

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
БАБІЯ АНДРІЯ ВАСИЛЬОВИЧА
**«Методи розрахунку ресурсу і вдосконалення
конструкцій широкозахватних штанг
сільськогосподарських обприскувачів»,**

подану до захисту у спеціалізовану вчену раду Д58.052.02 на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

1.Актуальність теми дослідження

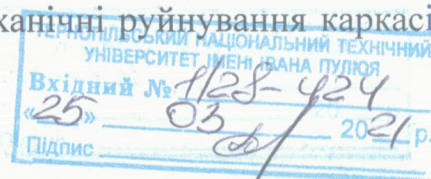
Сьогодні одним із пріоритетних напрямків щодо успішного розвитку аграрного сектора економіки є насамперед технологічне переоснащення і модернізація існуючих сільськогосподарських машин та обладнання, а також проектування нових сучасних високопродуктивних машин і устаткування, які використовують для виробництва високоякісної сільськогосподарської продукції.

Збільшення виробництва сільськогосподарської продукції пов'язано з інтенсифікацією і впровадженням прогресивних технологій у землеробстві, значним зростанням ролі хімічного захисту рослин, що сприяє підвищенню врожайності, стійкості і збереженні сільськогосподарських культур. Відповідно до статистичних даних за допомогою машин для хімічного захисту рослин щорічно зберігають до 40% врожаю усіх видів польових, садово-городніх культур.

Досягнення високої якості розподілу робочої рідини на оброблюваній поверхні становить одну з найважливіших проблем у вирішенні питань з техніки і технології обприскування. Перевага хімічного методу захисту рослин у порівнянні з іншими методами полягає у великій ефективності, надійності і швидкості, а також у простоті використовуваних технічних засобів. Загалом доля хімічних засобів захисту рослин у забрудненні довкілля порівняно невелика (3-5% хімічних препаратів за масою) у порівнянні з іншими джерелами забруднення екосистеми Землі.

Головним засобом хімічного методу захисту рослин є обприскування, що здійснюється переважно широкозахоплювальними штанговими обприскувачами. У зв'язку з цим зросла необхідність проведення досліджень динаміки штангових обприскувачів, спрямованих на поліпшення якості і точності обприскування, та їх техніко-економічних й експлуатаційних показників.

Низький рівень стабілізації широкозахоплювальних штанг багатьох моделей обприскувачів, стосовно її горизонтального положення, унеможлиблює забезпечення дотримання відповідної норми нанесення робочого препарату на одиницю ефективної площі рослин під час технологічного процесу обприскування, а часті механічні руйнування каркасів



секцій штанг і усунення цих поломок, зумовлених виконанням ремонтних робіт, не дають змоги своєчасно провести хімічну обробку рослин у стислі агротехнічні строки.

Значно знижує ресурс роботи штанг обприскувачів корозія, яка пришвидшується в агресивному середовищі під час застосування окремих робочих препаратів в процесі обприскування рослин.

Коливання штанги в процесі експлуатації погіршують якість і точність обприскування. Тому актуальною проблемою є виключення коливань штанг обприскувачів у вертикальній і горизонтальній площинах. Тому розробка нових високопродуктивних штангових обприскувачів потребує ретельного аналізу динамічного навантаження, оцінки міцності, ресурсозбереження та стабілізації несучих каркасів шарнірно-з'єднаних широкозахоплювальних штанг, подальшого удосконалювання їх конструкцій, розроблення ефективних інженерних методів розрахунку і, отже, є актуальною проблемою.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до тематик наукових досліджень, які виконувались у ТНТУ ім. І. Пулюя за державним замовленням, зокрема: №ДП158-09 «Обґрунтування параметрів з розробкою штангового малогабаритного обприскувача сільськогосподарського призначення» (реєстраційний номер 0109U002299); №ДП178-11 «Оцінка експлуатаційної навантаженості обприскувачів класу ОВП-2000 з розробкою оптимізованої за довговічністю функціонально-несучої системи» (0111U002588); №242-19 «Створення нового покоління методів фрактодіагностування матеріалів і конструкцій на основі використання нейронних мереж» (0119U001323), також у рамках «Державної цільової програми розвитку аграрного сектора економіки на період до 2022 року», та відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 6 серпня 2014 р. № 385 «Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на період до 2020 року».

3. Наукова новизна отриманих результатів дисертаційних досліджень

Загалом застосовано нові теоретичні й експериментальні підходів та методи розрахунку ресурсу працездатності широкозахоплювальних штанг сільськогосподарських обприскувачів з урахуванням силових і експлуатаційних та фізико-хімічних чинників.

Зокрема вперше:

– розроблено нову конструкцію маятникової пружно - демпфувальної підвіски широкозахоплювальної штанги обприскувача, яка підвищує її стабілізаційні властивості стосовно її горизонтального положення під час коливань, зумовлених збуренням від різних агрофонів поля і виконання технологічного процесу обприскування сільськогосподарських рослин, для якої побудовано оригінальні динамічні моделі за різних режимів навантаження обприскувача, а також у маневровому режимі, та встановлено відповідні параметри ефективного функціонування такої підвіски штанги;

– на основні положень сучасної теорії втоми матеріалів і відомого енергетичного підходу побудовано оригінальну розрахункову модель щодо визначення ресурсу елементів широкозахоплювальних штанг польових обприскувачів за циклічних експлуатаційних навантажень;

