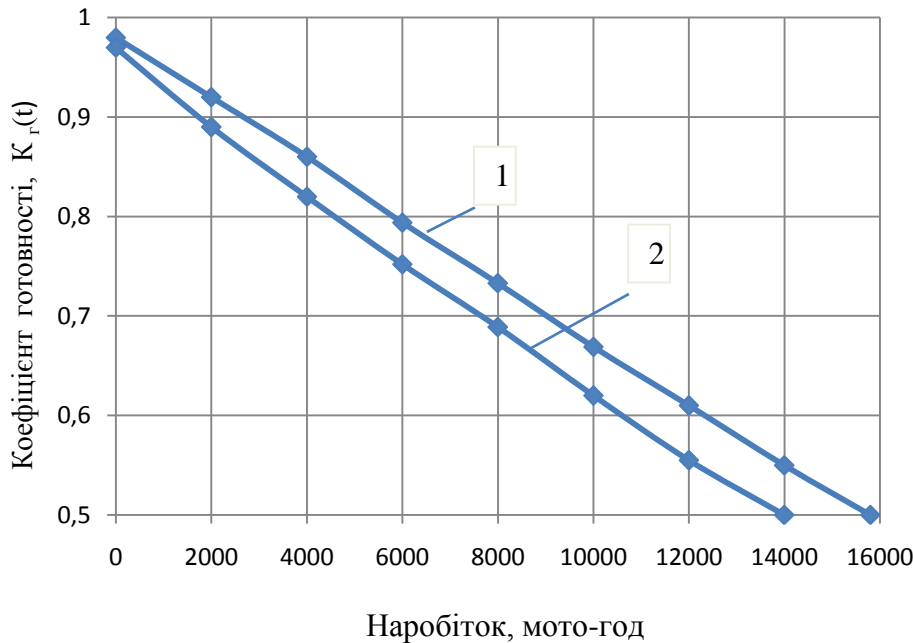


Рисунок 6 – Ймовірності безвідмовної роботи СГТ при роботі на різних видах ПММ

Коефіцієнт готовності функціональних систем СГТ дорівнює сумі ймовірностей всіх справних її станів:

$$K_r(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t). \quad (18)$$

Коефіцієнти готовності функціональних систем СГТ при роботі на мінеральних і біологічних ПММ наведені на рис.7.



1 – мінеральні ПММ; 2 – біологічні ПММ

Рисунок 7 – Коефіцієнти готовності функціональних систем СГТ при роботі на мінеральних і біологічних ПММ

Таким чином встановлено, що коефіцієнт готовності функціональних систем СГТ при роботі на мінеральних ПММ вище чим при роботі на біологічних ПММ. При досягненні числового значення  $K_r(t)=0,5$ , при якому подальша експлуатація СГТ не доцільна, наробіток її становить: на БПММ – 14000 мото-год., а на мінеральних 16000 мото-год. Для збільшення  $K_r(t)$ , необхідно підвищити надійність спряжень вузлів і агрегатів СГТ шляхом виявлення і усунення «слабкої ланки».

**В четвертому розділі «Вплив триботехнічних властивостей біопально-мастильних матеріалів на зносні характеристики вузлів і агрегатів функціональних систем»** приведено основні фактори, які впливають на надійність вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ в середовищі БПММ.

При аналізі стійкості деталей трибоспряджень до зношування, в основному, дається відносний показник зносостійкості матеріалів. Відсутність же абсолютного показника зносостійкості або зносу матеріалів в конкретних умовах зношування значно ускладнює аналітичний розрахунок довговічності деталей по зносу.

Таким абсолютним показником може бути коефіцієнт зносу матеріалів деталей пар тертя, що враховує зносостійкість матеріалів і умови зношування. Останній

залежить від розподілу питомого тиску по поверхні контакту, швидкості відносного переміщення деталей трибоспряжень і часу наробітку.

Основною умовою процесу зношування прийнято рівність роботи тертя і роботи, що витрачається на зношування  $A_1=A_2$ .

Робота тертя являє собою добуток коефіцієнта тертя  $K_m$ , функції шляху тертя  $S(x)$  і навантаження  $P(y)$ .

$$A_1 = K_m \cdot S(x) \cdot P(y), \quad (19)$$

де  $x$  і  $y$  - змінні параметри, що характеризують конструктивні особливості трибоспряжень і умов навантаження.

Робота, яка витрачається на зношування деталей трибоспряжень є відношення добутку коефіцієнта тертя  $K_m$  і функції зношування  $U(x)$  до коефіцієнту зносу  $K_u$ .

$$A_2 = \frac{K_m \cdot U(x)}{K_u(x,y)}. \quad (20)$$

Відношення  $\left[ \frac{K_u(x,y)}{K_m} \right]$  показує, на скільки *мкм* зноситься даний елемент поверхні при витраті одиниці роботи тертя. Із рівності робіт отримуємо коефіцієнти зносу  $K_u$  матеріалів деталей спряжень вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ.

Процес зношування виражено у вигляді математичної моделі через функцію коефіцієнта зносу з урахуванням перетворюючої системи.

Ця математична модель характеризується тим, що вхідні параметри – детерміновані, а система з випадковими параметрами. Тому вихід моделі є випадковим, а значить і коефіцієнт зносу  $K_U(x, y)$  є випадковою функцією різних факторів:

$$K_U(x, y) = \frac{U(x_2)}{V(x_1) \cdot T(x_1) \cdot P(y_1)} \cdot K(\xi) \cdot K(t), \quad (21)$$

де  $x, y$  – змінні параметри, які показують відношення коефіцієнта зносу до певного типу спряження;  $U(x_2)$  – функція зносу;  $V(x_1)$  – функція швидкості;  $P(y_1)$  – функція навантаження;  $T(x_1)$  – функція ресурсу;  $K(\xi)$  – функція середовища;  $K(t)$  – функція режиму роботи.

Встановлено, що при певному виді зношування, для конкретної пари тертя, основним параметром, що дозволяє регулювати чисельні значення коефіцієнтів зносу, є матеріал трибоспряжень і активність середовища його роботи, а також режим роботи (час простоїв), збільшуючи вплив активності середовища в статичному стані.

Ступінь впливу різних факторів на коефіцієнт зносу отримано за параметричною залежністю:

$$K_U = \frac{F_U \cdot L}{S \cdot P} \cdot k_\xi \cdot k_t, \quad (22)$$

де  $F_U, L$  – конструктивні особливості трибоспряження;

$P$  – реакція навантаження вузла тертя, Н;

$S$  – шлях тертя, км ( $S=l_0n$ );  
 $K(\xi)$ - коефіцієнт середовища;  
 $K(t)$  – коефіцієнт режиму роботи.

Розподіл ступеня впливу різних факторів на коефіцієнт зносу наведено на рис.8.



Рисунок 8 - Ступінь впливу різних факторів на коефіцієнт зносу

Для трибоспряження типу «вал-втулка» відносно-поступального руху коефіцієнт зносу і наробіток до граничного зносу буде дорівнювати:

$$K_U = \frac{0,42L\sigma_L \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100}\right)}{L_K(HB) \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a_i}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - a_i}{\sigma_L}\right] \right\}, \quad (23)$$

$$T = \frac{0,42L\sigma_L \cos \frac{\Theta}{2} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100}\right)}{V \cdot K_U \cdot (HB) \cdot \exp\left[-\frac{(\ln a - a)^2}{2\sigma_L}\right]} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \Phi_0\left[\frac{\ln L - a_i}{\sigma_L}\right] - \Phi_0\left[\frac{1 - a_i}{\sigma_L}\right] \right\}, \quad (24)$$

де  $\beta$  – відсоток приросту коефіцієнта зносу за рахунок простоїв;

$a$  – ширина втулки, м;

$HB$  – твердість матеріалу, Па;

$\Theta$  – кут при вершині абразивного зерна, град ( $\Theta=120\dots140^0$ );

$V$  – швидкість переміщення, м/с;

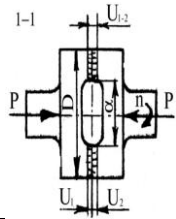
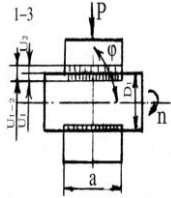
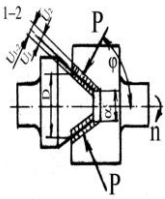
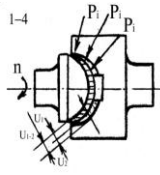
$K_U$  – коефіцієнт зносу;

$\sigma_L$  – середнє квадратичне відхилення розмірів, мкм.

