

УДК 656.7.085:657.71(045)

М. П. Матійчик, канд. техн. наук, доц.
Г. М. Михайлов, асп.
Г. М. Юн, д-р. техн. наук, проф.

ОБГРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

НАУ, Інститут економіки та менеджменту, yun@nau.edu.ua

На підставі проведених розрахунків та експериментальних досліджень встановлено баланси мас частин безпілотного літального апарата та його експлуатаційні характеристики на прикладі технологічного процесу біологічного захисту рослин.

On the basis of calculations and experimental researches weight balances of the UAV main parts and also operational characteristics on an example of entering the protective substance – trihogramma are found out.

Вступ

За останні десятиліття стрімкими темпами став розвиватися новий напрям авіації – комплекси на основі безпілотних літальних апаратів (БЛА). Серед перспективних технологій, де вони можуть бути застосовані, можна назвати механізований захист рослин біологічними препаратами, зокрема трихограмою. Ця технологія полягає у внесенні (розселенні) на пошкоджені посіви природного ворога шкідників – трихограми. Такий процес досить критичний, оскільки потребує внесення малих кількостей трихограми (від 1,25 до 13 г/га) у стислі агротехнічні терміни та з певними якісними показниками.

В основу роботи покладено результати досліджень ефективності внесення трихограми за допомогою розробленого БЛА крилатого типу нормальної аеродинамічної схеми у комплексі з бортовим технологічним обладнанням.

Актуальність роботи обумовлено потребою поширення екологічно чистих технологій вирощування сільськогосподарських культур та підвищення ефективності захисту рослин у цілому.

Проект передбачав розроблення спеціалізованого дозувального пристрою та БЛА як носія цього пристрою.

До БЛА поставлено такі вимоги: він повинен бути крилатого типу з рушієм у вигляді повітряного гвинта та поршневым двигуном (ПД) з питомою витратою палива 2,040 кг·кВт/год; піднімати у повітря масу корисного навантаження, яка складається з мас дозатора, робочих органів, трихограми та приводу дозатора; з метою найбільш ефективного використання трихограми тривалість польоту на одній заправці не повинна перевищувати 2 год; ПД має забезпечити енергоозброєність БЛА в межах 0,25 кВт/кг для роботи в повітрі в непілотажному режимі.

Розрахунок характеристик

Основоположним параметром БЛА є його злітна маса m_0 , яка складається з мас окремих його частин [5]:

$$m_0 = m_{кр} + m_{оф} + m_{оп} + m_{СУ} + m_{ш} + m_{кер} + m_{об} + m_{п} + m_{кн}, \quad (1)$$

де $m_{кр}$ – маса крила; $m_{оп}$ – маса оперення; $m_{ф}$ – маса фюзеляжу; $m_{СУ}$ – маса силової установки (СУ); $m_{ш}$ – маса шасі; $m_{кер}$ – маса керування; $m_{об}$ – маса обладнання; $m_{п}$ – маса палива; $m_{кн}$ – маса корисного навантаження.

Оскільки на борту БЛА відсутній екіпаж, у співвідношенні (1) немає доданків, які це враховують.

Розрахунок m_0 БЛА проводили за допомогою методу послідовних наближень. Для цього у співвідношення (1) внесли у вигляді рівняння існування ЛА, поділивши для нього всі його члени на злітну масу m_0 :

$$1 = \bar{m}_{кр} + \bar{m}_{ф} + \bar{m}_{оп} + \bar{m}_{СУ} + \bar{m}_{ш} + \bar{m}_{кер} + \bar{m}_{об} + \bar{m}_{п} + \bar{m}_{кн};$$

Відносні маси частин ЛА вибирали, користуючись статистичними даними, які звели у табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Відносні маси частин пілотованих ЛА

Відносні маси частин ЛА	Тип і призначення ЛА		
	Мото-планери	Навчальні	Пілотажні
$\bar{m}_{кр}$	0,22–0,25	0,16–0,20	0,14–0,16
$\bar{m}_{ф}$	0,14–0,17	0,14–0,20	0,12–0,13
$\bar{m}_{оп}$	0,04–0,05	0,04	0,04
$\bar{m}_{СУ}$	0,08–0,10	0,10–0,15	0,18–0,20
$\bar{m}_{ш}$	0,05–0,06	0,06–0,08	0,06
$\bar{m}_{кер}$	0,03–0,04	0,05–0,10	0,04–0,05

