

УДК 631

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ АГРОКУЛЬТУР

В. М. Зубко

Сумський національний аграрний університет, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція автора: zubkovladislav@ukr.net.

Історія статті: отримано – червень 2021, акцептовано – листопад 2021, опубліковано – 17 грудня 2021 року.
Бібл. 14, рис. 20, табл. 1.

Анотація. Сучасне аграрне виробництво націлене на отримання максимальної врожайності при вирощуванні продукції рослинництва. Генетика створює сорти та гібриди, які максимально реалізують свій біологічний потенціал у відповідності до умов вирощування. Однак актуальною задачею є забезпечення технології, а саме потреб рослин у відповідних фазах росту і розвитку у найкоротші строки.

Нинішні розробки, у тому числі і для агровиробництва, заповнили ринок цифрових технологій та засобів механізації. Для ефективного агроінжинірингу потрібна модернова база комплексних прикладних досліджень ефективності використання новітніх розробок у сучасних виробничих умовах. Слід зауважити, що кожна розробка буде показувати різну ефективність, а саме різні показники якості у різних виробничих умовах.

Ефективність проведення польових досліджень використання безпілотного летального апарату (БПЛА) XAG XPlane на чотири вентилятора проводилось в Сумському регіоні на дослідних полях Сумського національного аграрного університету. Унікальність досліджень полягала у тому, що була розроблена методика з залученням фахівців агроінжинірингового і агрономічного напрямів та фахівців у галузі фізики для визначення ступеня покриття листа робочим розчином саме при його «задавленні» лопатями БПЛА; використана методика діджиталізації маркерів за допомогою визначення кольору робочого розчину з урахуванням зміни його яскравості в залежності від проміжку часу від нанесення до дослідження; відсікання темних відблисків при проведенні сканування маркерів.

Дослідження проводились при різній висоті польоту: 3, 4 та 5 м над рівнем рослини та з урахуванням різної швидкості польоту: 6, 8 та 10 м/с. відповідні дані були обумовлені різною висотою рослин, рельєфу та конфігурації поля, розташуванням дротів електричних мереж.

Розроблена методика та проведені польові дослідження дали змогу зробити реальні рекомендації для сучасних агровиробників на предмет ефективності

використання БПЛА для внесення робочих розчинів та вибору ефективних режимів роботи.

Ключові слова: якість обприскування, безпілотний літальний апарат (БПЛА; UAV), робоча швидкість, висота над агрокультурою.

Постановка проблеми

Збереження врожаю агрокультур є головним завданням виробників продукції рослинництва впродовж усього періоду їх вирощування – від обробітку ґрунту до збирання. Одним із заходів збереження урожаю агро культур та його якості є проведення десикації посівів на заключному етапі їхнього вирощування. Завдяки такому заходу рослини підсушуються, що сприяє ефективнішому збиранню їхнього врожаю, позитивно впливає на зменшення забур'янення посівів, знижує перезволоження рослин за вологої погоди.

В останні кілька десятиліть внесення пестицидів в основному здійснювалося двома способами: наземним і повітряним [1]. Ефективність обприскування значною мірою залежить від якісного внесення препарату. Витрата робочого розчину має бути достатньою для повного змочування всієї поверхні культурних рослин. Щоб уникнути стікання препарату з обробленої поверхні, обприскування має бути дрібнокрапельним із нормою витрати робочого розчину за наземного застосування 250-400, за авіаційного внесення – 50-70 л/га та при використанні БПЛА – 4-5л/га. Зниження якості внесення засобів захисту рослин, а саме знесення крапель має вплив на навколишнє середовище, що може пошкодити чутливі рослини, вплинути на популяцію природних ворогів шкідників, зменшити популяції запилювачів, викликають забруднення навколишнього середовища, і загрожувати здоров'ю людей і тварин [2, 3, 4, 5, 6].

Обприскування – найпоширеніший спосіб нанесення на поверхню, що обробляється, пестициду у вигляді розчинів, емульсій та суспензій. Перевага його полягає в тому, що при малих витратах діючої речовини на одиницю площі можна забезпечити рівномірний розподіл рідини і покриття поверхні; при

додаванні до складу робочої рідини прилипачів забезпечується надійне утримання препарату на поверхні, що обробляється, а при додаванні синергістів – одержання синергічного ефекту.

Можна застосовувати суміші пестицидів одного або різного призначення. Ефективність обприскування певною мірою залежить від метеорологічних умов.

Таким чином, досліджуючи проведення внесення засобів захисту рослин безпілотними літальними апаратами, в якості головних факторів мають виступати якість обробки, ефективність, забезпечення основних функцій даної операції, дотримання агротехнічних вимог.

На основі моделей CHARM (Comprehensive Hierarchical Aeromechanics Rotorcraft Model) і AGDISP та обмежених польових і аеродинамічних досліджень, розмір крапель, [7, 8] швидкість вітру [9], швидкість польоту та висота випуску [10] визнані найважливішими факторами, що впливають на якість проведення обприскування.

Аналіз останніх досліджень

Щоб збирати високі й стабільні врожаї сільськогосподарських культур, потрібна сучасна ефективна техніка, яка б забезпечила вчасне і якісне виконання всіх операцій технологічного процесу виробництва сільськогосподарської продукції. Важливо при цьому мати найменші експлуатаційні витрати на використання техніки під час хімічного захисту посівів.

Науково обгрунтоване визначення складу комплексів машин і структури машинного парку в цілому, а також визначення методів їх ефективного використання є основним елементом діяльності працівників інженерно-технічної, агрономічної та економічної служб підприємств агропромислового комплексу України.

Кількість хімічних доглядів, їх якість і періодичність виконання залежать від властивостей та ефективності дії самих препаратів, кваліфікації працівників, природно-кліматичних чинників і досконалості засобів механізації для внесення пестицидів.

Одне з головних завдань, що стоїть перед спеціалістами агропромислового комплексу, полягає у визначенні для кожного господарства або машинно-технологічної станції такої мінімальної, але достатньої кількості машин і агрегатів для хімізації, яка забезпечить високу якість роботи та найдешевше їх використання в різних умовах експлуатації **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Обприскування використовується у багатьох технологіях вирощування сільськогосподарських культур, це захист від шкідників та хвороб, підживлення та боротьба з бур'янами.

Обприскувачі першими входять на поле та працюють до самої осені.

У системі застосування хімічних засобів захисту рослин вирішальне значення має не лише кількість робочого розчину, а й перш за все якість внесення,

екологічність і економічність, ефективність самого процесу застосування пестицидів.