– сформульовано метод розрахунку залишкового ресурсу широкозахоплювальної штанги польового обприскувача за маневрового режиму навантаження на основі відомого енергетичного підходу в механіці заповільненого руйнування елементів конструкцій;

– запропоновано оригінальну розрахункову модель щодо визначення ресурсу роботи широкозахоплювальної штанги польового обприскувача на запропонованій маятниковій пружно-демпфувальній підвісці за комплексного впливу експлуатаційних силових і фізико-хімічних чинників на основі положень теорії корозійно-втомного руйнування, зокрема електрохімічної корозії та енергетичного підходу втомного руйнування;

– сформульовано і розвинено метод розрахунку залишкового ресурсу широкозахоплювальної штанги польового обприскувача, на запропонованій підвісці, за фундаментальним енергетичним підходом сповільненого втомного руйнування та навантаженні металоконструкції під час маневрового режиму обприскувача з урахуванням дії корозійного середовища розчину інсектициду Нурел Д;

– проведено дослідження стандартизованими методами та оцінено вплив насичених розчинів інсектициду Нурел Д і рідкого комплексного добрива КАС-32 на втомну та корозійно-втомну довговічність сталі СтЗпс каркасу секції широкозахоплювальної штанги обприскувача, а також на характеристики її тріщиностійкості за циклічного навантаження у цих корозійно-активних середовищах;

– отримано фундаментальні результати досліджень корозійно-механічного руйнування металевих матеріалів і елементів конструкцій обприскувача на основі розробленого методу визначення залишкового ресурсу конструктивно покращеної широкозахоплювальної штанги на запропонованій маятниковій пружно-демпфувальній підвісці, та встановлено питомі впливи нерегулярних динамічних навантажень, які виникають від нерівностей агрофону поля під час технологічного процесу обприскування рослин, на ресурс працездатності цієї широкозахоплювальної штанги загалом.

4. Практичне значення одержаних результатів

Розроблені методи, які становлять єдиний комплекс досліджень щодо визначення ресурсу працездатності широкозахоплювальних штанг сільськогосподарських обприскувачів з урахуванням динамічних силових, фізико-хімічних і експлуатаційних чинників мають прикладне і практичне значення для проектування нових та удосконалення існуючих конструкцій напіпних штанг польових обприскувачів, що дають змогу визначати як залишковий ресурс функціонування вказаних металоконструкцій, так і прогнозувати ресурс працездатності, підвищити показники надійності та довговічності сільськогосподарських обприскувачів загалом.

Проведені експериментальні дослідження на основі розроблених методик

дозволили визначити ряд показників, що стосуються швидкості кородування сталі СтЗпс каркасу секції широкозахоплювальної штанги обприскувача у середовищах робочих розчинів, а також якість та довговічність захисного фарбового покриття, нанесеного в умовах виробництва, опір корозійно-втомному руйнуванню такої сталі, параметри її циклічної тріщиностійкості в експлуатаційних середовищах.

На основі виконаних аналітичних та експериментальних комплексних досліджень розроблено і виготовлено нову ефективну конструкцію маятникової пружно-демпфувальної підвіски широкозахоплювальної штанги обприскувача, яка успішно пройшла польові випробування в конструкції штанги обприскувача ОПШ-3524 на полях ПП «Вікнини».

Матеріали стосовно теоретичних основ, методики розрахунків і проведення експериментальних досліджень передані та використовуються конструкторським відділом ТДВ «Львівагромашпроект» – виробником обприскувачів для проектування і модернізації штагових обприскувачів. Розроблені методи щодо визначення ресурсу працездатності металоконструкцій з урахуванням специфіки експлуатаційного навантаження передані й використовуються КБ ПАТ «Рівнесільмаш», ВАТ «Коломиясільмаш», а окремі запатентовані рішення та рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації обприскувачів застосовують в агрофірмах ПСАФ «Нічлава», ТОВ «Україна».

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи використовуються і у навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя на кафедрі технічної механіки та сільськогосподарських машин.

5. Ступінь обґрунтованості і достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, що містяться у дисертаційній роботі, підтверджуються дотриманням методології наукових досліджень. Оцінка адекватності розроблених моделей проводилась шляхом порівняння теоретичних та експериментальних даних.

Обґрунтованість висновків та практичних рекомендацій, які запропоновані у дисертаційній роботі, підтверджується позитивними результатами практичних та теоретичних досліджень. Одержані результати добре узгоджуються з даними, раніше проведених досліджень.

Вище наведене дозволяє стверджувати про достатню обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які містяться у дисертації.

6. Повнота оприлюднення результатів дисертаційної роботи, апробація, ідентичність автореферату і основних положень дисертації та особистий внесок здобувача

Докторська дисертація написана державною мовою, матеріал викладений у логічній послідовності, систематизований та вдало графічно проілюстрований. У вступі до дисертації зазначено особистий внесок автора у наукові праці, написані у співавторстві.

Матеріали кандидатської дисертації не залучені до матеріалів докторської дисертації.

Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації.

Автореферат дисертації достатньо повно розкриває суть дисертації, її наукові положення, результати і висновки та не містить надмірних подробиць й інформації, яка відсутня у самій дисертаційній роботі. Висновки здобувача підтверджують, що його наукова праця має важливе народногосподарське значення для науки і практики. Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи відображено у 51 публікації: 25 – у фахових українських та закордонних виданнях, а також виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних (7 – одноосібних) ; 13 – патенти України на корисні моделі; 13 – матеріали і тези доповідей на науково – технічних конференціях (6 – одноосібних).