Коефіцієнт зносу і наробіток до граничного зносу для основних трибоспряжень відносно-обертового руху наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Коефіцієнт зносу і наробіток до граничного зносу для основних трибоспряжень відносно-обертового руху

Кут нахилу реакції навантаження, $P$	Схема	Коефіцієнт зносу і наробіток до граничного зносу
$\varphi = 0^0$		$K_u = \frac{2(D-d)}{(D+d) \cdot (HB)} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot K_\xi \cdot K_t$ $T = \frac{\pi(D-d)^2 \cdot [U_{ep}]}{2P \cdot V \cdot K_U}$
$0^0 < \varphi < 90^0$		$K_u = \frac{2(D-d)}{(D+d) \cdot (HB)} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot K_\xi \cdot K_t$ $T = \frac{\pi(D-d)^2 \cdot [U_{ep}] \cdot \cos \alpha}{2P \cdot V \cdot K_U}$
$\varphi = 90^0$		$K_u = \frac{\left[ 4SP \cos \frac{\theta}{2} + 0,01745 D_2^2 \cdot a(HB) \cdot \alpha \right] \sin \alpha \cdot \cos \frac{\theta}{2}}{0,003 \cdot D_1 \cdot D_2^2 (HB)^2 \cdot \alpha^2} \cdot K_\xi \cdot K_t$ $T = \frac{4a^2 \cdot [U_{ep}] \cdot \left( U_i + \frac{D^2}{2} \right) \cdot \sin \alpha}{D_1 \cdot P \cdot V \cdot K_U}$
Перемінний		$K_u = \frac{\left[ HB \cdot \pi D^2 (2 \sin \gamma + \cos^2 \gamma + 1) + 4PS \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \gamma \right] \cdot \gamma \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \gamma}{180(HB)^2 \cdot \pi D^3 (2 \sin \gamma + \cos^2 \gamma + 1)^2} \cdot K_\xi \cdot K_t$ $T = \frac{\pi \gamma D (D + [U_{ep}] \cos \gamma) \cdot [U_{ep}] \cos \gamma}{720 \cdot P \cdot V \cdot K_U}$

де  $B$  – ширина контактуючих поверхонь, м;

$n$  – число циклів;

$P$  – навантажувальна характеристика зношування трибоспряжень, Н;

$\Phi \left( \frac{a_i}{\sigma_i} \right)$  – функція Лапласа;

$\gamma$  – граничний кут контакту шарової опори, град;

$U_i$  – знос трибоспряження, мкм;

$D, d$  – діаметри, відповідно зовнішній і внутрішній трибоспряження, м;

Для зубчастих зачеплень коефіцієнт зносу і наробіток до граничного зносу буде мати наступний вид:

$$K_U = \frac{m \cdot \cos \frac{\theta}{2}}{2,4(HB)(D-m) \cdot \sin \alpha \sqrt{\left(\frac{q}{E}\right)^2 \cdot \left[0,8 - \left(\frac{q}{E}\right)^2\right]}} \cdot K_\xi \cdot K_t, \quad (25)$$

$$T = \frac{P \cdot m \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot K_\xi K_t}{2,4 \cdot [U_{sp}] \cdot \alpha \cdot (HB) \cdot (D-m) \cdot \sin \alpha \sqrt{\left(\frac{q}{E}\right)^2 \cdot \left[0,8 - \left(\frac{q}{E}\right)^2\right]}}, \quad (26)$$

де  $E$  – модуль пружності, Па;

$m$  – модуль зачеплення;

$\alpha$  – кут контакту зубчастого зачеплення.

$q$  – питома навантаження, Па.

Наявність біопального в зоні зношування деталей сполучень за наявності простоїв, призводить до загального збільшення зношування і підвищення чисельних значень коефіцієнтів зносу.

Це пояснюється впливом метанолів біопального на поверхневу структуру матеріалів сполучень.

При зношуванні елементів функціональних систем спостерігається як механічний (абразивний) знос, так і ерозійний знос. Знос елементів збільшується за рахунок агресивності середовища біовуглеводневих рідин. Величина зносу в середовищі біопального залежить як від часу простоїв СГТ так і частоти її зупинок. Особливо це позначається на сталях що містять 1...3% хрому, як каталізатора водневого зкрихчування.

**У п'ятому розділі «Прогнозування ресурсу вузлів і агрегатів функціональних систем»** розглянуто методологію структурної послідовності прогнозування ресурсу деталей вузлів і агрегатів функціональних систем.

Для прогнозування ресурсу необхідно знати значення коефіцієнту зносу, який характеризує силові, швидкісні і конструктивні характеристики трибоспряжень, а також враховує середовище і режим роботи. Серед факторів, які впливають на надійність функціональних систем при роботі в середовищі БПММ найважливішими є умови і режими експлуатації, а також фізико-хімічні властивості конструкційних матеріалів, які використовуються для виготовлення окремих елементів.

Знаючи, згідно розрахункових схем величину граничного зношування  $[U_{sp}]$  основних трибоспряжень, коефіцієнти зношування  $K_U$ , умови експлуатації  $(P, V)$ , або задавшись цими умовами можна визначити їх ресурс  $T$ .

Еквівалентний коефіцієнт зношування в період нормального зношування можна визначити по аналітичній залежності (для абразивного зношування):



$$K_{U_{н.зн}}^{екв} = \frac{D_2 \cdot tg\Theta}{(\nu + 1) \cdot D_1^2 \cdot (HB)}, \quad (27)$$

де  $D_1, D_2$  – діаметри вала і втулки, м;

$\Theta$  – кутова характеристика абразиву ( $\Theta=30^\circ$ );

$\nu$  – характеристика поверхні деталі (для шліфованих поверхонь  $\nu=2$ ).

Невідомим для прогнозування є  $K_{np}$  – критерій припрацювання й час повного припрацювання трибоспряження  $t_{np}$ .

Критерій припрацювання є функцією швидкості відносного переміщення трибоспряження, навантаження, стану поверхні й інших параметрів.

Для наближеного розрахунку критерій припрацювання можна визначити по емпіричній залежності, отриманій з експериментальних даних:

$$K_{np} = \frac{4,5 \cdot 10^{-6}}{\sqrt[3]{V}} \cdot P^{3,2}, \quad (28)$$

Тривалість періоду повного припрацювання трибоспряження є функцією швидкості відносного переміщення деталей і не залежить від навантаження. Тому, час припрацювання для наближеного розрахунку можна визначити по емпіричній залежності:

$$t_{np} = \frac{300}{V^{0,75}}, \quad (29)$$

або через критерій припрацювання й навантаження:

$$t_{np} = 3,65 \cdot 10^3 \frac{K_{np}^{0,25}}{P^{0,8}}. \quad (30)$$

З огляду на коефіцієнт зношування в період припрацювання, можна уточнити строки наробітку трибоспряжень, тому що в період припрацювання витрачається значна частина допустимого граничного зношування  $[U_{гр}]$ .

У період припрацювання, наробіток на відмову до граничного зношування  $[U_{гр}]$  визначається залежністю:

$$T = \frac{U_{np}}{K_{U_{н.зн}}^{екв} \cdot P^n \cdot V}, \quad (31)$$

У період нормального зношування, наробіток на відмову до граничного зношування визначається виразом:

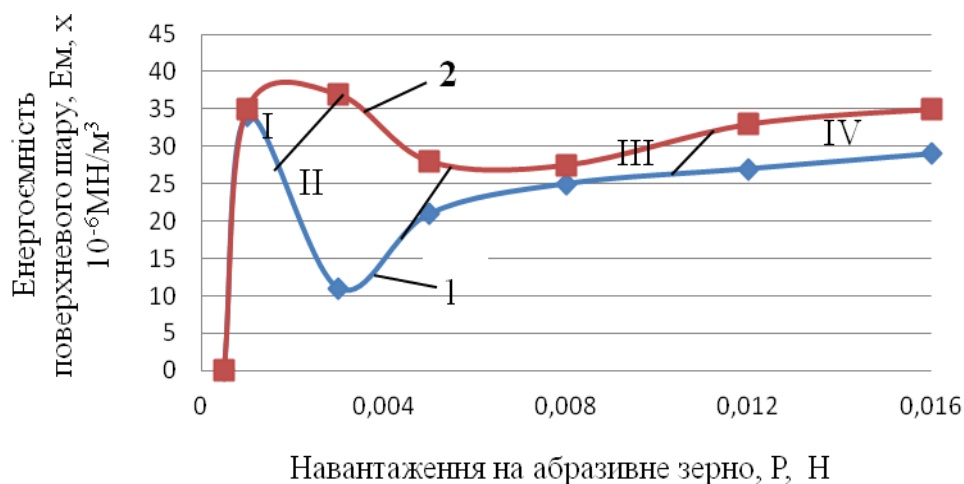
$$T = \frac{U_{н.зн}}{K_{U_{н.зн}}^{екв} \cdot P^n \cdot V}, \quad (32)$$

Тоді наробіток трибоспряжень на відмову ( $T=t_{np}+t_{н.з}$ ) до граничного зношування  $[U_{гр}]$  може бути визначене залежністю:

$$T = \frac{U_{н.зн}}{K_{U_{н.зн}}^{екв} \cdot P^n \cdot V} - t_{np} (K_{np} - 1), \quad (33)$$

Одним із параметрів, що характеризує поведінку поверхневих шарів металів, є їх енергоємність, тобто відношення зовнішнього одиничного навантаження, що діє на  $i$ -те абразивне зерно до об'єму деформованого матеріалу поверхневого шару.

Енергоємність поверхневого шару від величини сили деформації має складну залежність. Енергоємність чавуну марки СЧ 20 в середовищі РО нижща, ніж енергоємність чавуну в середовищі мінеральної оливи (рис. 9).



1 – в середовищі біологічної РО; 2 – в середовищі мінеральної оливи М-10В<sub>2</sub>

I – зона пружної деформації зміцненого шару, отриманого шліфуванням зразків; II – зона пластичної деформації зміцненого шару, наклепаного, в результаті водневого зкрихчування; III – зона пружної деформації основного металу, початком цієї зони є розпушений шар металу, отриманий в результаті переміщення вакансій основного металу під дією зміцнення поверхневого шару шліфуванням; IV – зона пластичної деформації основного металу.

Рисунок 9 - Залежності енергоємності поверхневого шару перлітної основи чавуну  $E_m$  від сили навантаження на абразивне зерно

Результати досліджень показали, що вуглецево-водневі з'єднання по різному впливають на поведінку поверхневих шарів металів в середовищі біологічних ПММ.