Якість внесення робочої рідини визначається нормою витрати препарату, розміром краплин та густотою покриття ними оброблюваної поверхні й залежить не тільки від подібного функціонування робочого обладнання обприскувача правильного налагоджування цих машин та експлуатації. За останні 50 років підхід до внесення засобів захисту рослин (ЗЗР) на полі кардинально не змінився. Головними інструментами залишаються причіпні, самохідні та невеликі навісні обприскувачі. Мала авіація також застосовується. Проте її частка на ринку поступово зменшується. Натомість з'являються перші робочі проекти ультрамалооб'ємного внесення ЗЗР за допомогою БПЛА **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Сама операція внесення засобів захисту рослин нескладна. Це обробка рослин або ґрунту робочим розчином пестицидів. Проте неякісне внесення приводить до зниження врожайності, росту собівартості та загибелі посівів. Головна причина поганого внесення засобів захисту рослин – людський фактор. Особливо при роботі старими неавтоматизованими обприскувачами **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Якість внесення пестицидів залежить, в основному, від норми витрати робочої рідини, дисперсності розпилення, рівномірності обробки та ступеня осідання препарату на об'єкт обробки. Основними факторами впливу норми витрати робочої рідини на біологічну ефективність застосування пестицидів є утримання препарату на рослинах та ступінь покриття їхньої поверхні. Визначено критичну межу утримання рослинами рідини на обробленій поверхні, збільшення витрати розчину, що межу спричинює різке зниження ефективності використання пестицидів. Ця межа різна для окремих рослин, відповідних фаз їхнього розвитку і має відносно невелике значення. Для більшості зернових та просяних культур, критична норма витрати робочої рідини для оптимального утримання краплин на рослинах становить 350-400 л/га. З другого боку, норма витрати робочої рідини має бути достатньою для забезпечення потрібної густоти покриття рослин краплинами. Сама ж густина покриття залежить від норми витрати робочої рідини, дисперсності розпилення та ступеня осідання краплин. Своєю чергою, дисперсність розпилення впливає на осідання краплин на об'єкт обробки, ступінь покриття препаратом рослинної поверхні, утримання препарату на ній, проникнення в тканину (листова абсорбція) та на токсичність його для шкідливих організмів. Тому якісне розпилення робочої рідини краплинами оптимального розміру є основний фактор, що забезпечує ефективність обробки **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Мета досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень при використанні безпілотного літаючого

апарату для обприскування посівів є отримання показників якості внесення робочого розчину на поверхню рослини при різних робочих режимах внесення та диференційованій висоті польоту.

Результати досліджень

Методика проведення дослідів оцінки ефективності покриття рослини

Для початку проведення дослідження ми вибрали відповідні погодні обставини, наша температура повітря була 14°C, та вологість 51%, а швидкість вітру була 3м/с, цьому є підтвердження, які були взяті з показників мобільного пристрою (рис. 1).



Рис. 1. Метеорологічні показники для проведення дослідів.

Fig. 1. Meteorological indicators for experiments.

Щоб почати роботу БПЛА для проведення дослідів, потрібно зробити контур поля, для того, щоб БПЛА зміг побудувати собі маршрути для обприскування.

Для цього нам потрібно включити мобільний пристрій, який є модулем управління БПЛА (рис. 2).

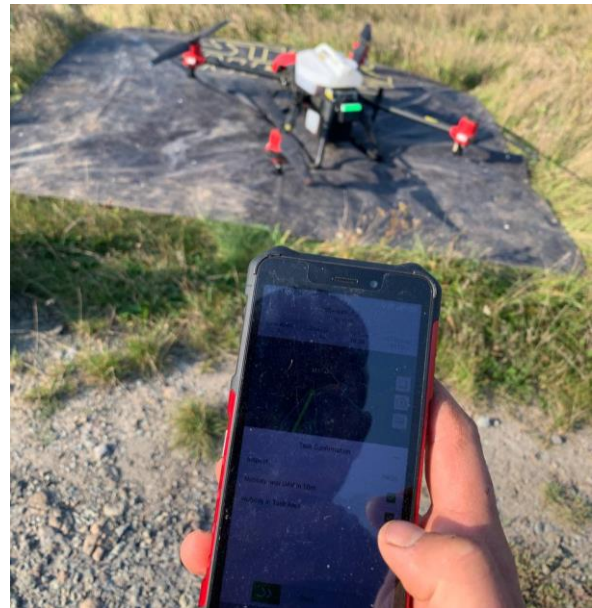


Рис. 2. Калібрування БПЛА мобільним пристроєм.

Fig. 2. Calibration of the UAV by a mobile device.

А потім зафіксувати RTK базу за допомогою триподу в одному місці (рис. 3).



Рис. 3. RTK база та трипод.

Fig. 3. RTK base and tripod.

За для того, щоб ми не мали погрішності в точності обприскування весь контур поля необхідно пройти за допомоги роверу, який фіксує край поля. Після заміру контура поля, ми його зберігаємо у хмарі, щоб зробити завдання для БПЛА та налаштувати параметри поля. Підготувати робочу суміш, якою буде обприскуватися рослина, та провести калібровку кожної форсунки, для точного розпилювання та задати розмір краплі (200 мікронів), якою буде здійснюватися обприскування в нашому дослідженні. (рис. 4).



Рис. 4. Приготування концентрату та підготовка БПЛА до вильоту.

Fig. 4. Preparation of concentrate and preparation of the UAV for departure.

Щоб побачити ефект нашого дослідження нами був приготований робочий розчин з фарбником червоного кольору та використано маркери, які ми розташовували на поверхні поля через кожні 35 см. Для цього ми застосували шість дерев'яних планок розміром (20x40 см) та довжиною 2 м кожна, а також лакмусовий папір формату А5 в кількості 125 шт, фіксувати наш лакмусовий папір за допомогою будівельного степлера, щоб наші папірці не здуло, коли БПЛА буде пролітати над ними (рис. 5).



Рис. 5. Розташування маркерів на поверхні поля.

Fig. 5. Location of markers on the field surface.

Після виконання підготовчої роботи ми запускали наш БПЛА, і першим наш виліт був за такими параметрами (швидкість 10 м/с та висотою 5 м), і ми з кожним нашим наступним вильотом змінювали наші лакмусові папірці та параметри, за для точності дослідження, а також визначення середньої площі покриття маркера.

Технічна характеристика об'єкту досліджень – ХАГ XPlanet. ХАГ XPlanet – оптимальне рішення для сільського господарства. Завдяки великій потужності БПЛА має можливість переносити до 20 л корисного навантаження, підвищує ефективність та економить

час. Участь пілота у процесі управління дуже мінімальна. А саме: складання польотного завдання, заміни акумуляторів та сумішей для БПЛА. Внесення та пілотування відбувається в автономному режимі, що унеможливає неточне внесення та подвійне перекриття.

Точна та ефективна доставка засобів захисту рослин.

RTK позиціонування з високою точністю. Позиціонування БПЛА у просторі виконується за допомогою оптичної та RTK систем, що дозволить отримати ще більшу точність від 5 до 2 см.

Розпорошення роторного типу, швидкість обертання до 16000 об/хв, регульований розмір крапель 85-550 мкм.

Управління обприскуванням із змінною швидкістю. Автоматичний контроль норм внесення у час, який залежить від швидкості польоту.