Зміст дисертації повністю відповідає паспорту спеціальності 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

У повному обсязі результати дисертаційних досліджень доповідались і отримали позитивну оцінку на наукових семінарах: Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів, 2020 р.), ТНТУ ім.Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2020 р.) та Луцького національного технічного університету (м. Луцьк, 2021 р.).

Основні наукові положення і результати наукових досліджень доповідались і отримали позитивну оцінку на 13 – ти всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях у 2006 – 2020 рр.

7. Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи

Докторська дисертаційна робота містить анотацію і складається із вступ, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 356 сторінок друкованого тексту і містить 172 рисунки, 28 таблиць, 5 додатків, список використаних джерел із 300 найменувань, з них 75 іноземних.

Матеріал дисертації викладено на високому науково-технічному рівні, грамотно і лаконічно і послідовно. Його добре структуризовано за розділами, між якими очевидні наявні логічні зв'язки та правильні переходи.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність теми, чітко сформульовано мету, зазначено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, окреслено завдання досліджень, вказано методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено дані щодо публікації за темою дисертації й апробації результатів дисертаційних досліджень та вказано особистий внесок здобувача у працях, опублікованих у співавторстві

Структура вступу і подана у ній інформація дає змогу отримати чітку та повну уяву про дисертаційні дослідження здобувача.

У **першому** розділі дисертації висвітлено сучасний стан проблеми щодо новітньої техніки і технології хімічного захисту сільськогосподарських рослин

від хвороб, бур'янів, шкідників та внесення ними поживних речовин, проаналізовано літературні джерела, протоколи випробувань, статистичні спостереження щодо чинників, які впливають насамперед на якість виконання технологічного процесу обприскування штанговими обприскувачами і забезпечення належного ресурсу функціонування начіпних широкоохоплювальних штангових обприскувачів та їх окремих складових.

Підкреслено, що хімічний захист сільськогосподарських рослин залишається ключовим у загальній технології захисту рослин загалом. Для забезпечення високої ефективності роботи обприскувачів з мінімальними екологічними ризиками розглянуто головні чинники, які впливають на технічну ефективність і якість обприскування. Якість обприскування рослин насамперед залежить від правильного функціонування різних типів розпилювальних пристроїв, причому розроблено оригінальний спеціальний пристрій для визначення кількості та рівномірного розпилення, зроблено аналіз спектра розпилу робочої рідини та встановлено взаємозв'язок між висотою розміщення їх над поверхнею оброблення рослин та можливістю краплин осідати на цю поверхню рослин. Крім обприскування різними хімічними препаратами, окремо розглянуто роботу обприскувачів при внесенні рідких комплексних добрив типу КАС.

З метою виявлення впливу коливань штанги на рівномірність обприскування рослин розглянуто основні типи підвісок штанг, які використовують у сучасних конструкціях обприскувачів.

На основі наявної проблематики сформульовано мету та завдання досліджень, які вирішено в дисертаційній роботі.

Відзначено вчених, які внесли вагомий вклад у розвиток сільськогосподарського машинобудування та вчених, які зробили фундаментальні підходи до проблем міцності та циклічності тріщиностійкості матеріалів з урахуванням специфіки навантаження та впливу різних агресивних середовищ.

Підкреслено, що проблема розрахунку ресурсу роботи (залишкового ресурсу) каркасів штанг обприскувачів з урахуванням специфіки їх навантаження та впливу агресивного середовища вивчена недостатньо. Тому на основі існуючої проблеми сформовано мету та завдання даного дисертаційного дослідження. Детально проаналізовано конструктивні особливості цих машин, основні етапи їх розвитку та виконано широкий огляд літературних джерел (300 найменувань).

Значну увагу відведено вивченню стану питання щодо математичного моделювання штангових обприскувачів, де стисло висвітлено основні результати наукових праць попередників і чітко обумовлено проблеми, які залишились поза увагою і поки що не вирішені.

Здобувачем проведено аналіз, в якому визначено своє місце у розв'язанні наукової проблеми.

Загалом обсяг першого розділу відповідає встановленим вимогам.

У **другому розділі** оцінено корозійну стійкість сталі Ст3пс у демінералізованій воді та насичених розчинах інсектициду Нурел Д і рідкого

комплексного добрива КАС-32. Наведено результати корозійних, поляризаційних та імпедансних випробувань, де встановлено механізми корозійного руйнування у досліджених системах метал-середовище.

Аналізуючи результати випробувань встановлено, що найінтенсивніше сталь Ст3пс кородує в демінералізованій воді. Зокрема, впродовж перших 24 год у насичених розчинах інсектициду Нурел Д, а також рідкого комплексного добрива КАС-32 швидкість менша приблизно на 23 % та 53% відповідно. Найшвидше сталь кородує у демінералізованій воді, менше – в інсектициді Нурел Д, а найповільніше – у середовищі рідкого комплексного добрива КАС-32, що пояснюється присутністю інгібітора (фосфатів амонію).

Доведено, що у розчині комплексного добрива сталь найслабше опирається корозії. Зокрема, густина струму корозії $j_{\text{кор}}$ у середовищі інсектициду в 1,7 разів, а в рідкому мінеральному добриві – на порядок вища, ніж у демінералізованій воді.