Сірі чавуну з феритною металевою основою, типу СЧ20, дуже чутливі до вуглецево-водневих середовищ. Вуглець метилу (метанолу) відновлює ферит з окисних плівок, знижуючи протидію зносу і звільняючи вільний прохід водню в металеву основу чавуну, підвищуючи крихкість і знижуючи його загальну міцність. Адсорбція водню в поверхню контактуємих тіл, використовуючи вакансії і дислокації (дефекти кристалічної структури) змінюють валентний стан металу, призводить до набухання вакансій і їх подальше руйнування, підвищуючи крихкість металу.

Для прогнозування ресурсу прецизійних пар СГТ при періодичному режимі експлуатації (з простоями) необхідно враховувати коефіцієнт режиму роботи  $K(t)$ .

Коефіцієнт режиму роботи – це відношення зносу деталей вузлів і агрегатів з простоями до зносу без простоїв в середовищі БПММ:

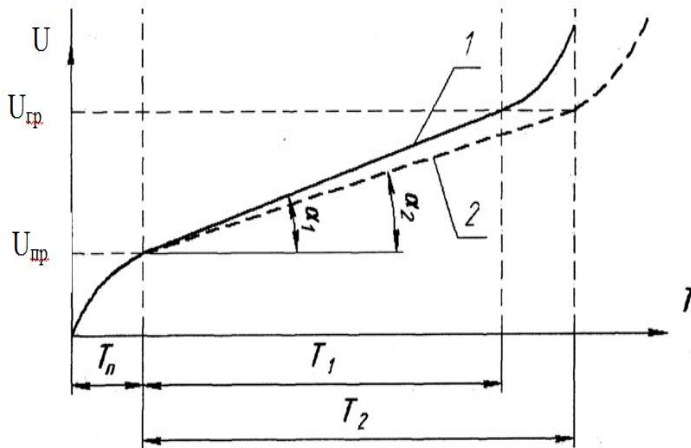
$$K(t) = \frac{U_1}{U_2}, \quad (34)$$

де  $U_1$  – знос трибоспряження в середовищі БПММ (з простоями), мкм;

$U_2$  – знос трибоспряження в середовищі БПММ (без простоїв), мкм;

Коефіцієнт режиму роботи дозволяє визначати трибологічні властивості змащувального середовища виходячи зі складу БПММ і умов роботи.

У цьому випадку отримаємо графічні залежності ресурсу  $T$  в залежності від режиму роботи вузлів і агрегатів, застосовуючи принцип надійності – мінімуму градієнта параметру, які наведені на рис 10.



1 - при змащуванні деталей прецизійної пари БПММ (з простоями);

2 - при змащуванні деталей прецизійної пари БПММ (без простоїв).

Рисунок 10 – Прогнозування ресурсу  $T$  в залежності від режиму роботи вузлів і агрегатів

За час роботи  $T_1$  прецизійних пар (з простоями) в середовищі БПММ здійснюється зношування деталей до граничного зносу, що відповідає критерію об'ємного зносу  $U_{сп}$ .

За такий же час роботи  $T_2$  прецизійних пар (без простоїв) в середовищі БПММ здійснюється зношування деталей до граничного зносу, що відповідає критерію об'ємного зносу  $U_2$ .

Встановлено, що зміна розмірів деталей прецизійних пар відбувається нерівномірно по поверхні тертя і не постійна в часі. Ресурс прецизійних пар визначається граничним зносом трибоспряжень і співвідношенням параметрів нормальної роботи.

Ресурс деталей прецизійних пар при експлуатації на БПММ (з простоями) визначається із рівняння:

$$T_1 = \frac{U_{сп} - U_{нр}}{tg \alpha_1}, \text{ мото-год}, \quad (35)$$

де  $U_{сп}$  – граничний знос деталей, мкм;  $U_{нр}$  – знос при припрацюванні (обкатці) прецизійних пар, мкм;  $tg \alpha_1 = U_1$  – швидкість зношування деталей прецизійних пар (з простоями), мкм/мото-год.

Ресурс деталей прецизійних пар (без простоїв), що працює при змащуванні БПММ, визначається із рівняння:

$$T_2 = \frac{U_{сп} - U_{нр}}{tg \alpha_2}, \text{ мото-год}, \quad (36)$$

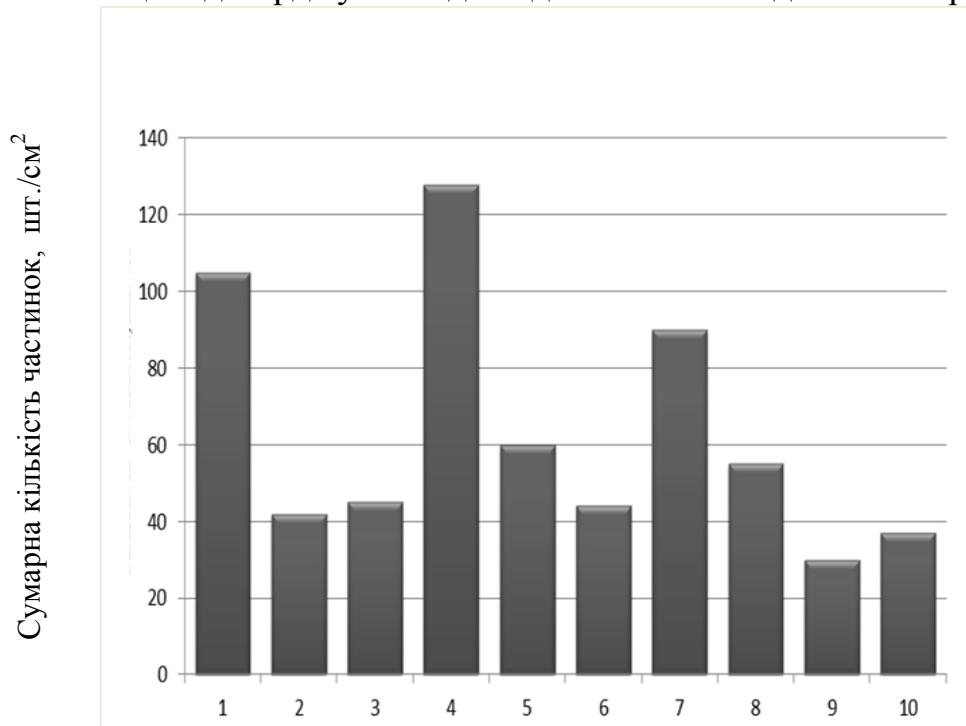
де  $tg \alpha_2 = U_2$  – швидкість зношування деталей прецизійних пар в середовищі БПММ (без простоїв), мкм/мото-год.

Отже, при збільшенні  $K(t)$  збільшується  $tg \alpha$ . Таким чином, існує можливість збільшення ресурсу прецизійних пар шляхом, як підбору складу БПММ, так і регулювання режиму роботи функціональних систем СГТ.

**В шостому розділі «Експериментальні дослідження надійності елементів вузлів і агрегатів функціональних систем при роботі на біопально-мастильних матеріалах»** приведена методика визначення надійності елементів вузлів і агрегатів функціональних систем в середовищі біологічних ПММ.

Особливістю зношування з'єднань при роботі в середовищі біодизеля є те, що тут на відміну від роботи в ДП, поряд з іншими видами зношування відбувається водневе зкрихчування в статичному стані, що призводить до руйнування поверхневих шарів матеріалів. Поясненням цього процесу є десорбція частинок металу і органічних матеріалів під впливом метанолу ( $CH_3OH$ ), як основи метилових біопальних.

Доказом цього є зношені поверхні деталей при роботі в біодизелі, які надійшли в ремонт. А особливо це підтверджується дослідженнями наведеними на рис. 11.



1 – Сталь ШХ15; 2 – Дюралюміній Д16; 3 – Сталь У12; 4 – Аллюміній АК9; 5 – Мідь М3; 6 – Латунь Л62; 7 – Чавун СЧ20; 8 – Бронза БрОЦС5 – 5-5; 9 – Сталь 30Х18Н10Т; 10 – Сталь 40Х

Рисунок 11 - Гістограми сумарної кількості десорбованих часток для різних металів в середовищі біодизеля

Зокрема, з наведених гістограм, отриманих за допомогою спеціального приладу ПКЖ-904В, встановлено, що вміст десорбованих частинок в біодизель після витримки зразків з різних матеріалів протягом 250 годин залежить від наявності вмісту хрому. Тобто, чим менший вміст хрому, тим метал більше схильний до десорбції.

Тут слід підкреслити, що серед випробуваних матеріалів найбільша десорбція відбувається в Сталі ШХ15, що є не стійкою до впливу метанолів.

Для оцінки ступеня впливу біодизелю на конструкційні матеріали нами встановлено коефіцієнт активності, який характеризує відношення кількості десорбованих частинок для різних металів в середовищі біодизеля і ДП, а саме  $K(\xi)=1,05\dots 1,12$ , в залежності від матеріалів трибоспряжень.

Причому, природа десорбції частинок цих матеріалів пояснюється наведеним нижче графіком (рис.12), на якому наведена залежність зміни мікротвердості від часу наводнення тобто часу витримки в середовищі біодизеля.