Оснащений надійним всебічно спрямованим цифровим радаром, цей БПЛА ефективно уникає перешкод при польотах. Завдяки вдосконаленій системі обприскування він бездоганно виконує роботи із захисту рослин.

Розумний резервуар для рідини. Вимірювання обсягу в реальному часі. Завдяки незліченним дослідженням та експериментам, інтелектуальний резервуар для рідини на 20 л розроблений для створення ідеального балансу між мобільністю та вантажопідйомністю.

Дані характеристики про ХАГ XPlanet, наведені в таблиці.

Таблиця 1. Характеристики ХАГ XPlanet.

Table 1. XAG XPlanet characteristics.

Продуктивність обприскування:	при	8-10 га/год.
Кількість форсунок:		4шт.
Ширина обробки при розсіві насіння та гранул:		2-5 метрів
Ширина обробки під час обприскування:		4-7 метрів
Ефективна висота обробки:		1,5-5 метрів
Швидкість польоту:		до 10 метрів за секунду
Тривалість польоту із навантаженням		10 хвилин
Управління через автопілот:		GPS, режим АВ
Вантажопідйомність, ємність бака:		20 кг/л (або 16 кг насіння, гранул)
Дальність керування польотом:		1000 м

Агротехнічні вимоги до машин для захисту рослин. Машини для захисту рослин мають відповідати вимогам санітарної гігієни, мати пристрої для промивання чистою водою в екстрених випадках, бути зручними в керуванні й безпечними в користуванні.

Під час передпосівної обробки насіння не повинно пошкоджуватися, а при термічному знезаражуванні знижуватися його схожість. Покриття насіння пестицидами має бути рівномірним, відхилення

фактичної дози від заданої допускається не більше ніж $\pm 3\%$.

Відповідно до зональних рекомендацій посіви потрібно обробляти у стислі агротехнічні терміни, а також дотримуватися вказівок служби хімічного захисту рослин.

Робоча рідина має бути однорідною, а відхилення концентрації від розрахункової не повинно перевищувати $\pm 5\%$.

Обприскувачі, обпилювачі та аерозольні генератори мають забезпечувати задану дисперсність розпили і рівномірний розподіл пестицидів на оброблюваній площі із заданою нормою. Допустима нерівномірність розподілу робочої рідини по ширині захвату не повинна перевищувати 30%, а по довжині гону – 25 %. Допустиме відхилення фактичної дози від заданої при обпиленні становить $\pm 15\%$, а при обприскуванні $+15$ і -20% . Швидкість вітру при обприскуванні має бути не більше ніж 5 м/с, при обпиленні 3 м/с. Обприскування не рекомендується проводити за температури навколишнього повітря понад 23°C та за наявності висхідних потоків повітря. Забороняється здійснювати обприскування під час дощу. Якщо протягом доби після обприскування пройшов дощ, то роблять повторне обприскування. Не рекомендується обприскувати рослини в період цвітіння.

Обробляючи рослини термомеханічними аерозолями, слід застосовувати лише ті хімічні препарати, які не втрачають своєї токсичності за високої температури.

Для захисту рослин у системі точного землеробства застосовують мобільні машини, які повинні мати відповідні пристрої для зміни норми внесення на ходу.

Методика аналізу і обробки поверхні маркера. Для аналізу отриманих під час польового дослідження результатів (рис. 6.) було використано програму ApFill. Варто зазначити, що параметром який використовувався при всіх досліджуваних варіантах і був незмінний – розмір краплини, який становив 200 мкм. Для кожного дослідного варіанту використовувались 12 листків паперу розміром A5, що закріплювались на 2 планках на відстані 35 см одна від одної. Задля отримання достовірних результатів по кожному з варіантів проводили статистичну обробку даних для отримання середнього результату.

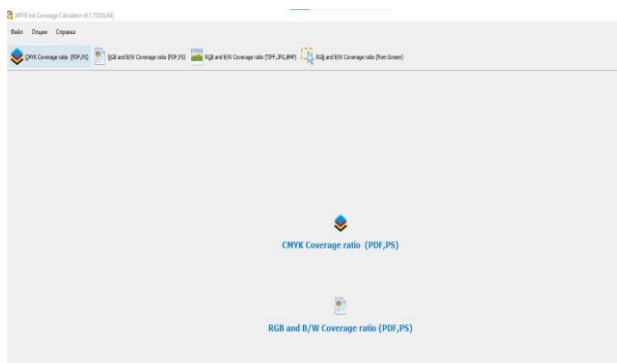


Рис. 6. Інтерфейс програми ApFill.
Fig. 6. ApFill interface

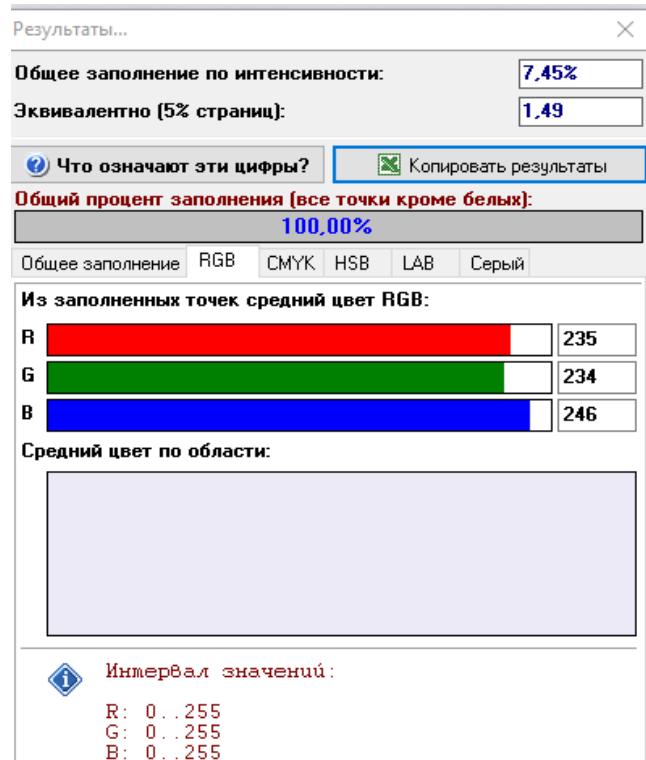


Рис. 7. Результати, що було отримані в результаті аналізу програмою ApFill.

Fig. 7. The results obtained from the analysis of the program ApFill.

Для проведення аналізу заповнення листка паперу краплинами було обрано функцію програми RGB and B/W Coverage ratio. Після чого по кожному листку з варіанту проводили аналіз (рис. 7) та записували до таблиць, що було створені у програмі MS Excel.

Методика проведення досліджень ефективності використання безпілотних летальних апаратів. Сучасні технології інформаційного середовища забезпечують умови здешевлення та спрощення отриманні результатів аналітичних досліджень результатів оцінювання роботи сучасних машинних агрегатів.