Аналіз складу розчину інсектициду вказує на наявність поверхнево-активних речовин, які є плівкоутворювальними агентами. Внаслідок цього на поверхні металу з'являється плівка, яка слугує бар'єром для проникнення агресивних компонентів середовища до поверхні і пітингова корозія тут зумовлена пошкодженням плівки.

Ефективним та надійним методом захисту сталюї поверхні від корозії є нанесення захисних фарбових покриттів. У роботі досліджено зразки, вирізані з каркасу штанги обприскувача з нанесеним захисним покриттям за технологією порошкового фарбування в умовах виробництва. Вимірювання імпедансних характеристик (ємності та опору) – це найефективніший метод пришвидшених досліджень захисних властивостей фарбових покриттів на металічних поверхнях у різних корозійних середовищах.

Отримані результати випробувань опору та ємності засвідчують якість та довговічність захисного фарбового покриття, нанесеного в умовах виробництва.

У третьому розділі оцінено вплив демінералізованої води та насичених розчинів інсектициду Нурел Д і рідкого комплексного добрива КАС-32 на втомну та корозійно-втомну довговічність сталі Ст3пс, а також на характеристики її тріщиностійкості за циклічного навантаження у повітрі та корозійно-активних середовищах. Проаналізовано фрактографічні ознаки впливу робочих середовищ на особливості втомного руйнування тривало експлуатованих зразків зі сталі Ст3пс.

Встановлено, що в усьому діапазоні прикладених навантажень опір корозійно-втомному руйнуванню сталі у корозійних середовищах демінералізованої води та насичених розчинах інсектициду Нурел Д і рідкого комплексного добрива КАС-32 порівняно з повітрям знижується.

Зокрема на основі аналізу макрофрактограм зламів виявлено, що на повітрі зародження руйнування зразка відбулося від одного осередку (гладенька серпоподібна зона з дрібнодисперсним рельєфом у верхній частині зламу і поступово поширилося на весь його переріз. Встановлено, що поступове зростання рельєфу зламу з чітко вираженими гребенями між суміжними

локальними фронтами поширення тріщини, орієнтованими в макронапрямі поширення руйнування, є ознакою зростання швидкості його поширення, причому грубо рельєфна зона остаточного руйнування зразка розташована в нижній частині зламу.

Отже, аналіз макро особливостей руйнування втомних зразків має такі особливості і:

1. Підтвердив полегшення зародження руйнування в усіх корозійних середовищах порівняно з повітрям.

2. Показав, що кількість осередків зародження руйнування від бічної поверхні зразків зростає в міру підвищення корозійної активності випробувального середовища в ряду: повітря – демінералізована вода – насичений розчин інсектициду Нурел Д – рідке комплексне добриво КАС-32.

3. Виявив різну схильність експлуатованої сталі до поширення руйнування у різних середовищах. Причому вплив рідкого комплексного добрива КАС-32 виявився найсильнішим.

Виявлено, що робочі середовища різного складу неоднаково впливають на циклічну тріщиностійкість сталі порівняно з випробуваннями у повітрі. У розчині Нурел Д характеристики її циклічної тріщиностійкості знижуються, про що свідчить зміщення вліво діаграми швидкості росту втомної тріщини проти діаграми, отриманої у повітрі, а в розчині КАС-32 швидкість росту втомної тріщини зменшується порівняно з повітрям, що можна пояснити дією фосфатів амонію – інгібіторів корозії вуглецевих сталей.

Демінералізована вода неоднозначно впливає на діаграму циклічної тріщиностійкості сталі. Виявлено ефект домінуванням водневого механізму росту тріщини над корозійним. Важливо зауважити, що отримані результати обмежені ділянкою Паріса і їхній аналіз справедливий тільки для цієї частини діаграми циклічної тріщиностійкості сталі.

У четвертому розділі сформульовано метод оцінювання ресурсу (залишкового ресурсу) працездатності широкоохоплювальних штанг польових обприскувачів за змінних у часі навантажень.

Під час функціонування начіпна широкоохоплювальна штанга обприскувача коливається, в результаті чого певні її елементи зазнають розтягувальних і стискальних і згинальних циклічних навантажень. Такі коливання змодельовано циклічними навантаженнями з частотою $f \approx 1$ Гц. Задача полягала у визначенні кінцевого ресурсу працездатності штанги (кількості циклів навантаження $N = N_*$), після досягнення якого вона перестане виконувати свої функціональні властивості (настане часткове або повне руйнування).

Ресурс металоконструкції, зазвичай, визначається часом працездатності найслабшої ланки, тобто одного із найнавантажениших її елементів – начіпної широкоохоплювальної (широкої розгортки) штанги обприскувача.

Відповідно до сучасної теорії втоми (механіки сповільненого руйнування елементів конструкцій при змінних навантаженнях) ресурс елемента конструкції N_* при змінних навантаженнях визначено з урахуванням періоду

зародження втомної тріщини і періоду її докритичного росту. Розрахунок періоду зародження тріщини для таких елементів проведений для області обмеженої довговічності діаграми Веллера, а період докритичного росту $N = N_d$ визначено на основі відомого енергетичного підходу член-кореспондента НАН України О.Є. Андрейківа. На основі цього записано рівняння швидкості V росту тріщини та енергетичний баланс для кожного стрибка тріщини, баланс швидкостей зміни складових енергій, знайдемо величину швидкості поширення тріщини.