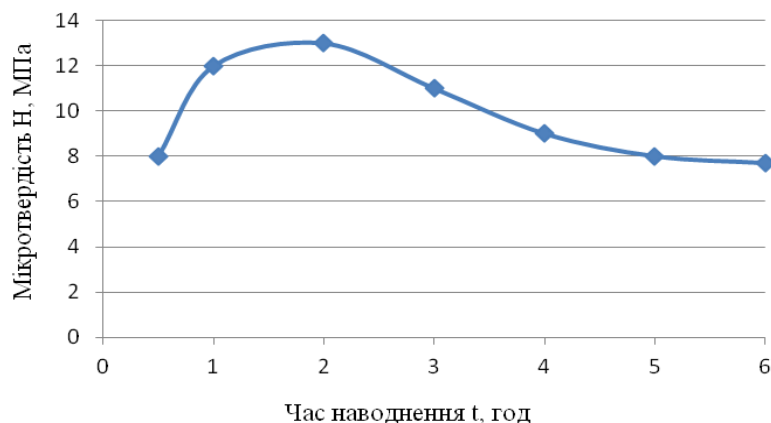
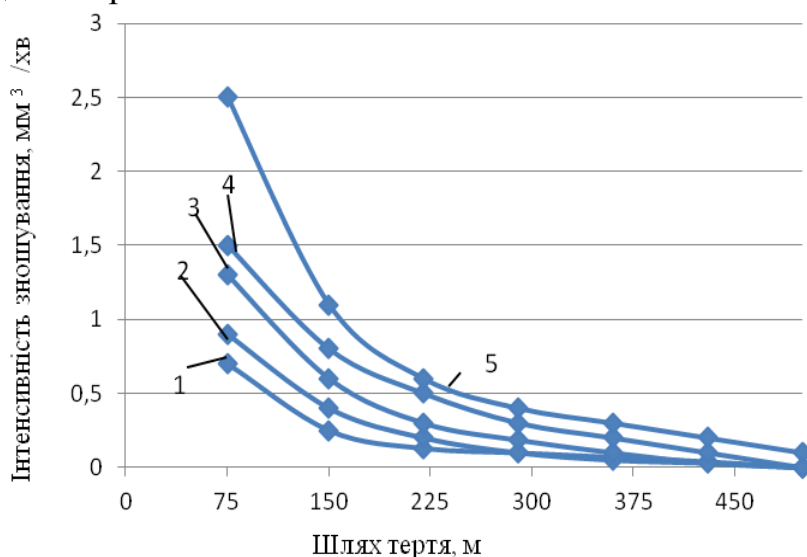


Рисунок 12 – Залежність зміни відносної мікротвердості сталі від часу наводнення

Звертає на себе увагу той факт, що через дві години через надмірне наводнення (тобто заповнення вакансій в кристалічній решітці металу) мікротвердість починає зменшуватися. Це призводить до зкрихчування поверхні і як наслідок десорбції частинок в пальне. Десорбція частинок матеріалів в середовище біопального є важливим показником оцінки їх поведінки. Однак, більш повну картину дали результати дослідження процесу зношування. Для оцінки результатів процесу зношування дослідження проводили на спеціально виготовленій установці, яка забезпечувала тертя системи «ролик-колодка». Ролик виготовляли зі сталі ШХ15 з твердістю поверхні 60-62 HRC. Результати випробувань різних матеріалів на машині тертя наведені на рис.14.



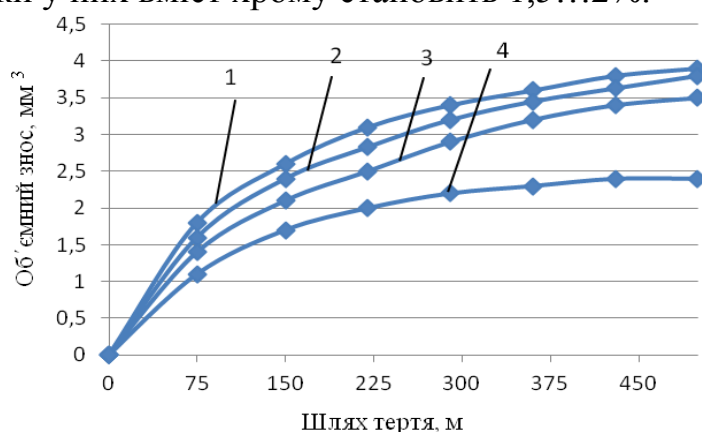
1 – Сталь 45;  
2 – Сталь ШХ15;  
3 – Сірий чавун СЧ20;  
4 – Бронза БрОЦС 5-5-5  
5 – Алюміній АК9

Рисунок 13 – Залежності інтенсивності зношування матеріалів від шляху відносного переміщення трибоспряжень в середовищі біодизеля

З цих залежностей видно, що інтенсивність зношування максимальна в початковий період і стабілізується після 400 м шляху тертя.

Найбільш зносостійкими в середовищі біопального є сталі 25X5M і 38XМЮА (рис.14). Це пояснюється тим, що через підвищений вміст хрому ці сталі найменш схильні до десорбції через водневу крихкість. Аналіз наведених залежностей дозволяє стверджувати, що висунута гіпотеза про ступінь різної швидкості зношування конструкційних матеріалів в залежності від їх структури і хімічного складу підтверджується.

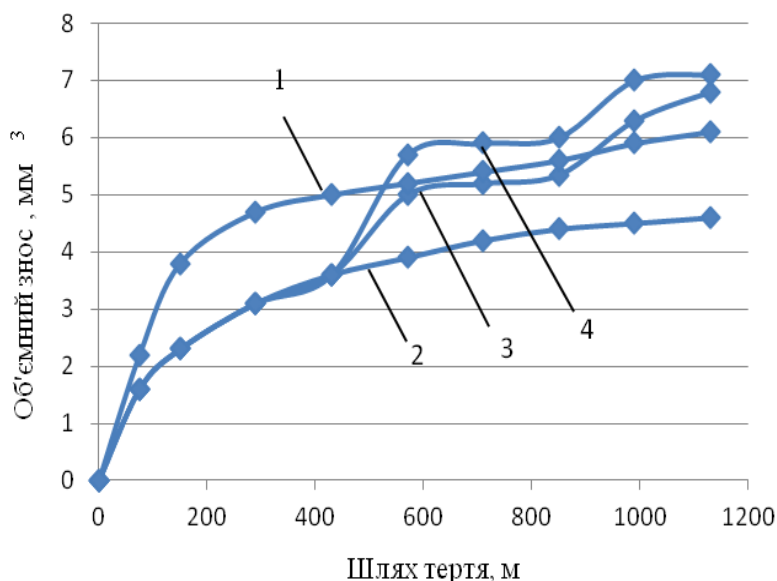
Тому сталі, які нині використовуються в якості конструкційних матеріалів, практично не повинні використовуватися при роботі в середовищі біопального оскільки у них вміст хрому становить 1,5...2%.



- 1 – Сталь 30X18H10T;
- 2 – Сталь P18;
- 3 – Сталь 25X5M;
- 4 – Сталь 38XМЮА  
(азотована)

Рисунок 14 – Залежності об'ємного зносу матеріалів від шляху відносного переміщення зразків в середовищі біодизеля

Використовуючи наведену структуру факторів, що впливають на надійність функціональних систем при роботі у специфічному середовищі біодизельного пального, зосереджено увагу на виникненні статичного зношування тертьових з'єднань (утворення мікротріщин), яке проявляється в процесі простоїв техніки. Нами була перевірена дана гіпотеза експериментальним шляхом, результати якої наведені на рис.15. На цих графіках наведені залежності об'ємного зносу різних матеріалів в залежності від шляху тертя в середовищі ДП (крива 1) і в середовищі біодизеля (криві 2,3 і 4). Причому випробування матеріалів у біодизелі проводилися при періодичних зупинках з простоями не менше 48 годин і більше.



- 1 – в середовищі ДП;
- 2 – в середовищі біодизеля без простоїв;
- 3 – в середовищі біодизеля з зупинками до 48 годин;
- 4 – в середовищі біодизеля з зупинками до 168 годин зносу сталі ШХ15 в ДП і біодизелі від шляху тертя

Рисунок 15 – Залежності об'ємного зносу сталі ШХ15 в залежності від шляху тертя

У місцях після зупинки криві 3 і 4 мають ступінчастий характер. Причому скільки було зупинок, стільки утворилося сходинок. Це пояснюється наявністю статичного зношування, викликаного водневою крихкістю. Ці результати свідчать про істотний вплив режимів експлуатації на динаміку і величину зношування трибоспряжень в середовищі біопального на відміну від середовища дизельного пального.

З графіків (рис.15) можна зробити важливий висновок: якби не було простоїв, то величина зносу деталей в середовищі біодизельного пального була б значно меншою, ніж в середовищі мінерального дизельного пального. У зв'язку з цим нами було введено поняття коефіцієнта простою  $K_t$ , сутність якого полягає в характеристиці величини ступеня об'ємного зносу від часу простою, який становить  $K_t = 0,78 \dots 0,92$ . У подальшому це дозволило нам враховувати його при визначенні ресурсу трибоспряжень вузлів і агрегатів. Цей коефіцієнт в подальшому може служити також важливою характеристикою для врахування умов експлуатації СГТ.

**У сьомому розділі «Виробничі випробування, техніко-економічне обґрунтування і науково-технічні рекомендації що до використання біопально-мастильних матеріалів для сільськогосподарської техніки»** встановлено, що застосування біодизеля у двигунах внутрішнього згорання погіршує його експлуатаційні характеристики. А саме: погіршується робочий процес, економічність падає на 11%, період затримки самозаймання пального збільшується на 20%, швидкість підвищення тиску збільшується на 87%, а температура вихлопних газів збільшується на 27%, погіршується характеристика паливоподачі. В результаті знижується тиск впорскування й погіршується наповнення пального надплунжерного простору.