Швидкі результати дають можливість реагувати «на випередження».

При дослідження ефективності використання техніки основним є інструментарій, завдячуючи якому обґрунтовуються результати для подальшого аналізу і прийняття оптимальних рішень про машинні агрегати. Результати розрахунків отримані на основі проведення лабораторних досліджень, відповідають результатам польових хронометражних досліджень техніко-технологічних параметрів роботи машинних агрегатів в у реальних польових умовах. Використання комп'ютерної програми «Машинний агрегат» забезпечує отримання даних, які максимально наближені до реальних умов функціонування машинних агрегатів при виконанні механізованих технологічних операцій.

При виконанні механізованої технологічної операції внесення засобів захисту рослин за допомогою БПЛА істотний вплив на якість процесу мають умови роботи та робочі режими. Попередніми дослідженнями літературних джерел та, безпосередньо, власний практичний досвід,

наштовхнули на зміну швидкості та висоти проведення обприскування.

Порівняно з самохідними оприскувачами БПЛА, що проводить обприскування, працює з використанням лише робочого розчину, тому не потребує великої кількості води. Це супроводжується таким явищем як неповне покриття листової поверхні робочим розчином, що не впливає на якість проведеної операції. Оскільки бак на БПЛА має обсяг 25 л і ступінь покриття листової маси має низький відсоток, якість приготування робочого розчину та рівномірність його внесення має велике значення. Порушення балансу одного з параметрів в кінцевому результаті приведе до зниження врожаю.

Результати проведення польових досліджень представлено на рис. 3.8–3.19. Проведеними дослідженнями була встановлена залежність якості внесення робочого розчину у залежності від робочої швидкості та висоти. Першим варіантом стало вивчення ступеня покриття площі листової поверхні від швидкості БПЛА при висоті польоту 5 м (рис. 8). Швидкісний режим обмежувався техніко-технологічною характеристикою БПЛА.

З аналізу графіку 1 встановлено, що зі збільшенням робочої швидкості якість внесення робочого розчину знижується. Так, при зміні швидкості з 6 м/с до 8 м/с ступінь покриття знижується на 1,7%. При цьому при зміні швидкості з 8 м/с до 10 м/с покриття знижується на 8,6%.

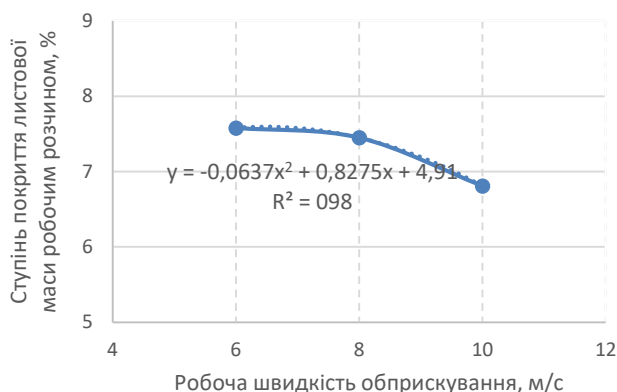


Рис. 8. Залежність покриття листової маси робочим розчином БПЛА від робочої швидкості на висоті 5 м.

Fig. 8. Dependence of leaf coating with working solution by UAV on working speed at a height of 5 m.

Встановлено, що залежність ступеню покриття листової маси робочим розчином від робочої швидкості обприскування при робочій висоті 5 м описується наступним рівнянням: $y = -0,0637x^2 + 0,8275x + 4,91$, при $R^2 = 0,98$.

Згідно методики визначення якості внесення робочого розчину було досліджено і рівномірність розподілення робочого розчину у відповідності з шириною захвату при висоті внесення 5 м та за визначених робочих швидкостей (рис. 9 – рис. 11).

Рівномірність розподілу робочого розчину по листовій масі – є одним з основних показників ефективності та конкурентоспроможності

використання БПЛА при обприскуванні полів. Оскільки БПЛА – малооб'ємні установки, для них якість внесення розчину і ступінь його доставки від форсунок до листа є критично важливими показниками.

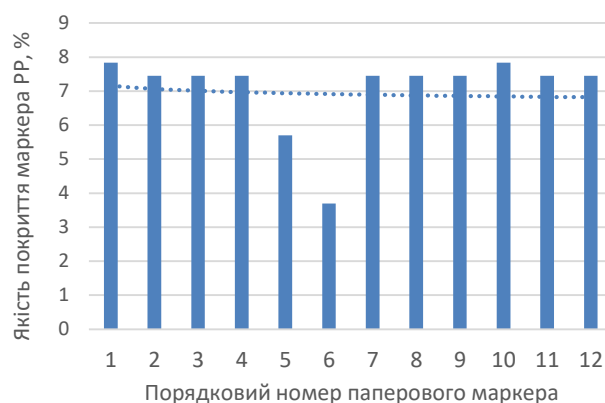


Рис. 9. Якість внесення робочого розчину при висоті 5 м, робочій швидкості 10 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 9. Quality of application of working solution at height of 5 m, working speed of 10 m/s and the established size of a drop of 200 μm.

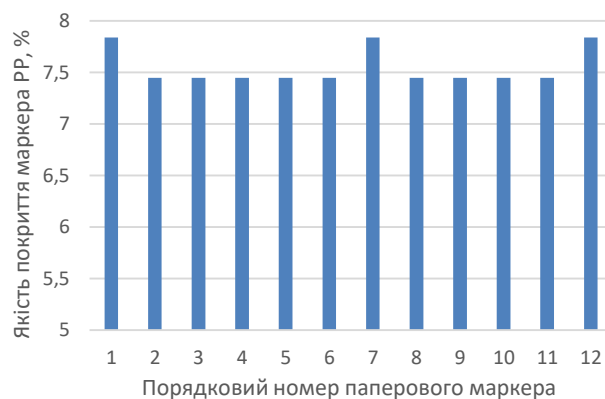


Рис. 10. Якість внесення робочого розчину при висоті 5 м, робочій швидкості 8 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 10. Quality of application of working solution at height of 5 m, working speed of 8 m/s and the established size of a drop of 200 μm.

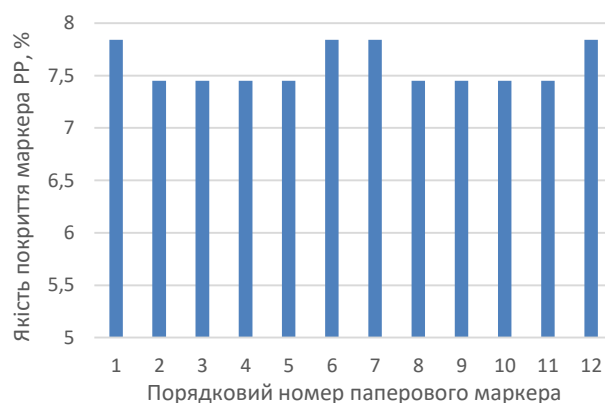


Рис. 11. Якість внесення робочого розчину при висоті 5 м, робочій швидкості 6 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 11. Quality of application of working solution at height of 5 m, working speed of 6 m/s and the established size of a drop of 200 μm .