Розглянуто найнавантаженіший згинальний елемент начіпної широкоохоплювальної штанги, який являє собою прямокутну трубу зі сталі СтЗпс перерізом $40 \text{ мм} \times 25 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$, яка піддана циклічному згину.

Задача полягала у визначенні залишкового ресурсу $N = N_d$ розглядуваного балкового елемента закритого профілю. Для визначення необхідних характеристик матеріалу побудовано діаграми Веллера і кінетичну діаграму росту втомних тріщин для сталі СтЗпс, а з допомогою методу найменших квадратів і даних цих діаграм знайдено невідомі константи та визначено наближено ресурс штанги, який становив $t_* \approx 1767 \text{ год}$.

Відомо, що нормативний термін служби обприскувачів 7 років, а річна завантаженість причіпних обприскувачів 550 год. Отже, за прийнятих тут максимальних амплітуд коливання елементів штанги, вона пропрацює приблизно 3,2 сезони, що не відповідає нормативному терміну служби обприскувачів. Тому необхідно зменшувати (усувати) коливання елементів штанг.

Польові обприскувачі працюють при складних експлуатаційних умовах за дії змінних навантажень і агресивних корозійних середовищ. Все це викликає поверхневе локалізоване руйнування, що призводить до утворення малих поверхневих тріщин. Такі тріщини поширюються до макроскопічних розмірів і часто спричиняють втрату функціональних властивостей польових обприскувачів (непередбачене часткове або повне руйнування їх елементів). Для уникнення цього розроблено методику визначення періоду до критичного росту малих поверхневих тріщин в елементах (прямокутні труби) штанг польових обприскувачів.

У нормативних документах при розрахунку штанг польових обприскувачів не враховуються в явному вигляді характеристики опору малоцикловому руйнуванню, а найбільше, опору маневрового навантаження. Тому для недопущення непередбаченого їх руйнування і запобігання аварійних ситуацій важливе значення має визначення їх залишкового ресурсу працездатності з урахуванням експлуатаційних чинників, особливо за маневрового режиму експлуатації. Для цього в даному розділі сформульовано розрахункову модель, суть якої полягає в тому, що під час робочого процесу обприскування начіпна широкоохоплювальна штанга коливається, в результаті чого деякі її елементи зазнають згинальних циклічних навантажень та n поодиноких поштовхів, які зумовлюють зміну усталених циклічних навантажень від максимального імпульсу $M_i (i = 1, \dots, n)$. Представлено графічну залежність зміни напружень в

елементах начіпної штанги за маневрового режиму у часі.

Побудовано криві залишкової довговічності штанги N_* від безрозмірного значення ε_0 – початкового розміру тріщини при стаціонарному і маневровому режимах експлуатації за різного значення n кількості поштовхів із-за нерівностей поверхні поля. Встановлено, що маневровий режим експлуатації може зменшити залишкову довговічність штанги більше ніж у 3 рази.

У п'ятому розділі розроблено метод визначення залишкового ресурсу працездатності начіпної широкоохоплювальної штанги польового обприскувача з урахуванням експлуатаційних силових (циклічних і маневрових) та фізико-хімічних (враховано корозійне середовище розчину інсектициду Нурел Д) чинників.

Розглянуто розрахункову модель для визначення довговічності вдосконаленої автором штанги, елементи якої (квадратні труби) зазнає знакозмінного навантаження в умовах дії корозійного середовища розчину інсектициду Нурел Д для кількості циклів навантаження $N = N_*$ після досягнення якого вона перестане виконувати свої функціональні властивості.

Як прийнято в сучасній теорії втомного руйнування, ресурс елемента конструкції N_* при змінних навантаженнях визначається, що тріщина зароджується глибиною $l_0 = 0,001$ м при N_3 циклах навантаження. Для визначення періоду N_3 зародження тріщини в елементі штанги вибрано таке навантаження, що в найнавантаженішій стінці труби викликає напруження $\Delta\sigma \approx 180$ МПа. Тоді на основі відомого енергетичного підходу член-кореспондента НАН України О.Є. Андрейківа отримано $N_3 \approx 3 \cdot 10^6$ цикли. Після того, як пройшло зародження втомної тріщини глибиною $l_0 = 0,001$ м, починається її ріст до критичної глибини l_* і тріщина такої складної конфігурації за період $N_D^{(2)}$ пошириться від $l = l_1$ до критичного розміру $l = l_2$, спричиняючи повне руйнування розглядуваного балкового елемента.

Знайдено період N_D до -критичного росту такої втомної тріщини і визначено ресурс штанги: $N_* \approx 301 \cdot 10^4$ циклів або $t_* \approx 836$ год.

Встановлено, що за прийнятих тут максимальних амплітуд коливань елементів начіпної широкоохоплювальної штанги і впливу корозійного середовища така штанга пропрацює приблизно 1,5 сезону, що не відповідає нормативному терміну служби обприскувачів. Корозійне середовище зменшує ресурс штанги майже у 2 рази. Тому необхідно зменшувати (усувати) коливання елементів штанги й захищати її поверхню від зовнішнього корозійного впливу.

Сформульовано також розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу штанг польових обприскувачів за дії на них маневрового режиму навантаження і корозійного середовища та побудовано розрахункову модель розвитку в стінці цієї ж труби тріщини складної конфігурації.