Під час проведення лабораторно-польових досліджень нами встановлено, що при роботі на біодизелі у вигляді суміші нафтового дизельного пального (ДП) і соняшникового метилового ефіру (СМЕ) в цілому погіршується прийомистість двигуна трактора. Збільшення кількості СМЕ в пальному збільшує час розгону орного агрегату. Якщо при роботі двигуна трактора на чистому ДП значення цього параметра становило 4,8 с, то при використанні суміші 50:50 воно зросло до 5,6 с, тобто на 16,6%. При роботі двигуна на чистому СМЕ час розгону досліджуваного орного МТА збільшився до 7,2 с, це більше, ніж при роботі на суміші і на ДП, відповідно, на 28,5 і 50,0%.

Доведено, що біодизель по відношенню до конструкційних матеріалів є більш агресивним в порівнянні із дизельним паливом. Це пояснюється виникненням вільного водню на поверхні матеріалів, який сприяє створенню окисних плівок та проникнення водню в поверхневі шари металу, який сприяє водневому зношенню. Невілювання цих негативних явищ можливо за рахунок зменшення в біодизелі кількості метанолу.

Підвищити ресурс сільськогосподарської техніки при роботі на біологічному пальному можна за рахунок промивки мінеральним паливом всієї паливної системи. Цим самим виключається шкідливий вплив метанолу на метали в процесі простоїв вузлів і агрегатів.

Як показали проведені дослідження, збільшити ресурси роботи сільськогосподарської техніки можна за рахунок застосування матеріалів деталей сполучень, що контактують з біологічними ПММ, які мають підвищену стійкість до

ефірів метанолу. Виявлено, що найбільш зносостійкими з відомих конструкційних матеріалів, з яких можуть бути виготовлені плунжерні пари ПНВТ дизельних двигунів, є сталі: 25X5M або 38XMЮА (азотована). Ресурс таких плунжерних пар перевищує ресурс плунжерних пар із сталі ШХ15, які серійно використовуються, на 80...120%.

Заводам-виробникам рекомендується замінити матеріал плунжерних пар зі сталі ШХ15 на сталь 25X5M, 5X або 38XMЮА. Така заміна дозволяє збільшити середній ресурс плунжерних пар ПНВТ з 7000 до 12000 мото-год., що відповідає технічним вимогам до надійності паливних систем.

Для збільшення строку служби фільтра тонкого очищення з 750 до 1500 мото – годин, необхідно замінити існуючий фільтр грубого очищення системи живлення дизельного двигуна на вдосконалений, який містить фільтруючий, коагулюючий і водовідштовхувальний елементи з одночасним підігрівом пального до 30...40 °С.

З метою підвищення повноти згоряння біодизеля на 5...7 % та покращення екологічних показників необхідно, в усмоктувальному патрубку ДВЗ встановити апарат розділення повітря на два потоки, з підвищеним вмістом азоту і кисню, що дасть змогу збільшити номінальну ефективну потужність двигуна з 57,6 кВт до 59,6 кВт і зменшити питому витрату пального з 241 г/кВт·год до 226 г/кВт·год. Збільшення міжтехнічного обслуговування сільськогосподарської техніки при роботі на біологічних ПММ можна за рахунок застосування фторкаучуків, стійких до метанолових ефірів, які виключають шкідливий вплив на СК і НК (відповідно, синтетичні і натуральні каучуки) через розкладання ущільнюючих елементів всіх систем СГТ.

Заводам - виробникам необхідно замінити конструкційний матеріал ущільнень ПНВТ та інших систем СГТ з натурального чи синтетичного каучуку на фторкаучук, що дозволить збільшити ймовірність безвідмовної роботи паливної системи з 960 до 4000 мото - годин. Такі заміни матеріалів призведуть до підвищення надійності і ресурсів СГТ при роботі на біологічних ПММ.

При застосуванні біологічних змащувальних матеріалів рекомендується застосування багатофункціональних добавок і присадок, що дозволить виключити шкідливий вплив вільних жирних кислот оливи на метали деталей сполучень і забезпечити нормовані ресурси вузлів і агрегатів СГТ.

Для збільшення строку служби елементів гідравлічних систем з 8000 до 9000 мото – годин необхідно вводити в біологічні оливи добавки: багатофункціональну типу МКФ-18 у кількості 0,8...1,0% - для забезпечення металоплакувального ефекту та антифрикційну присадку типу SMT 2514 в кількості 6...8% - для покращення змащувальних властивостей, в режимі граничного тертя.

З метою підвищення зносостійкості матеріалів деталей трибоспряжень системи трансмісії необхідно замінити матеріали зі сталей 40X, 45X на інші сталі, які підлягають нітроцементації (ціануванню) для створення нітридів лігатури. Це призведе до зниження вакансій в поверхневих шарах металів і, як результат, збільшення ресурсу в 1,5...2 рази.

З метою покращення якісних показників біодизеля необхідно проводити обробку його в полі ультразвукових коливань. Оптимальний час обробки ультразвуком становить 10...12 хв при частоті  $22 \times 10^3$  Гц і інтенсивності 0,8...1,2 Вт/см<sup>2</sup>.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Робота спрямована на вирішення науково-технічної проблеми, яка полягає у розробленні методології підвищення надійності сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів. Отримані теоретичні та експериментальні результати дозволяють зробити наступні загальні висновки:

1. Встановлено, що використання біопально-мастильних матеріалів при роботі сільськогосподарської техніки негативно впливає на надійність її функціональних систем. Серед факторів, які обумовлюють зниження показників надійності найсуттєвішими є умови роботи (15...20%) і режими експлуатації (50...60%) та фізико-хімічні властивості конструкційних матеріалів, які використовуються для виготовлення окремих елементів (25...30 %).

2. Встановлено, що ультразвукова обробка протягом 10...12 хв при частоті 22 кГц і інтенсивності 0,8...1,2 Вт/см<sup>2</sup> дозволяє покращити якісні показники біодизеля: коефіцієнт тертя зменшується на 19%, в'язкість – на 3,5 %, а термін зберігання збільшується в 2 рази. Контроль якості забезпечується розробленим вимірювальним електроакустичним комплексом з діапазоном вимірювання гліцеринової фракції в біодизелі і паливної фракції в біооливі в межах 0...5% і граничною похибкою 0,8%.

3. На підставі досліджень хімотологічних і триботехнічних властивостей біологічних та мінеральних олив встановлено, що введення антифрикційної присадки SMT2514 (6...8%) і багатофункціональної добавки МК «МКФ-18» (0,8...1,0 %) в сумішеву оливу, яка складається з М-10В<sub>2</sub> (55 ... 60%) та РО (40 ... 45%), дозволяє знизити коефіцієнт тертя в три рази і тим самим зменшити знос трибоспряжень та збільшити їх ресурс. А саме, знос зразків для трибоспряження «золотник – корпус гідророзподільника» зменшився на 75%, а трибоспряження «торець шестерні – пластик шестерневого гідронасосу» - на 66 % в порівнянні мінеральною нафтовою оливою М-10В<sub>2</sub>.

4. На підставі графів стану вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ отримані математичні моделі надійності, які дозволили виявити їх "слабкі ланки" при роботі на БПММ. А саме, для: дизельного двигуна – паливна система; гідравлічної системи - гідронасос; гідростатичної трансмісії – насос підпитки; механічної трансмісії - ущільнення. Встановлено, що показники надійності функціональних систем СГТ при роботі на БПММ нижчі на 1202 мото-години; дизельного двигуна - на 1650 мото-годин; паливної системи - на 4325 мото-годин; гідросистеми - на 950 мото-годин; трансмісійних систем: гідростатичної - на 290 мото-годин, механічної - на 600 мото-годин.

5. Встановлено, що коефіцієнт зносу є узагальненим показником силових, конструктивних і швидкісних параметрів деталей трибоспряжень. Він дозволяє визначати стійкість матеріалів деталей трибоспряжень до зношування в різних середовищах. Коефіцієнт зносу матеріалів є більш повною характеристикою для оцінки надійності вузлів і агрегатів СГТ. Він в порівнянні з лінійним зносом дозволяє точніше знайти період припрацювання і характеризувати їх критерієм припрацювання. Еквівалентні коефіцієнти зносу дають змогу проаналізувати енергетичний баланс по періодам в процесі зношування. В результаті проведення досліджень встановлено, що ступінь впливу факторів на коефіцієнт зносу в

середовищі біологічних ПММ розподілений наступним чином: динамічне руйнування - 53,48%; статичне руйнування - 8, 22% (в тому числі водневе зкрихчування - 8, 2%); матеріал трибоспряжень - 6, 15%; тип трибоспряжень - 27, 25%; середовище роботи - 11, 05% (в тому числі агресивність середовища роботи - 9,4%).

6. Встановлено, що енергоємність поверхневих шарів металів, будучи функцією сил деформації, дозволяє встановлювати межі силових характеристик трибоспряжень при абразивному зношуванні в середовищі біологічних ПММ. Отримані залежності енергоємності поверхневих шарів металів і сплавів від сили навантаження на абразивне зерно дозволили встановити, що зменшення енергоємності на 27...48% в середовищі біологічної РО відбувається за рахунок водневого зкрихчування. Це призводить до набухання вакансій в поверхневих шарах трибоспряжень, підвищуючи при цьому крихкість металів з подальшим їх руйнуванням.

7. Встановлено, що при зношуванні елементів функціональних систем спостерігається, як абразивний, так і водневий знос. Не дивлячись на зменшення зношування матеріалів в середовищі біодизельного пального, загальний знос деталей трибоспряжень за наявності простоїв призводить до загального збільшення зношування деталей і підвищення чисельних значень коефіцієнтів зносу на 36...54%. З метою унеможливлення ступінчастої динаміки зношування деталей при зупинці дизельного двигуна необхідно забезпечити перехід з біологічного пального на мінеральне або здійснити промивку паливної системи.