Аналізом рис. 10, рис. 11 встановлено, що при швидкості 10 м/с виникає додаткова сила вітру, що не компенсується розміром краплі і лопаті БПЛА не в змозі задути робочий розчин на лист від цього розподіл стає нерівномірним. При швидкості 8 м/с показник рівномірності розподілення є оптимальним, серед дослідних зразків. При зниженні швидкості до 6 і нижче м/с виникають додаткові вітрові потоки, які знижують якість розподілення розчину по поверхні листа.

Таким чином, з урахуванням продуктивності внесення робочого розчину, оптимальний швидкісний режим знаходиться у межах 7,5 - 8,5 м/с для висоти 5 м.

Другим варіантом дослідження було вивчення ступеня покриття листової поверхні за висоти роботи БПЛА 4 м і тих же швидкостей (рис. 10).

Аналізом рис. 3.5 встановлено, що при зміні швидкості з 6 м/с до 8 м/с ступінь покриття знижується на 0,2%. При цьому при зміні швидкості з 8 м/с до 10 м/с покриття знижується на 1,1%.

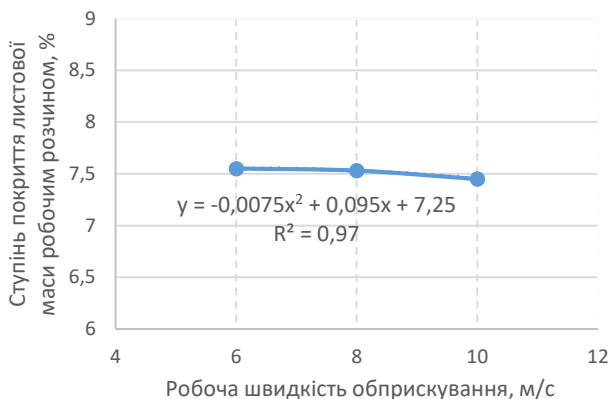


Рис. 10. Залежність покриття листової маси робочим розчином БПЛА від робочої швидкості на висоті 4 м.

Fig. 10. Dependence of leaf coating with working solution by UAV on working speed at a height of 4 m.



Рис. 11. Якість внесення робочого розчину при висоті 4 м, робочій швидкості 10 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 11. Quality of application of working solution at height of 4 m, working speed of 10 m/s and the established size of a drop of 200 μm .



Рис. 12. Якість внесення робочого розчину при висоті 4 м, робочій швидкості 8 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 12. Quality of application of working solution at height of 4 m, working speed of 8 m/s and the established size of a drop of 200 μm .

Встановлено, що залежність ступеню покриття листової маси робочим розчином від робочої швидкості обприскування при робочій висоті 4 м описується наступним рівнянням: $y = -0,0075x^2 + 0,095x + 7,25$, при $R^2 = 0,97$.

Відповідно, для більш детального вивчення також досліджувалась рівномірність розподілення робочого розчину у відповідності з шириною захвату при висоті внесення 4 м та за визначених робочих швидкостей (рис. 11 – рис. 13).



Рис. 13. Якість внесення робочого розчину при висоті 4 м, робочій швидкості 6 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 13. Quality of application of working solution at height of 4 m, working speed of 6 m/s and the established size of a drop of 200 μm .

Аналізом рис. 11 – рис. 13 встановлено, що за роботи БПЛА на висоті 4 м за досліджуваних швидкостей досягається оптимальне розподілення робочого розчину по поверхні листа. При цьому відхилення від середнього значення по покриттю

листової маси лише перевищує середній показник на 3,8%.

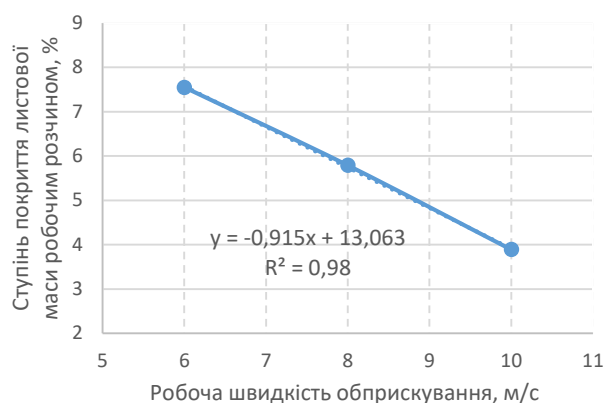


Рис. 14. Залежність покриття листової маси робочим розчином БПЛА від робочої швидкості на висоті 3 м.

Fig. 14. Dependence of leaf coating with working solution by UAV on working speed at a height of 3 m.

Таким чином, ступінь покриття листової маси позитивно корелює з досліджуваними робочими швидкостями та висотою роботи БПЛА 4 м. Найкращий показник покриття листової поверхні було відзначено за робочої швидкості 6 м/с, тоді як за швидкості 8 м/с показник покриття складав лише на 0,3% менше ніж у найкращого варіанта, а за швидкості 10 м/с – на 1,32 % менше.

Таким чином, за висоти роботи БПЛА 4 м різниця між швидкістю не має значного впливу на ступінь покриття листової поверхні робочим розчином.

Наступним варіантом дослідження стало вивчення ступеня покриття листової маси за робочої висоти 3 м та швидкостей 6 м/с, 8 м/с, 10 м/с (рис. 14).

Встановлено, що залежність ступеню покриття листової маси робочим розчином від робочої швидкості обприскування при робочій висоті 3 м описується наступним рівнянням: $y = -0,915x + 13,063$, при $R^2 = 0,98$.

Більш детальне відображення роботи БПЛА на робочій висоті 3 м відображено на рис. 15 – рис. 17.

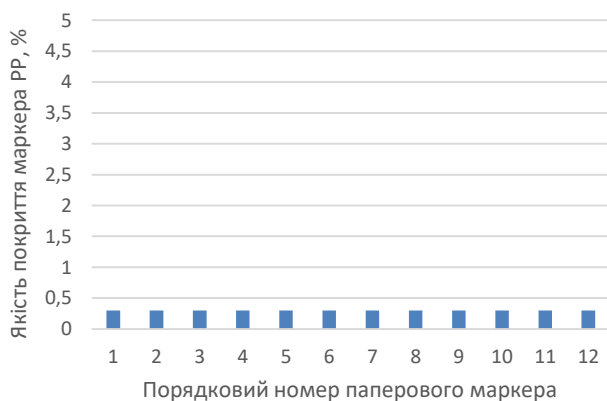


Рис. 15. Якість внесення робочого розчину при висоті 3 м, робочій швидкості 10 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм (найгірший варіант).

Fig. 15. Quality of application of working solution at height of 3 m, working speed of 10 m/s and the established size of a drop of 200 μ m.