У шостому розділі виконано дослідження, що стосуються визначення нерівномірності внесення робочого препарату на ефективну оброблювану

площу розпилювальними пристроями залежно від висоти розміщення начіпної широкозахоплювальної штанги над об'єктом обробки та її положенням у горизонтальній площині.

З метою підвищення стабілізації штанги розроблено нову конструкцію маятникової пружно-демпфувальної підвіски широкозахоплювальної штанги обприскувача, складено динамічну модель її роботи на різних режимах навантаження обприскувача, зокрема при маневровому режимі, зроблено порівняльний аналіз ефективності її функціонування з відповідними аналогами. Проведено дослідження щодо можливості виникнення резонансних режимів коливань начіпної широкозахоплювальної штанги та охарактеризовано віброізоляційні властивості запропонованої підвіски штанги обприскувача.

На основі технічної теорії згинних коливань призматичних стержнів побудовано модель для аналітичного дослідження згинних коливань секцій широкозахоплювальної штанги у поперечно-вертикальній площині з урахуванням особливостей конструкції розробленої підвіски штанги обприскувача. Аналіз напружено-деформованого стану штанги виконано у програмі APM Structure 3D. Побудовано графічні залежності нанесення препарату на оброблювальну поверхню залежно від висоти встановлення начіпної широкозахоплювальної штанги з кроком розміщення розпилювачів на штанзі 0,5 м та нерівномірностями покриття при міжрядному обробітку і при суцільному внесенні.

Побудовано графічні залежності нерівномірності покриття ділянок контрольних полос у відсотках при горизонтальних коливаннях штанги для ділянок контрольних полос 5 м, 8 м, 12 м. Додатні значення вказують на нерівномірність покриття недоливом, від'ємні значення – перелив.

Отже, отримано раціональні висоти встановлення штанг над об'єктом обробки та допустимі амплітуди коливань начіпної широкозахоплювальної штанги без порушення норми виливу робочого препарату.

З метою зменшення коливань штанги розроблено та запатентовано нову конструкцію оригінальної маятникової підвіски із пружно-демпфуючим елементом і розроблено відповідну розрахункову схему для якої виконано кінематичний аналіз та побудовано динамічну модель. Отримано залежність вертикального переміщення начіпної штанги на такій маятниковій підвісці від кута повороту верхнього маятника (косої верхньої ланки цієї підвіски), який прийнято за узагальнену координату. Записано диференціальні рівняння, які описують вертикальні і кутові коливання начіпної широкозахоплювальної штанги обприскувача у в поперечно-вертикальній площині з метою оцінювання здатності підвіски гасити такі коливання.

Розв'язок диференціальних рівнянь виконано числовим методом у пакеті прикладних програм Mathcad. За аналізом розв'язків встановлено, що для даного режиму переміщення обприскувача на першій секунді руху перешкодами відносно вертикальне переміщення маси штанги на підвісці не перевищує 0,011 м. Далі таке переміщення в межах 0,005 м, що цілком допустимо для вертикальних коливань штанги без порушення норми виливу робочого препарату на оброблювану поверхню.

Встановлено, що у запропонованій маятниковій підвісці виникає 3,5- 4,7-кратне поглинання підвіскою кутових коливань. Коливання основної гармоніки начіпної широкоохоплювальної штанги обприскувача зменшується у 5 разів і становить 0,2 Гц.

Також встановлено, що нова запропонована маятникова підвіска з пружно-демпфувальним елементом має віброізоляційні характеристики приблизно в 3,1 разів кращі, ніж базова конструкція.

За результатами числового розв'язання відповідних рівнянь вертикальні переміщення маси начіпної широкоохоплювальної штанги не перевищують 0,015 м при загальному збуренні коливань обприскувача амплітудою 0,05 м і це підтверджує відмінні віброізоляційні параметри розробленої маятникової підвіски штанги.

Виконано також окремі дослідження, що стосуються виникнення резонансного режиму при коливаннях маси штанги на розробленій підвісці. Встановлено: для низькочастотного режиму збурення коливань: власна частота – $\omega_0 = 11,7$ Гц, циклічна частота збурення – $\omega_l = 6,3$ Гц; для високочастотного режиму збурення коливань, відповідно $\omega_0 = 11,7$ Гц, а циклічна частота збурення $\omega_{ll} = 49,4$ Гц. Отже, частоти значно відрізняються і резонанс неможливий.

Для маневрового режиму одержано аналітичні залежності моделювання вертикального і кутового переміщення обприскувача при русі польовими нерівностями і записані відповідні диференціальні рівняння, які описують вертикальні і кутові коливання начіпної широкоохоплювальної штанги обприскувача у в поперечно-вертикальній площині з метою оцінювання здатності підвіски гасити такі коливання. Розв'язання цих рівнянь виконано числовим методом за заданими параметрами штангового обприскувача і отримано, що відносне вертикальне переміщення маси штанги при «малих» збуреннях становить 0,013 м і для «великих» – 0,079 м; для кутових збурень відповідно – 0,003 рад і 0,014 рад.

Для дослідження характеру прогинів секцій начіпної широкоохоплювальної штанги за основу взято технічну теорію згинних коливань призматичних стержнів. Штангу представлено у вигляді стержня змінного перерізу, який має центральну частину сталого перерізу та дві бокові секції змінного перерізу. Для вказаної схеми записано диференціальні рівняння руху, початкові та граничні умови. Числовим методом знайдено переміщення точок штанги у будь-якому її перерізі від збурення у часі.