8. Проведені дослідження дії метилового ефіру на поверхневу структуру різних металів і сплавів показали, що: чисті метали (алюміній, мідь) та їх сплави підвержені впливу метилових ефірів; із чавунів найбільшу чутливість до метилових ефірів мають чавуни з феритною металевою основою; відсутність окисних плівок на поверхнях сталей запобігає розпаду вуглеводнів з вільним виділенням водню; наявність хрому у межах 1...3% що є каталізатором водневого зкрихчування, підвищує чутливість хромистих сталей до метилових ефірів.

9. Встановлено, що зниження ресурсу елементів і систем СГТ при роботі на біологічних ПММ пояснюється активним впливом метанолу біодизельного пального і вільних жирних кислот біооливи на матеріали основних елементів дизельного двигуна, системи змащення, гідростатичних і механічних трансмісій, гідросистем. Це призводить до руйнування поверхонь і збільшенню зносів деталей трибоспряжень. Падіння ресурсу відбувається через низьку стійкість ущільнюючих елементів, виготовлених із синтетичних каучуків, які активно взаємодіють з вільними жирними кислотами БПММ. Завдяки заміні конструкційного матеріалу ущільнень паливного насоса високого тиску замість синтетичних каучуків на фторопласти підвищення середнього ресурсу збільшилося з 960 до 4000 мото-годин. Заміна матеріалів плунжерних пар зі сталі ШХ15 на сталь 38ХМЮА дозволяє збільшити середній ресурс паливного насоса високого тиску з 7000 до 12000 мото-годин.

10. В результаті проведення експлуатаційних випробувань роботи МТА встановлено, що процес збільшення часу його розгону при зміні в мінеральному ДП

відсоткового співвідношення МЕ є нелінійним; час розгону агрегату зростає в міру збільшення в ДП відсоткового співвідношення МЕ. При значенні більше 45% інтенсивність цього процесу зростає.

11. Розрахунки екологічних показників свідчать про те, що використання біодизельного пального призводить до зниження димності, зменшення викидів твердих часток, збільшення викидів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , при цьому комплекс сумарної емісії  $\text{NO}_x$  і твердих часток для ДП дорівнює 1,133 і відповідно знижується зі збільшенням долі МЕ до 0,96.

Економічний ефект від впровадження методології підвищення надійності СГТ при використанні БПММ для України становить 90 млн. грн. на рік.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

*Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Юдовинский В. Б. Дослідження процесу зношування основних сполучень деталей сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу / В. Б. Юдовинский, Д. П. Журавель, О. Д. Савченко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії : наукове фахове видання / ТДАТА. – Мелітополь, 2003. – Вип. 15. – С. 24-29 (здобувачем обгрунтована методика оцінки зносу сполучень деталей сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу).

2. Ультразвуковий аналізатор моторного масла / В. А. Дідур, В. Ф. Яковлев, Р. В. Кушлик, Д. П. Журавель // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА ; відп. за вип. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2006. – Вип. 42. – С. 137-142 (здобувачем обгрунтована методика контролю вологи в оливах ультразвуковим методом).

3. Журавель Д. П. Обоснование комплексного показателя износостойкости материалов / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, К. Г. Петренко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА ; відп. за вип. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2006. – Вип. 42. – С. 15-20 (здобувачем обгрунтована методика оцінки механічних характеристик деталей сполучень через коефіцієнт зносу).

4. Журавель Д. П. Класифікація основних спряжень гідросистем сільськогосподарської техніки по коефіцієнтам зносу / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, Р. В. Кушлик // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА ; відп. за вип. В. В. Овчаров. – Мелітополь, 2006. – Вип. 45. – С. 113-118 (здобувачем обгрунтована класифікація основних спряжень гідросистем сільськогосподарської техніки через коефіцієнт зносу).

5. Журавель Д. П. Моделювання хімотологічних та триботехнічних процесів в спряженнях тертя / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / відп. за вип. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2007. – Вип. 7, т. 3. – С. 30-38 (здобувачем обгрунтовано взаємозв'язок між хімотологічними і триботехнічними процесами в спряженнях тертя).

6. Кушлик Р. В. Дизельне паливо із ріпаку / Р. В. Кушлик, Д. П. Журавель, Р. Р. Кушлик // Праці Таврійської державної агротехнічної академії / ТДАТА ; відп. за

вип. В. Т. Надикто. – Мелітополь, 2007. – Вип. 7, т. 1. – С. 145-151 (здобувачем проведено аналіз технологій отримання дизельного палива із ріпаку).

7. Дідур В. А. Вплив метилових ефірів на процес зношення триботехнічних спряжень / В. А. Дідур, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ ; відп. за вип. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2008. – Вип. 8, т. 4. – С. 3-9 (здобувачем обґрунтована методика оцінки впливу метилових ефірів на процес зношення триботехнічних спряжень).

8. Дідур В. А. Металографічні дослідження процесу впливу метилового ефіру на поверхневу структуру металів і сплавів / В. А. Дідур, В. Б. Юдовинський, Д. П. Журавель // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. А. Дідур. – Мелітополь, 2008. – Вип. 8, т. 2. – С. 10-14 (здобувачем проведені дослідження впливу метилового ефіру на поверхневу структуру металів і сплавів).

9. Вплив фізико-хімічних властивостей біодизеля на роботу ДВЗ / Д. П. Журавель, Б. В. Мітков, В. Б. Юдовинський, В. П. Кувачов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. Т. Надикто. – Мелітополь, 2008. – Вип. 8, т. 6. – С. 104-108 (здобувачем досліджено ступінь впливу основних фізико-хімічних властивостей біодизеля на роботу ДВЗ).

10. Журавель Д. П. Прогнозування ресурсу трибоспряжень мобільних сільськогосподарських агрегатів / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, С. В. Кюрчев, Б. В. Мітков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка: наук. фах. видання / ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків, 2008. – Вип. 75 : Механізація сільськогосподарського виробництва, т. 2. – С. 11-23 (здобувачем розроблено методику структурної послідовності прогнозування ресурсу трибоспряжень мобільних сільськогосподарських агрегатів).

11. Особенности эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники при использовании биодизельного топлива / В. А. Дидур, В. Т. Надикто, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. – С. 3-6 (здобувач прийняв участь в проведенні експлуатаційних досліджень та обробці результатів статистичних даних).

12. Журавель Д. П. Вплив біопалива на знос матеріалів паливної апаратури двигунів мобільної техніки / Д. П. Журавель, С. В. Кюрчев // Науковий вісник Луганського аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ, 2009. – С. 87-90 (здобувачем розроблені практичні рекомендації щодо використання матеріалів паливної апаратури).

13. Дідур В. А. Критерії оцінки стійкості складових металів до зношування в середовищі біопалива / В. А. Дідур, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. праць / Ін-т механізації тваринництва УААН; гол. ред. І. А. Шевченко. – Запоріжжя, 2009. – Вип. 1(3-4). – С. 329-332 (здобувачем отримані залежності механічних характеристик металів в середовищі біопалив).

14. Журавель Д. П. Знос матеріалів в середовищі біопалива / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. В. Тарасенко. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 2. – С. 77-85 (здобувач розробив методику оцінки зносу матеріалів в середовищі біопалив).

15. Журавель Д. П. Вплив меркаптанів біопалива на водневе зношування поверхонь тертя / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Вісник Львівського НАУ /ЛНАУ. – Львів, 2009. – Вип. 13, т. 2. – С. 182-189. – (Агроінженерні дослідження) (здобувач обгрунтував ступінь впливу меркаптанів біопалива на водневе зношування поверхонь тертя).

16. Журавель Д. П. Математическое моделирование рабочего процесса и определение экологических показателей дизеля Д-245 на номинальном режиме / Д. П. Журавель, С. В. Мурай // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету / відп. за вип. В. В. Овчаров. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 4. – С. 124-131 (здобувач обгрунтував методику моделювання робочого процесу і оцінки екологічних показників дизелю).

17. Юдовинский В. Б. Моделирование процесса изнашивания материалов трибосопряжений в среде биотоплива при периодической работы мобильной техники / В. Б. Юдовинский, Д. П. Журавель // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 8: Моделювання технологічних процесів в АПК : матеріали міжнародної науково-практичної конференції . – С. 265-278 (здобувач дослідив особливості процесу зношування матеріалів сполучень в середовищі біопалива при періодичному режимі роботи).

18. Журавель Д. П. Износ материалов деталей сопряжения типа вал-втулка продольного относительного перемещения в среде биотоплива / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ; відп. за вип. В. Т. Діордієв. – Мелітополь, 2010. – Вип. 10, т. 10. – С. 76-87 (здобувач розробив методику зносу матеріалів деталей сполучень типу вал-втулка в середовищі біопалива).

19. Журавель Д. П. Дифференціація зносу матеріалів пар тертя мобільної техніки, що працює на біопаливі [Електронний ресурс] / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип.1, т.1. – Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nvtdau> (здобувач прийняв участь в розробці методики оцінки ступеню впливу різних факторів на коефіцієнт зносу в середовищі біологічних ПММ).

20. Журавель Д. П. Моделирование процесса изнашивания прецизионных соединений топливных систем ДВС, работающих в среде биотоплива / Д.П. Журавель, В. Б. Юдовинський, В. А. Коломоец// Науковий вісник Луганського національного аграрного університету / ЛНАУ. – Луганськ, 2011. – № 29. – С. 380-390. – ( Технічні науки ) (здобувач прийняв участь в розробці методики моделювання процесу зношування прецизійних з'єднань паливної системи ДВЗ).