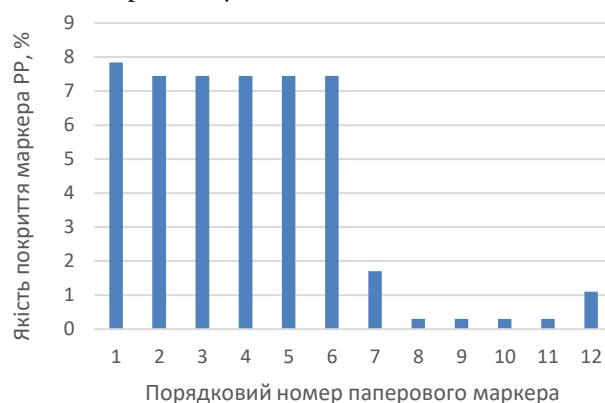


Рис. 16. Якість внесення робочого розчину при висоті 3 м, робочій швидкості 8 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 16. Quality of application of working solution at height of 3 m, working speed of 8 m/s and the established size of a drop of 200 μ m.

Аналізом рис. 15 – 18 встановлено, що низький ступінь покриття листа на графіку (рис. 17) при висоті 3 м та швидкості 10 м/с характерний для слабких поривів вітру, що є характерним для зони лісостепу України. Графік для швидкості 8 м/с у своїй правій частині показує, що пориви вітру можуть впливати навіть на невеличку полосу (у нашому випадку половину ширини захвату). Дані графіки вказують на те, що обприскування БПЛА слід проводити у безвітряну погоду на середніх швидкостях.

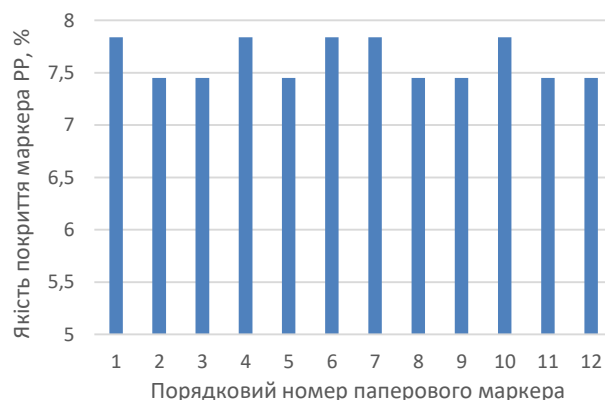


Рис. 17. Якість внесення робочого розчину при висоті 3 м, робочій швидкості 6 м/с та встановленому розміру краплі 200 мкм.

Fig. 17. Quality of application of working solution at height of 3 m, working speed of 6 m/s and the established size of a drop of 200 μ m.

З загального графіку роботи БПЛА на висоті 3 м (рис. 17) чітко видно, що ступінь покриття рослин прямо пропорційно залежить від робочої швидкості БПЛА. Найкращий результат було зафіксовано за швидкості 6 м/с при цьому ступінь покриття листової маси перевищив показник за швидкості 8 м/с на 23,3%. Тоді як покриття листової поверхні за швидкості 10 м/с було меншим за всі варіанти і становило в

середньому по трьох повтореннях 3,89% покриття листової поверхні, що порівняно з найкращим варіантом було меншим на 48,5%.

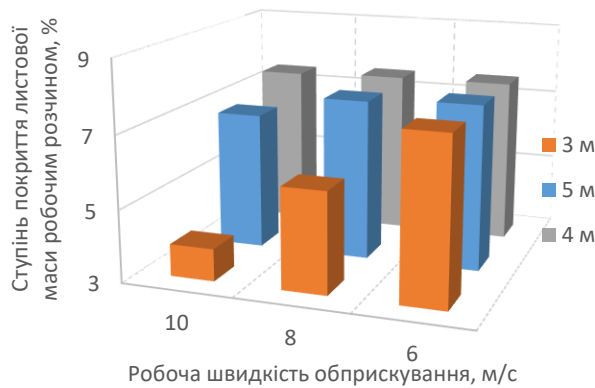


Рис. 18. Залежність покриття листової маси робочим розчином БПЛА від робочої швидкості за різних робочих швидкостей.

Fig. 18. Dependence of sheet mass coating with working solution by UAV on working speed at different working speeds.

Таким чином з урахуванням внесення робочого розчину, оптимальною швидкістю за обробки посіву хімікатами на висоті 3 м безперечно потрібно обирати швидкість не більшу ніж 6,5 м/с. Оскільки, покриття листової поверхні за більшої швидкості відчутно знижується.

Проведеними дослідженнями встановлено, що і швидкість польоту і висота мають суттєвий вплив на якість, при цьому слід зауважити, що існують конкретні залежності впливу робочих режимів на якість (рис. 18).

На рис. 18 наведено загальні показники залежності покриття листової поверхні за різних висот і робочих швидкостей роботи БПЛА. З отриманих даних, можна зробити висновок, що найбільш стабільні показники були отримані за висоти роботи БПЛА 4 м. Тоді як під час роботи БПЛА на висоті 5 і 3 метри показники покриття листової маси робочим розчином спадали відповідно збільшенню робочої швидкості. Так, найменшим середнім показником, що було отримано – 3,89% (рис. 14) покриття поверхні листа. Тоді як найбільший середній показник 7,55%.



Рис. 19. Ступінь заповнення площі поверхні досліджуваного листка з малою ступеню покриття.

Fig. 19. The degree of filling of the surface area of the studied leaf coating with a min degree of coverage.



Рис. 20. Ступінь заповнення площі поверхні досліджуваного листка з найбільшою ступеню покриття.

Fig. 20. The degree of filling of the surface area of the studied leaf coating with a max degree of coverage.

Отримані дані мають безпосередньо практичну важливість. По-перше, мета роботи була розглянути можливість збільшення продуктивності за рахунок підвищення робочої швидкості з 8 м/с до 10 м/с. По друге, при проведенні обприскування полів істотний вплив на ефективність проведення технологічної операції має висота. Показник висоти обприскування розглянуто у контексті рельєфу полів та вертикальних і горизонтальних перешкод.

Дослідженнями було встановлено, що для сучасних БПЛА з встановленим обладнанням оптимальний швидкісний режим знаходиться у межах 7,5-8,5 м/с. При цьому оптимальна висота обприскування знаходиться у межах 4,5-5 м.

Важливим показником нанесення робочої рідини БПЛА є не лише ступінь покриття листової поверхні, а й розмір краплини, яка потрапляє на листок. На рис. 19–20 приведені результати досліджень зміни розміру краплі, яка потрапляє на листок у залежності від робочої швидкості та висоти.

Висновки

1. При виконанні механізованої технологічної операції внесення засобів захисту рослин за допомогою безпілотного летального апарату (БПЛА) істотний вплив на якість процесу мають умови роботи та робочі режими.