Таблиця 2
Відносні маси частин БЛА – мотопланера
(авіамоделі)

Позначення	$\bar{m}_{кр}$	$\bar{m}_{ф}$	$\bar{m}_{оп}$	$\bar{m}_{СУ}$
Відносна маса	0,25–0,27	0,15–0,18	0,04–0,05	0,07–0,1

Відносну масу палива розраховали за формулою

$$\bar{m}_п = R t_{пол} \bar{m}_{СУ}, \quad (2)$$

де $\bar{m}_{СУ}$ – відносна маса силової установки (СУ); $t_{пол}$ – час польоту; R – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт пропорційності R тісно пов'язаний з питомою витратою палива двигуном БЛА. З урахуванням цього, а також статистичних даних припускаємо, що $R = 2,0$. Тоді формула (2) набуде вигляду

$$\bar{m}_п = 2,0 t_{пол} \bar{m}_{СУ}. \quad (3)$$

Величини $m_{кер}$, $m_{об}$ коливаються в дуже широких межах. Тому при розрахунку скористалися абсолютними масовими показниками серійної апаратури керування і її джерела живлення [5].

Після визначення відносних мас усіх частин БЛА, можна визначити відносну масу корисного навантаження:

$$\bar{m}_{к.н} = 1 - \bar{m}_{кр} - \bar{m}_{ф} - \bar{m}_{оп} - \bar{m}_{СУ} - \bar{m}_{кер}.$$

Отримавши масу корисного навантаження, а також масові показники $m_{кер}$, визначаємо злітну масу БЛА за формулою

$$m_0 = \frac{\bar{m}_{к.н} + m_{кер}}{1 - \bar{m}_{кр} - \bar{m}_{ф} - \bar{m}_{оп} - \bar{m}_{СУ} - \bar{m}_п}. \quad (4)$$

Оскільки

$$m_{к.н} = m_{доз} + n_{р.ор} m_{р.ор} + m_{ак.б} + m_{бт}$$

та

$$m_{кер} = n_{сп} m_{сп} + m_{пр} + m_{аб},$$

де $m_{доз}$ – маса дозатора;

$m_{р.ор}$ – маса одного робочого органа;

$m_{ак.б}$ – маса акумуляторних батарей;

$m_{сп}$ – маса одного сервопривода;

$m_{пр}$ – маса приймача;

$m_{бт}$ – маса трихограми;

$n_{р.ор}$ – кількість робочих органів;

$n_{сп}$ – кількість сервоприводів,

то $m_{кн} + m_{кер} = 1,850$ кг.

Тоді згідно з рівнянням (3) відносна маса палива $\bar{m}_п = 2,0 \cdot 2 \cdot 0,07 = 0,28$.

Використовуючи співвідношення (4), визначаємо злітну масу БЛА у першому наближенні:

$$m_j^I = \frac{1,85}{1 - 0,22 - 0,15 - 0,05 - 0,07 - 0,28} = 8,04 \text{ кг.}$$

Для визначення злітної маси БЛА у другому наближенні використано методику А. Ареп'єва [1]. З розроблених ним номограм були розраховані коефіцієнти регресії для величин:

$$\bar{m}_{кр} = 0,06 + 0,166 m_0^I;$$

$$\bar{m}_{ф} = 0,06 + 0,166 m_0^I;$$

$$\bar{m}_{оп} = 0,3 m_{кр}.$$

Звідси

$$m_{кр} = 1,395 \text{ кг}; \quad m_{ф} = 1,478 \text{ кг}; \quad m_{оп} = 0,419 \text{ кг}.$$

Згідно з вимогою забезпечити енергоозбросність БЛА 0,25 кВт/кг потрібну потужність двигуна можна знайти із співвідношення

$$N_{пот} = m_0^I N_{пит} = 2,001 \text{ кВт}. \quad (5)$$

Серед серійних ПД таку потужність має двигун робочим об'ємом 10–12 см³ та власною масою близько 0,50 кг.