Аналіз напружено-деформованого стану штанги виконано у програмі APM Structure 3D. Визначено найбільш напружені елементи каркасів штанги,

У сьомому розділі представлена методика проведення експериментальних досліджень динамічних характеристик та напруженого стану штанг обприскувачів різних типів на натурних конструкціях. Також представлена, розроблена здобувачем, методика проведення напівнатурного експерименту дослідження аналогічних характеристик запропонованої маятникової пружно-демпфувальної підвіски начіпної широкоохоплювальної штанги обприскувача в

лабораторних умовах на експериментальному зразку підвіски та з використанням стендового обладнання, що імітує польові нерівності під час руху обприскувача.

Експериментальні дослідження проведено поетапно з використанням наклеєних тензорезисторів на елементи металоконструкції обприскувача для виявлення напруженого стану, динамометрів – динамічних сил у зосереджених масах, п'єзоелектричних акселерометрів ДН-3-М1, ДН-4-М1 – пришвидшень та датчиків кутових швидкостей.

На першому етапі досліджень оцінено динаміку навантаження складових конструкції монтованого обприскувача ОПШ-600, зокрема його штанги. Визначено напруження в характерних перерізах штанги обприскувача, динамічні сили в зосереджених масах та пришвидшення в заданих точках, що дає змогу виявити вплив агрофону поля на збурення коливань штанги обприскувача. На краю такої штанги обчислено максимальні пришвидшення для режиму руху пасовищем за наявних перешкод: при швидкості руху 10 км/год – $69,5 \text{ м/с}^2$, а при швидкості 12 км/год – $75,8 \text{ м/с}^2$.

Досліджено напружений стан верхньої труби центральної секції штанги базової конструкції причіпного обприскувача ОПШ-3524 виробництва ТДВ «Львівагромашпроект» для якого адаптована розроблена маятникова пружно-демпфувальна підвіска начіпної широкоохоплювальної штанги обприскувача перерізом 60 мм × 60 мм × 3 мм при частоті збурення коливань у межах 1-1,8 Гц під час руху обприскувача поверхнею вказаного поля зі швидкістю 12 км/год, де середні максимальні напруження зафіксовані в межах $80 \leq \leq 150 \text{ МПа}$ і у межах $90 \leq \leq 130 \text{ МПа}$ при русі агрегату зі швидкістю 10 км/год.

Здатність запропонованої підвіски гасити коливання оцінено коефіцієнтом віброізоляції, що визначається відношенням пришвидшення, яке збурюється рельєфом поля на рамі обприскувача (місця кріплення підвіски), до пришвидшення, яке фіксували в цій же площині, але на секції штанги обприскувача. Коефіцієнт віброізоляції для базової конструкції підвіски становив близько 1,07.

Експериментально досліджено обприскувач ОПК-2000 виробництва фірми «Богуславська сільгосптехніка» і виявлено, що при переїзді колесами обприскувача через перешкоду у вигляді невеликої колії (глибиною 5-6 см) практично відсутня пружна амортизація підвіски, а отримане кінематичне збурення майже повністю передається секціям штанги. Встановлено коефіцієнт віброізоляції від вертикальних коливань – 1,1. Це додатково підтверджує недостатні амортизаційні властивості такої підвіски.

Отже, з наведеного експериментального порівняльного аналізу виявлено, що представлені базові маятникові підвіски не здатні гасити вертикальні коливання і під час руху обприскувача і це спричиняє виникнення значних напружень у перерізах каркасів секцій штанги. Тому розроблено і запропоновано ефективнішу підвіску, експериментальний взірець якої було виготовлено за параметрами робочої підвіски штанги (24 м) обприскувача ОПШ-3524. Для перевірки її роботоздатності проведено напівнатурний

експеримент із використанням стенда, що імітує польові нерівності заданої висоти та частоти.

Визначено віброізоляційні властивості запропонованої маятникової пружно-демпфувальної підвіски начіпної штанги. Встановлено, що для найтипівіших нерівностей поля 0,05 м зі збільшенням маси штанги та частоти збурення коливань віброзахисні властивості запропонованої підвіски зростають. Коефіцієнт віброізоляції становив 3,15 у серії експериментів..

Проведено перевірку роботоздатності розробленої підвіски в польових умовах у складі конструкції штанги обприскувача ОПШ-3524.

Високу ефективність розробленої підвіски підтверджено в експлуатаційних умовах: за маневрового навантаження обприскувача в даній серії експериментів і отримано коефіцієнт віброізоляції, який дорівнює 3,06, за аналізом НДС найнавантаженого елемента встановлено, що верхні волокна розглядуваної квадратної труби центральної секції напружені в межах $50 \leq \sigma \leq 90$ МПа.

Встановлено, що розбіжність значень коефіцієнтів віброізоляції запропонованої маятникової пружно-демпфувальної підвіски начіпної широкозахоплювальної штанги обприскувача, які обчислені теоретично і за лабораторного експерименту та експерименту в польових умовах становить до 3 %.

У дисертаційній роботі після проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень на основі розроблених новітніх методів розрахунку й оцінювання, проектування нових і вдосконаленні існуючих конструкцій підвісок начіпних широкозахоплювальних штанг обприскувачів, прогнозування та підвищення ресурсу функціонування металевих каркасів секцій начіпних широкозахоплювальних штанг на маятникових пружно-демпфувальних підвісках з урахуванням специфіки навантаження та дії корозійних середовищ, а також запобігання аварійних поломок при їх експлуатації зроблені відповідні вагомі ґрунтовні висновки.