2. Проведеним дослідженням встановлено, що зі збільшенням робочої швидкості якість внесення робочого розчину знижується. Так, для висоти 5 м при зміні швидкості з 6 м/с до 8 м/с ступінь покриття знижується на 1,7%. При цьому при зміні швидкості з 8 м/с до 10 м/с покриття знижується на 8,6%.

Таким чином, з урахуванням продуктивності внесення робочого розчину, оптимальний швидкісний режим знаходиться у межах 7,5 – 8,5 м/с для висоти 5 м.

3. Ступінь покриття листової маси позитивно корелює з досліджуваними робочими швидкостями та висотою роботи БПЛА 4 м. Найкращий показник покриття листової поверхні було відзначено за робочої швидкості 6 м/с, тоді як за швидкості 8 м/с показник покриття складав лише на 0,3% менше ніж у найкращого варіанта, а за швидкості 10 м/с – на 1,32 % менше.

4. Доведено, що ступінь покриття рослин прямо пропорційно залежить від робочої швидкості БПЛА. Найкращий результат для висоти 3 м було зафіксовано за швидкості 6 м/с при цьому ступінь покриття листової маси перевищив показник за швидкості 8 м/с на 23,3%. Тоді як покриття листової поверхні за швидкості 10 м/с було меншим за всі варіанти і становило в середньому по трьох повтореннях 3,89% покриття листової поверхні, що порівняно з найкращим варіантом було меншим на 48,5%.

Таким чином з урахуванням внесення робочого розчину, оптимальною швидкістю за обробки посіву хімікатами на висоті 3 м безперечно потрібно обирати швидкість не більшу ніж 6,5 м/с. Оскільки, покриття листової поверхні за більшої швидкості відчутно знижується.

5. Найбільш стабільні показники були отримані за висоти роботи БПЛА 4 м. Тоді як під час роботи БПЛА на висоті 5 і 3 метри показники покриття листової маси робочим розчином спадали відповідно збільшенню робочої швидкості. Так, найменшим середнім показником, що було отримано – 3,89% покриття поверхні листа. Тоді як найбільший середній показник 7,55%.

6. Отримані дані мають безпосередньо практичну важливість. Дослідженнями було встановлено, що для сучасних БПЛА з встановленим обладнанням оптимальний швидкісний режим знаходиться у межах 7,5-8,5 м/с. При цьому оптимальна висота обприскування знаходиться у межах 4,5-5 м.

7. Важливим показником нанесення робочої рідини БПЛА є не лише ступінь покриття листової поверхні, а й розмір краплини, яка потрапляє на листок. Отримані результати досліджень зміни розміру краплі, яка потрапляє на листок у залежності від робочої швидкості та висоти, що забезпечить ефективність використання БПЛА для обприскування при зміні погодних умов.

Список літератури

1. *Faiçal B. S., Freitas H., Gomes P.H., Mano L.Y., Pessin G., Carvalho A. C. d., Krishnamachari B., Ueyama J.* An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Comput. Electron. Agric.* 2017. Vol. 138. 210-223. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.011.
2. *Torrent X., Gregorio E., Douzals J.P., Tinet C., Rosell-Polo J.R., Planas S.* Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: part 1. Classification using indirect methods. *Sci. Total Environ.* 2019. №692. P. 1322-1333. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.121.
3. *Torrent X., Gregorio E., Rosell-Polo J.R., Arnó J., Peris M., van de Zande J.C., Planas S.* Determination of spray drift and buffer zones in 3D crops using the ISO standard and new LiDAR methodologies. *Sci. Total Environ.* 2020. 136666. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136666.
4. *Langkamp-Wedde T., Rautmann D., von Hörsten D., Wegener J.K.* Comparison of the drift potential of two application methods for the control of oak processionary moths with biocidal products in an oak avenue. *Sci. Total Environ.* 2020. №704. 135313. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135313.
5. *Gregorio E., Torrent X., Planas S., Rosell-Polo J.R.* Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: part 2. LiDAR technique. *Sci. Total Environ.* 2019. №687. P. 967-977. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.151.
6. *Brain R., Goodwin G., Abi-Akar F., Lee B., Rodgers C., Flatt B., Lynn A., Kruger G., Perkins D.* Winds of change, developing a non-target plant bioassay employing field-based pesticide drift exposure: a case study with atrazine. *Sci. Total Environ.* 2019. №678. P. 239-252. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.411.
7. *Balsari P., Gil E., Marucco P., Zande J.C.v.d., Nuytens D., Herbst A., Gallart M.* Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench, effects of boom height and nozzle type. *Biosyst. Eng.* 2017. №154. P. 3-13. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015.
8. *Guler H., Zhu H., Ozkan H.E., Derksen R.C., Yu Y., Krause C.R.* Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles. *Trans. ASABE* 2007. Vol. 50. P. 745-754. doi: 10.13031/2013.23129.
9. *Nuytens B.D., Schamphelre M.D., Steurbaut W., Baetens K., Verboven P., Nicolai B., Ramon H., Sonck B.* Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, part 1, meteorological conditions. *Asp. Appl. Biol.* 77 (2).
10. *Teske M., Wachspress D.A., Thistle H.W.* Prediction of aerial spray release from UAVs. *Trans. ASABE.* 2018. №61. P. 909-918. doi: 10.13031/trans.12701.
11. *Rogovskii I. L.* Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research.* Kyiv. Ukraine. 2021. Vol. 12. No 1. P. 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.
12. *Бєленков А., Шуберанський В.* Як підвищити ефективність внесення засобів захисту рослин? *Smart Farming.* 2021: веб-сайт URL: <https://www.smartfarming.ua/yak-pidvyshchyty-efektyvnist-vnesennya-zasobiv-zakhystu-roslyn/> (Дата звернення 02.06.2021).
13. *Гусаренко М. П.* Підвищення ефективності та екологічності роботи обприскувача. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2019. Вип. 199. «Механізація сільськогосподарського виробництва». С. 187-191.
14. *Ратушний В., П'ятаченко В., Панасюк В.* Правильний обприскувач ефективний захист! Пропозиція. 2013: веб-сайт URL:

<https://propozitsiya.com/ua/pravilny-obpriskuvach-efektivniy-zahist> (Дата звернення 02.06.2021).