Тоді $m_{СУ}$ із врахуванням маси двигуна, повітряного гвинта та карбюратора буде дорівнювати:

$$m_{СУ} = 0,58 \text{ кг}.$$

Час польоту БЛА вибираємо з розрахунку, що пілотування проходить в умовах оптичної видимості, тобто за один політ обробляється ділянка розмірами 900×450 м ($S_{об} = 40,5$ га). Припустивши за результатами попередніх розрахунків, що продуктивність БЛА $W_p = 57,2$ га/год, можна визначити час польоту:

$$t_{пол} = \frac{S_{об}}{W_p} = \frac{40,5}{57,2} = 0,7 \text{ год}.$$

Тоді маса палива з урахуванням $t_{пол}$, питомої витрати палива двигуном та потужності становить:

$$m_п = t_{пол} Q_{пит} N_{дв} = 2,856 \text{ кг}.$$

Звідси злітна маса у другому наближенні

$$m_0^{II} = m_{кр} + m_{ф} + m_{оп} + m_{кер} + m_{СУ} + m_п = 8,518 \text{ кг}.$$

Отже, визначивши у другому наближенні злітну масу БЛА і виходячи з поставлених до нього вимог, можемо виконувати його компонентний розрахунок. Загальний вигляд розробленого БЛА показано на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд розробленого зразка БЛА

Результати досліджень

З метою визначення продуктивності БЛА і таких характеристик процесу, як ширина захвату та нерівномірність внесення трихограми проводили польові дослідження. Вони полягали у виконанні послідовних проходів БЛА над дослідними ємкостями, розміщеними у певному порядку на експериментальній ділянці поля.

Дослідження проводили на рівній ґрунтовій ділянці у літній період у передранкову пору доби за температури повітря $t_{\text{пов}} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$, швидкості вітру 0,5–1,0 м/с та відносної вологості 70 %. Тим самим намагались звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів на результати дослідів. Робочу швидкість БЛА встановлювали рівною розрахунковій $Q_{\text{роб}} = Q_{\text{розр}} = 95 \text{ км/год}$.

Дослідження проводили на робочих висотах 6 та 3 м. Робочі органи були змонтовані на кінцях крил. Віддаль між осями робочих органів становила 3,44 м. Для визначення ширини захвату B та нерівномірності розселення на поверхні ґрунту розмістили 21 ємкість розмірами $1 \times 1 \times 0,05 \text{ м}$ за схемою: три поперечні ряди по 7 з віддаллю між сусідніми рядами 10 м (рис. 2).

Фактичну ширину захвату встановлювали за наявністю у дослідних ємкостях частинок трихограми: найбільшу відстань між ємкостями, у яких її не зафіксували, вважали фактичною шириною захвату і позначали через $B_{\text{ф}}$.

Згідно з технологією механізованого внесення трихограми відроджена особина має пошукову здатність, тобто може самостійно пересуватись від точки падіння на ґрунт у радіусі $R_{\text{пош}}$ близько 1 м. Таким чином $B_{\text{ф}}$ по суті збільшується на 2 радіуси пошуку. Тому остаточно за критерій оцінки ширини захвату БЛА брали ефекти-

вну ширину захвату $B_{\text{еф}}$, яка складається з отриманої експериментальним шляхом фактичної ширини захвату, та подвійного радіуса пошуку трихограми $R_{\text{пош}}$, тобто $B_{\text{еф}} = B_{\text{ф}} + 2 R_{\text{пош}}$, де $B_{\text{ф}}$ – фактична ширина захвату БЛА, м; 2 – постійна, яка враховує пошукову здатність трихограми.

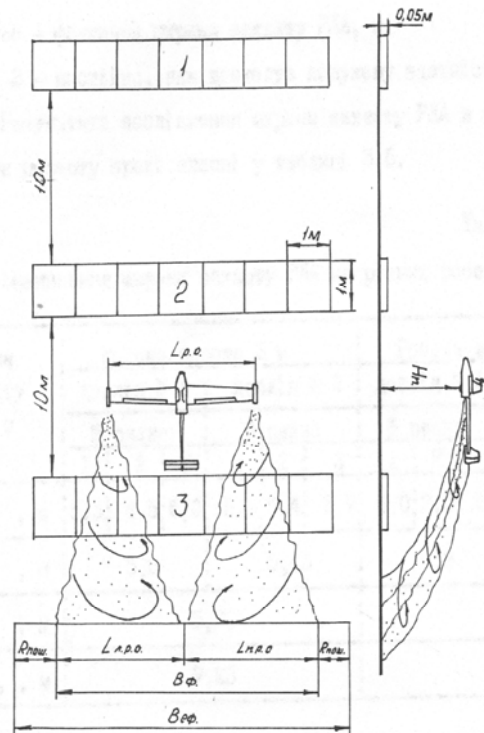


Рис. 2. Схема проведення польового дослідження

Результати дослідження ширини захвату БЛА залежно від висоти польоту наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Визначення ширини захвату БЛА на різних робочих висотах