21. Журавель Д. П. Триботехнічні властивості олій біологічного походження / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь : ТДАТУ, 2011. – Вип. 11, т. 4 : Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Актуальні питання енергетики і прикладної біофізики в агровиробництві". – С. 160-167 (здобувач обгрунтував основні триботехнічні властивості олій біологічного походження).

22. Посвятенко Е. К. Прогнозування ресурсу деталей функціональних систем мобільних машин до виводу їх в ремонт / Е. К. Посвятенко, Д. П. Журавель // Вісник [Національного транспортного університету] : наук.-техн. збірник / Нац. трансп. ун-т. – К., 2011. – № 24, ч. 2. – С. 45-47 (здобувач запропонував методику прогнозування ресурсу деталей функціональних систем до виводу їх в ремонт).

23. Журавель Д. П. Исследования местных износов деталей плунжерных пар топливных насосов ДВС [Електронний ресурс] / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, В. А. Коломоец // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – Вип.2, т.5. – Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/nvtdu> (здобувач обґрунтував методику оцінки місцевих зносів плунжерних пар ПНВТ).

24. Журавель Д. П. Исследования видов изнашивания деталей топливной аппаратуры в среде биоуглеводородных жидкостей / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 12, т. 1. – С. 62-67 (здобувач прийняв участь в дослідженнях та обробці отриманих статистичних даних).

25. Журавель Д. П. Оцінка зносу трибоспряжень в середовищі біопаливо-мастильних матеріалів / Д. П. Журавель // Праці ТДАТУ: наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 12, т.2. – С. 28-33.

26. Журавель Д. П. Обґрунтування методу прогнозування ресурсу мобільної техніки при експлуатації її на біопаливі / Д. П. Журавель // Праці ТДАТУ: наукове фахове видання / ТДАТУ. – Вип. 12, т. 3. – Мелітополь, 2012. – С. 109-119.

27. Журавель Д. П. Прогнозирование ресурса плунжерных пар топливных насосов / Д. П. Журавель // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць / КНТУ. – Кіровоград, 2012. – Вип. 25, т. 1. – С. 46-49.

28. Журавель Д. П. Экспериментальное моделирование процесса работы плунжерных пар ДВС / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. праць / Ін-т механізації тваринництва УААН; гол. ред. І. А. Шевченко. – Запоріжжя, 2012. – Вип. 1(9). – С. 195-199 (здобувач прийняв участь в розробці експериментальної установки та обробці отриманих результатів).

29. Журавель Д. П. Визначення металевого контакту при абразивному зношуванні деталей спряжень транспортних засобів [Електронний ресурс] / Д. П. Журавель // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету / ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 2, т. 1. – С.254-259. – Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/nvtdu>

30. Исследование износа материалов деталей плунжерных пар топливной аппаратуры ДВС в среде биотоплива / В. А. Дидур, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Науковий вісник Луганського національного аграрного університету / ЛНАУ. – Луганськ, 2012. – № 41. – С.67-76 – (Технічні науки) (здобувач прийняв участь в отриманні результатів досліджень та їх статистичній обробці).

31. Журавель Д. П. Взаємозв'язок між коефіцієнтом зносу та коефіцієнтом тертя матеріалів / Д. П. Журавель // Вісник СевНТУ: зб. наук. праць / СевНТУ. – Севастополь, 2012. – Вип. 128 : Машиноприладобудування та транспорт. – С. 72-76.

32. Журавель Д. П. Дослідження впливу присадок на експлуатаційні властивості олій [Електронний ресурс] / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, Б. В. Мітков // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : Електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2012. – Вип. 2, т. 4. – Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nvtdau> (здобувач встановив оптимальне співвідношення впливу присадок на експлуатаційні властивості олій).

33. Журавель Д. П. Ультразвукової експрес-метод оцінки глицерина в біодизелі / Д. П. Журавель, Р. В. Кушлик // Известия МАО. – СПб., 2013. – Вип. 16. т. 1. – С. 104-109 (здобувач прийняв участь в розробці методики досліджень та статистичній обробці отриманих результатів).

34. Влияние износа плунжерных пар топливных насосов высокого давления на их гидравлическую плотность / В. А. Дидур, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Известия МАО. – СПб, 2013. – Вип. 18. – С. 39-43 (здобувач прийняв участь в розробці методики досліджень та статистичній обробці отриманих результатів).

35. Журавель Д. П. Моделювання енергетичного балансу трибосистеми сільськогосподарської техніки в середовищі змащувальних матеріалів / Д. П. Журавель // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти : збірник наукових праць / УВ МАО; голов. ред. В. А. Дідур. – Запоріжжя, 2013. – Вип. 1. – С. 126-132.

36. Журавель Д. П. Дослідження надійності ущільнюючих елементів паливних насосів високого тиску дизелів в середовищі біопалива / Д. П. Журавель, В. А. Коломоець // Праці ТДАТУ : наукове фахове видання. – Мелітополь, 2014. – Вип. 14. т.2. – С. 76-86 (здобувач прийняв участь в отриманні результатів досліджень та їх статистичній обробці).

37. Журавель Д. П. Особливості використання олій біологічного походження для мобільної техніки / Д. П. Журавель // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти: зб. наук. праць / УВ МАО; гол. ред. В. А. Дідур. – Запоріжжя, 2014. – Вип. 2. – С. 157-165.

38. Журавель Д. П. Обробка біодизеля ультразвуком / Д. П. Журавель // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2015. – Вип. 15, т. 2 : Технічні науки. – С. 181-184.

39. Журавель Д. П. Влияние абразивности биотоплива на износ плунжерных пар ТНВД / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2015. – Вип. 15, т. 3. – С. 350-356 (здобувач прийняв участь в отриманні результатів досліджень та їх статистичній обробці).

40. Дидур В. А. Надежность мобильной сельскохозяйственной техники при использовании биологических топливо - смазочных материалов / В. А. Дидур, Д. П. Журавель // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України / НУБіП ; відп. ред. Д. О. Мельничук. – К., 2016. – №

251. – С. 69-78. – (Техніка та енергетика АПК) (здобувач прийняв в участь в розробці методики забезпечення надійності СГТ при експлуатації на різних видах пально-мастильних матеріалів).

41. Журавель Д. П. Методологія оцінки надійності мобільної сільсько-господарської техніки при експлуатації на різних видах паливо-мастильних матеріалів / Д. П. Журавель // Вісник Сумського національного аграрного університету / СНАУ. – Суми, 2016. – Вип. 10/3(31). – С.66-71. – (Механізація та автоматизація виробничих процесів).

42. Журавель Д. П. Вплив забрудненості абразивом біопаливо-мастильних матеріалів на енергоємність поверхневих шарів металів вузлів і агрегатів мобільної техніки / Д. П. Журавель // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти. – Херсон, 2017. – Вип. 5. – С.56-65.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

43. Журавель Д. П. Енерго-екологічні аспекти використання біопалива // Д. П. Журавель, К. Г. Петренко // Екологічне підприємництво в АПВ: зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. (12-14 червня 2008 р., м. Мелітополь) / ТДАТУ. – Мелітополь, 2008. – С. 45-47.

44. Журавель Д. П. Моделирование износа зубчатых передач трансмиссий в среде биологических масел / Д. П. Журавель // Современные проблемы инновационного развития агроинженерии: матер. междунар. науч.-производ. конф. (г. Белгород, 20-21 ноября 2012 г.) / БелГСХА им. В.Я. Горина. – Белгород, 2012. – Ч. 2. – С. 37-40.

45. Кюрчев С. В. Прогнозирование ресурса трибосопряжений мобильной техники при использовании различных смазочных материалов / С. В. Кюрчев, В. Б. Юдовинский, Д. П. Журавель // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сб. науч. статей по матер. VIII Междунар. науч.-практ. конференции. (г. Ставрополь, 20-22 марта 2013 г.) и науч.-практ. конференции "Ресурсо- и энергосбережение в АПК. Альтернативные виды топлива" (г. Ставрополь, 7-8 ноября 2013 г.) / ФГБОУ ВПО Ставропольский гос. аграрный ун-т. – Ставрополь, 2013. – С. 50-55.

46. Посвятенко Е. К. До прогнозування ресурсу мобільної техніки / Е. К. Посвятенко, Д. П. Журавель, О. В. Сушко // Матеріали LXIX наукової конференції професорсько-викладацького складу національного транспортного університету (м. Київ, 23-25 квітня 2013 р.) / НТУ – К, 2013. – С.5 - 8.

47. Сравнительная оценка надёжности плунжерных пар топливной аппаратуры дизелей на различных видах топлив / В. А. Дідур, Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинский, В. А. Коломоец // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: матер. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, 16-17 октября 2013 г.) / НАН Беларуси, РУП "Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства" ; ред.: П. П. Казакевич, С. Н. Поникарчик. – Минск, 2013. – Т. 3. – С. 250-257.

48. Журавель Д. П. Методологія забезпечення надійності мобільної техніки при використанні біологічних ТСМ / Д. П. Журавель // Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України : матер. VI Міжнар. наук.-техн. конф. ... (м. Мелітополь, 10-14 червня 2015 р.) / ТДАТУ. – Мелітополь, 2015. – С. 8-10.



49. Журавель Д. П. Забезпечення надійності мобільної сільськогосподарської техніки при експлуатації на різних видах паливо-мастильних матеріалів / Д. П. Журавель // Сучасні проблеми землеробської механіки : збірник тез доповідей XVII міжнародної наукової конференції (м. Суми, 17-18 жовтня 2016 р.) / СНАУ. – Суми, 2016. – С. 163-164.