References

1. *Faiçal B. S., Freitas H., Gomes P.H., Mano L.Y., Pessin G., Carvalho A. C. d., Krishnamachari B., Ueyama J.* (2017). An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Comput. Electron. Agric.* 138. 210-223. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.011.
2. *Torrent X., Gregorio E., Douzals J.P., Tinet C., Rosell-Polo J.R., Planas S.* (2019). Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: part 1. Classification using indirect methods. *Sci. Total Environ.* 692. 1322-1333. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.121.
3. *Torrent X., Gregorio E., Rosell-Polo J.R., Arnó J., Peris M., van de Zande J.C., Planas S.* (2020). Determination of spray drift and buffer zones in 3D crops using the ISO standard and new LiDAR methodologies. *Sci. Total Environ.* 136666. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136666.
4. *Langkamp-Wedde T., Rautmann D., von Hörsten D., Wegener J. K.* (2020). Comparison of the drift potential of two application methods for the control of oak processionary moths with biocidal products in an oak avenue. *Sci. Total Environ.* 704. 135313. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135313.
5. *Gregorio E., Torrent X., Planas S., Rosell-Polo J.R.* (2019). Assessment of spray drift potential reduction for hollow-cone nozzles: part 2. LiDAR technique. *Sci. Total Environ.* 687. 967-977. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.151.
6. *Brain R., Goodwin G., Abi-Akar F., Lee B., Rodgers C., Flatt B., Lynn A., Kruger G., Perkins D.* (2019). Winds of change, developing a non-target plant bioassay employing field-based pesticide drift exposure: a case study with atrazine. *Sci. Total Environ.* 678. 239-252. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.411.
7. *Balsari P., Gil E., Marucco P., Zande J.C.v.d., Nuytens D., Herbst A., Gallart M.* (2017). Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench, effects of boom height and nozzle type. *Biosyst. Eng.* 154. 3-13. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.015.
8. *Guler H., Zhu H., Ozkan H. E., Derksen R. C., Yu Y., Krause C. R.* (2013). Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles. *Trans. ASABE* 2007. 50. 745-754. doi: 10.13031/2013.23129.
9. *Nuytens B. D., Schampheleire M. D., Steurbaut W., Baetens K., Verboven P., Nicolai B., Ramon H., Sonck B.* (2021). Experimental study of factors influencing the risk of drift from field sprayers, part 1, meteorological conditions. *Asp. Appl. Biol.* 77 (2).
10. *Teske M., Wachspress D. A., Thistle H. W.* (2018). Prediction of aerial spray release from UAVs. *Trans. ASABE* 61. 909-918. doi: 10.13031/trans.12701.
11. *Rogovskii I. L.* (2021). Models of formation of engineering management alternatives in methods of increasing grain production in agricultural enterprises. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research.* Kyiv. Ukraine. 12(1). 137-146. <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2021.01.137>.
12. *Belenkov A., Shuberansky V.* (2021). How to increase the effectiveness of plant protection products? *Smart Farming.* 2021: website URL: <https://www.smartfarming.ua/yak-pidvyshchyty-efektyvnist-vnesennya-zasobiv-zakhystu-roslyn/> (accessed 02.06.2021).
13. *Gusarenko M. P.* (2019). Improving the efficiency and environmental friendliness of the sprayer. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture.* 199. Mechanization of agricultural production. 187-191.
14. *Ratushny V., Pyatachenko V., Panasyuk V.* (2013). The right sprayer - effective protection! *Propozytsiia.* website URL: <https://propozitsiya.com/ua/pravilny-obpriskuvach-efektivniy-zahist> (Access date 02.06.2021).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛЕТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРИ ВИРАЩУВАННІ АГРОКУЛЬТУР

В. Н. Зубко

Анотація. Сучасне аграрне виробництво направлено на отримання максимальної урожайності при вирощуванні продукції рослинництва. Генетика створює сорти і гібриди, максимально реалізуючі свій біологічний потенціал в відповідності з умовами вирощування. Однак актуальною задачею є забезпечення технології, а саме потреб рослин в відповідних фазах росту і розвитку в найкоротші терміни.

Нинішні розробки, в тому числі і для агропромисловості, наводили ринок цифрових технологій і засобів механізації. Для ефективного агроінжинірингу потрібна сучасна база комплексних прикладних досліджень ефективності використання новітніх розробок в сучасних виробничих умовах. Слід зауважити, що кожна розробка буде показувати різну ефективність, а саме різні показники якості в різних виробничих умовах.

Ефективність проведення польових досліджень з використанням безпілотного летального апарату (БПЛА) XAG XPlanet на чотирьох вентиляторах проводилось в Сумському регіоні на дослідницьких полях Сумського національного аграрного університету. Унікальність досліджень полягалася в тому, що розроблена методика з залученням спеціалістів агроінжинірингового і агрономічного напрямків і спеціалістів в області фізики для визначення ступеня покриття листя робочим розчином саме при його «задавленні» лопатями БПЛА; використана методика диджиталізації маркерів за допомогою визначення кольору робочого розчину з урахуванням його яркості в залежності від проміжку часу від нанесення до дослідження; відсічення темних блоків при проведенні сканування маркерів.

Дослідження проводились при різній висоті польоту: 3, 4 і 5 м над рівнем рослини і з урахуванням

разной скорости полета: 6, 8 и 10 м/с. Соответствующие данные были обусловлены разной высотой растений, рельефа и конфигурации поля, расположением проводов электрических сетей.

Разработанная методика и проведенные полевые исследования позволили подготовить реальные рекомендации для современных агропроизводителей в направлении эффективности использования БПЛА для внесения рабочих растворов и выбора эффективных режимов работы.

Ключевые слова: качество опрыскивания, беспилотные летательные аппараты (БПЛА; UAV), рабочая скорость, высота над агрокультурой.

Key words: quality of spraying, unmanned aerial vehicles (UAV; UAV), operating speed, height above the crop.

В. М. Зубко ORCID 0000-0002-2426-2772.

EXPERIMENTAL EFFICIENCY STUDIES USE OF UNMANNED AIRCRAFT IN CULTIVATION OF AGRICULTURAL CULTURES

V. M. Zubko

Abstract. Modern agricultural production is aimed at obtaining the maximum yield when growing crop products. Genetics creates varieties and hybrids that maximize their biological potential in accordance with growing conditions. However, the urgent task is to provide technology, namely the needs of plants in the appropriate phases of growth and development in the shortest possible time.

Current developments, including those for agricultural production, have flooded the market for digital technologies and mechanization tools. Effective agroengineering requires a modern base of complex applied research on the effectiveness of using the latest developments in modern production conditions. It should be noted that each development will show different efficiency, namely different quality indicators in different production conditions.

The effectiveness of field research using an unmanned aerial vehicle (UAV) XAG XPlanet for four fans was carried out in the Sumy region on the research fields of the Sumy National Agrarian University. The uniqueness of the research was that a method was developed with the involvement of specialists in agroengineering and agronomic fields and specialists in the field of physics to determine the degree of coverage of a sheet with a working solution precisely when it is "crushed" by the UAV blades; the technique of digitalization of markers was used by determining the color of the working solution, taking into account the change in its brightness depending on the time interval from application to research; clipping dark highlights when scanning markers.

The studies were carried out at different flight heights: 3, 4 and 5 m above the plant level and taking into account different flight speeds: 6, 8 and 10 m s⁻¹. The corresponding data were due to different plant heights, relief and configuration of the field, the location of the wires of electrical networks.

The developed methodology and the conducted field studies made it possible to prepare real recommendations for modern agricultural producers in the direction of the efficiency of using UAV for introducing working solutions and choosing effective operating modes.