8. Зауваження до дисертаційної роботи

Докторська дисертація **Бабія Андрія Васильовича** не має принципових недоліків, які могли б вплинути на позитивну оцінку роботи загалом. але під час читання рукопису дисертації виявлені такі зауваження:

1. У першому розділі доцільно було би дати ще ширший аналіз конструкцій сучасних штангових обприскувачів вітчизняних, так і закордонних виробників, які використовуються в Україні та вказати на основні тенденції вдосконалення таких машин і які фірми в Україні сьогодні випускають штангові обприскувачі.

2.Розроблена (запропонована) оригінальна маятникова пружно-дмпфувальна підвіска штанги обприскувача добре обґрунтована і апробована та має, на мій погляд, право на «життя» і є «родзинкою» дисертації, бо починаючи з 1973 р., коли вперше було запропоновано маятникову підвіску, фахівці до сьогодні пропонують сотні різновидів підвісок для штанг і тільки декілька з них реально використовують фірми виробники обприскувачів.

Вважаю, що запропонована штангова підвіска є однією із найкращих і повинна мати назву ХА – подібна, але назва за автором.

3. Окремі графічні рисунки вимагають детальнішого пояснення, зокрема рис.1.9, рис.1.13, 1.14 і рівняння (1.7), (1.8). До рис.6.7 не має аналізу щодо щільності нанесення. Назва рисунка 6.6 – Графічні залежності нерівномірності покриття при міжрядному обробітку не зовсім вдала. Треба підписати: залежність нерівномірності покриття препарату від висоти встановлення штанги над поверхнею оброблюваних рослин. На рисунку 6.13 замість назви «кутове переміщення маси штанги на підвісці» слід написати: характер зміни кутових відхилень начіпної штанги (суцільна лінія) і рами обприскувача (пунктирна лінія) у часі, а на рисунку 6.14 замість назви «прискорення маси штанги у вертикальній площині» слід написати: характер зміни вертикальних пришвидшень штанг на запропонованій підвісці а) і базовій б) у часі.

4. В авторефераті і дисертації доволі часто зустрічаються русифіковані терміни, зокрема: фактори – це чинники, прискорення – пришвидшення, плівкотвірні – плівкоутворювальні, широкозахватні – широкозахоплювальні, демфуючий – депфувальний, навісні – начіпні, згинальні (рос. игибающие), правильно згинні або поперечні (рос. изгибные) коливання, чисельні – числові методи тощо.

5. У дисертаційній роботі, незважаючи на високу коректність і технічну грамотність, все таки трапляються окремі орфографічні, лінгвістичні, стилістичні помилки та описки.

6. Дисертація містить багато умовних позначень, що дещо ускладнює її сприймання. Тому доцільно було на самому початку записати список умовних позначень і скорочених назв.

7. Зроблені зауваження не зменшують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи і тільки вказують на перспективні напрями і спонукають до подальших наукових досліджень.

9. Загальні висновки щодо дисертаційної роботи і рекомендації

1. Дисертаційна робота **Бабія Андрія Васильовича** «Методи розрахунку ресурсу і вдосконалення конструкцій широкозахватних штанг

сільськогосподарських обприскувачів» є самостійно завершеною науково-прикладною працею, в якій представлені нові науково обґрунтовані результати теоретичних і експериментальних досліджень і яка повністю відповідає паспорту спеціальності 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

2. У результаті аналізу дисертаційної роботи і автореферату встановлено, що зміст дисертації та автореферату ідентичні, а оформлення відповідає нормативним вимогам.

3. Отримані здобувачем результати наукових досліджень, на основі розроблених нових теоретичних методів розрахунку і оцінки ресурсу працездатності та вдосконалення конструкцій широкозахоплювальних штанг обприскувачів, на запропонованій маятниковій пружно-демпфувальній підвісці, для підвищення функціонування штангових обприскувачів загалом вирішують

важливу науково-технічну проблему, яка має важливе народногосподарське значення в галузі сільськогосподарських машин, зокрема штангових обприскувачів, визначають мету й актуальність даного дисертаційного дослідження.

Важливі і достовірні оригінальні теоретичні та практичні результати досліджень свідчать, що здобувачем досягнута мета дисертаційного дослідження.

4. Представлений у дисертації матеріал за структурою, обсягом, змістом, якістю оформлення та викладення матеріалу, рівнем наукової новизни і практичній цінності, обсягу та глибини досліджень, за важливістю та актуальністю, реальним особистим вкладом у розвиток теоретичних методів розрахунку і оцінки ресурсу працездатності вдосконаленої конструкції широкозахоплювальної штанги обприскувача для підвищення функціонування штангових обприскувачів, оригінальністю щодо прикладних і теоретичних розробок та наявності реального впровадження ця дисертаційна робота повністю відповідає вимогам, які ставляться до докторських дисертацій, відповідає вимогам п. 9, 10, 12 Постанови Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. №567 «Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор **Бабій Андрій Васильович** безперечно заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

Офіційний опонент:

Професор кафедри транспортних технологій
Національного університету
«Львівська політехніка»,
доктор технічних наук, професор

 І. А. Вікович

Підпис професора Віковича І.А. засвідчую:
Вчений секретар
Національного університету
«Львівська політехніка»,
к.т.н., доцент



Р.Б. Брилинський