50. Журавель Д. П. Підвищення ефективності експлуатації мобільної сільськогосподарської техніки при використанні біопаливо-мастильних матеріалів / Д. П. Журавель / Рациональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2017: збірник тез доповідей XIII Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 17-19 травня 2017 р) / НУБіП. – К., 2017. – С. 155-156.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

51. Патент України № 70695U, МПК G01N 3/56. Спосіб оцінки триботехнічних характеристик матеріалів через узагальнений показник зносу / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський. – № у 2011 13563; заявл. 18.11.2011; опубл. 25.06.2012, бюл. № 12.

52. Патент України № 70726U, МПК G01N 3/56. Машина тертя / Д. П. Журавель. – № у 2011 13905; заявл. 25.11.2011; опубл. 25.06.2012, бюл. № 12.

53. Патент України № 72584U, МПК G01N 3/56. Пристрій для вимірювання сил тертя в трибоспряженні вал-втулка паливного насоса / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, В. А. Дідур, В. А. Коломоєць. – № у 2012 00834; заявл. 27.01.2012; опубл. 27.08.2012, бюл. № 16.

54. Патент України № 86867U, МПК C01B 13/00. Пристрій збагачення повітря киснем / Д. П. Журавель, М. І. Стручаєв, В. О. Петров, А. В. Петров. – № у 2013 09583; заявл. 31.07.2013; опубл. 10.01.2014, бюл. № 1.

55. Патент України № 98243U, МПК G 01N 3/56. Пристрій для оцінки змащувальних властивостей робочих рідин / Д. П. Журавель, В. А. Муравйов, С. В. Бондаренко. – № у 2014 11175; заявл. 14.10.2014; опубл. 27.04.2015, бюл. № 8.

56. Патент України № 98876U, МПК G 01N 29/00. Пристрій для контролю гліцеринових фракцій в біодизелі / Д. П. Журавель, Ю. М. Куценко, Р. В. Кушлик, Р. Р. Кушлик. – № у 2014 12693; заявл. 26.11.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. № 9.

57. Патент України № 108897U, МПК G 01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних властивостей плунжерних пар паливного насоса високого тиску / Д. П. Журавель, В. Б. Юдовинський, В. А. Коломоєць. – № а 2013 04716; заявл. 27.10.2014; опубл. 26.05.2015, бюл. № 12.

58. Патент України № 108476 U, МПК B 01D 25/00. Фільтр очищення дизельного біопалива / Д. П. Журавель, І. Б. Вороновський, К. Г. Петренко. – № у 2015 10929; заявл. 09.11.2015; опубл. 25.07.2016, бюл. № 14.

59. Патент України № 113745 U, МПК B 01D 25/00. Фільтр очищення біодизеля для заправочних станцій / Д. П. Журавель, І. Б. Вороновський, К. Г. Петренко. – № у 2016 08687; заявл. 09.08.2016; опубл. 10.02.2017, бюл. № 3.

## АНОТАЦІЯ

**Журавель Д.П. Методологія підвищення надійності сільськогосподарської техніки при використанні біопально-мастильних матеріалів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 - машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. - Таврійський державний агротехнологічний університет. - Мелітополь, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми, суть якої полягає в зниженні експлуатаційних витрат на утримання СГТ в працездатному стані шляхом адаптації вузлів і агрегатів функціональних систем при використанні БПММ. Для вирішення проблеми, вибрані основні методи і методики теоретичних та експериментальних досліджень хімотологічних і триботехнічних процесів, характеристик і властивостей ПММ, деталей трибоспряжень вузлів і агрегатів функціональних систем СГТ.

Приведений аналіз впливу факторів на надійність функціональних систем сільськогосподарської техніки та аналіз існуючих методів прогнозування її технічного стану, встановлені основні показники ефективності роботи. Наведено математичні моделі надійності функціональних систем СГТ для прогнозування їх ресурсу при роботі на БПММ. Спроектвані і виготовлені установки та фізичні моделі для дослідження закономірностей хімотологічних і триботехнічних процесів при використанні БПММ. На підставі цього побудовано номограми та комп'ютерні програми для прогнозування ресурсу вузлів і агрегатів функціональних систем в середовищі БПММ, виготовлених з різних матеріалів. Приведено результати моделювання надійності елементів функціональних систем і отримані емпіричні залежності ймовірностей їх безвідмовної роботи на мінеральних і біологічних видах ПММ. Приведено результати економічної ефективності від впровадження технічних рішень щодо вирішення проблеми підвищення надійності СГТ при використанні БПММ.

**Ключові слова:** надійність, ресурс, прогнозування, методологія, функціональна система, сільськогосподарська техніка, біодизель, трибоспряження.

## АННОТАЦІЯ

**Журавель Д.П. Методология повышения надежности сельскохозяйственной техники при использовании биотопливо-смазочных материалов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 - машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Таврический государственный агротехнологический университет. – Мелитополь, 2018.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы снижения эксплуатационных расходов на содержание сельскохозяйственной техники (СХТ) в работоспособном состоянии путем адаптации ее узлов и агрегатов функциональных систем при использовании биотопливо-смазывающих материалов (БТСМ).

В работе выполнен анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных требований к сельскохозяйственной технике. Приводится анализ физико-химических и эксплуатационных характеристик биотопливо-смазывающих материалов, а также проблемы адаптации современной сельскохозяйственной техники при их использовании.

Представлена математическая модель надежности функциональных систем при работе на минеральных и биологических топливо-смазывающих материалах (ТСМ) и математическая модель прогнозирования их ресурса. На основании этого построены номограммы прогнозирования наработки деталей узлов и агрегатов функциональных систем изготовленных из различных материалов.

Для экспериментального подтверждения теоретических предпосылок были разработаны экспериментальные установки. Для оценки поведения элементов пар трения в процессе изнашивания в среде БТСМ применялось современное оборудование повышенной точности.

Проведено исследование модели функциональной надежности элементов функциональных систем и получены эмпирические зависимости вероятности их безотказной работы на минеральных и биологических ТСМ.

Большое внимание в работе уделено исследованию поведения материалов элементов деталей СХТ в среде метилового биотоплива. Выявлено, что наиболее износостойкими из известных конструкционных материалов, из которых могут быть изготовлены плунжерные пары топливной аппаратуры, есть стали - 25Х5М или 38ХМЮА (азотированная). Ресурс таких плунжерных пар превышает ресурс пар, которые серийно используются из стали ШХ15 на 80... 120%.

Рекомендовано заменить конструкционный материал уплотнений топливного насоса высокого давления (ТНВД) из натурального или синтетического каучука на фторкаучук, что позволит увеличить достоверность безотказной работы топливной системы из 960 мото-час. до 4000 мото-час. Разработаны практические рекомендации по обеспечению надежности работы сельскохозяйственной техники на БТСМ, которые приняты к внедрению: Департаментом агропромышленного развития Запорожской ОГА, ННЦ «ИМЭСХ», ЧМПКП «Ассоль», ООО ПТК «Юждизельмаш», ООО «Мелитопольская машиностроительная компания», ООО «Калюжный», ЧНПП «Кермек», ООО «Ниса-2010», ООО «Скоробогатько»; разработаны рекомендации по уточнению межремонтных периодов сельскохозяйственной техники при эксплуатации на биологических ТСМ с целью повышения ее эксплуатационной надежности и снижению затрат на ТСМ.

Экономический эффект в результате внедрения методологии повышения надежности сельскохозяйственной техники при использовании БТСМ для Украины составляет 90 млн. грн. в год.

На основе технических решений получено 9 патентов Украины, из них, 8 патентов на полезную модель и 1 патент на изобретение.

**Ключевые слова:** надёжность, ресурс, прогнозирование, методология, функциональная система, сельскохозяйственная техника, биодизель, трибосопряжение.

## ABSTRACT

**Zhuravel D.P. Methodology providing farm machinery dependability while applying biofuels and biolubricants. – Qualification scientific paper as manuscript.**

Thesis for the scientific degree of the doctor of engineering sciences in specialty 05.05.11 – machines and means for mechanization of agricultural production. – Tavria State Agrotechnological University. – Melitipol, 2018.

The thesis is devoted to the decision scientifically - an applied problem which essence consists in drop of operational costs on the maintenance of agricultural machinery in operating state by adaptation of knots and units of functional systems when using biofuel - greases. For a solution, the main methods and techniques of theoretical and pilot studies of chemical motor-logical and tribotechnical processes, characteristics and properties fuel - greases, details of friction pairs of knots and units of functional systems are chosen. The analysis of influence of factors on reliability of functional systems of agricultural machinery and the analysis of the existing methods of forecasting of its technical condition is provided, the main indicators of overall performance are established. Mathematical models of reliability of functional systems of agricultural machinery for forecasting of their resource during the work on biofuel greases are given. Installations and physical models for probe of regularities of chemical motor-logical and tribotechnical processes when using biofuel greases are designed and made. On the basis of it nomograms and computer programs for forecasting of a resource of knots and units of the functional systems among biofuel greases made of various materials are constructed. Results of modeling of reliability of elements of functional systems are given and empirical dependences of probabilities of their no-failure operation on mineral and species fuel greases are received. Results of economic efficiency from introduction of methodology of ensuring reliability of agricultural machinery when using biofuel greases are given.

**Keywords:** reliability, resource, forecasting, methodology, functional system, agricultural machinery, biodiesel, friction pair.



Підписано до друку 26 квітня 2018 р. Зам. № 571 Формат 60x90/16.  
Друк офсетний. Обсяг 2,2 ум. друк. арк. Тираж 100 примірників

---

Надруковано в типографії  
Таврійського державного агротехнологічного університету  
Адреса: 72310, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр.-т Б.Хмельницького 18