Ширина захвату БЛА, м	Робоча висота 3 м						Робоча висота 6 м					
	Дослід 1			Дослід 2			Дослід 1			Дослід 2		
	Номер рядка			Номер рядка			Номер рядка			Номер рядка		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$B_{\text{ф}i}$	5,5	4,5	5,0	5,3	5,4	5,7	6,0	7,0	6,5	5,5	6,5	7,0
$B_{\text{ф}3}$	5,0			5,46			6,8			6,33		
$\bar{B}_{\text{ф}}$	5,23						6,86					
$B_{\text{еф}}$	7,23						8,86					

Нерівномірність розселення визначали порівнянням розрахункової (X) та експериментальної (a_i) щільностей розселення у дослідних ємко-

стях. Для норми 200000 особин/га розрахункова щільність становила 20 особин/м².

Кількість трихограми, яка припадала на одну ємкість, тобто щільність a_i підраховували вручну. По кожному рядку спочатку визначали A – середньоарифметичне значення дослідних щільностей a_i у кожній ємкості за формулою

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n},$$

де n – кількість дослідних ємкостей.

Оскільки для кожної висоти польоту виконували по два досліди, то для кожного дослідів визначали відповідне A .

Відхилення значень a_i від A визначали за формулою

$$A - a_i = \delta_i.$$

Середньоквадратичну похибку визначали за формулою :

$$\Delta = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)n}},$$

де n – кількість дослідних ємностей. Результати дослідження нерівномірності розселення БЛА в залежності від висоти польоту і схем розміщення робочих органів представлені у табл. 4.

Таблиця 4

Визначення нерівномірності розселення трихограми за допомогою БЛА

Номер ємкості	Робоча висота 3 м									Робоча висота 6 м								
	Номер рядка дослідних ємкостей									Номер рядка дослідних ємкостей								
	1			2			3			1			2			3		
	a_i	δ_i	δ_i^2	a_i	δ_i	δ_i^2	a_i	δ_i	δ_i^2	a_i	δ_i	δ_i^2	a_i	δ_i	δ_i^2	a_i	δ_i	δ_i^2
1	19	0,85	0,72	17	-1,85	3,42	18	1,57	2,46	0	12,7	161,3	11	2,7	7,29	10	3,57	12,7
2	19	0,58	0,34	18	0,85	0,72	19	0,57	0,32	13	-0,3	0,04	25	-11,3	127,7	21	-7,43	55,2
3	20	-0,15	0,02	17	1,85	3,42	20	-0,43	0,18	27	-14,3	203,4	19	-5,3	28,1	18	-4,43	19,6
4	23	-3,15	6,92	23	-3,15	6,92	24	-3,43	11,7	17	-4,3	18,44	20	-6,3	39,7	18	-4,43	19,6
5	19	0,85	0,72	19	-0,15	0,02	20	-0,43	0,18	13	-0,3	0,09	21	-7,3	53,3	20	6,43	41,3
6	20	-0,15	0,02	20	-1,15	1,32	18	1,57	2,46	19	-6,3	39,69	0	13,7	187,7	8	5,6	31,0
7	19	-0,15	0,02	18	0,85	0,72	18	1,57	2,46	0	12,7	161,3	0	13,7	187,7	0	13,6	184,1
A	19,85			18,85			19,57			12,7			13,7			13,57		
Δ	0,46			0,55			0,68			3,72			3,87			2,94		
R_b	0,023			0,029			0,034			0,29			0,28			0,21		
$\overline{R_b}$	0,029									0,26								

У результаті проведених попередніх розрахунків та польових досліджень для розгону БЛА до робочої швидкості 95 км/год потрібна потужність двигуна становила 1,048 кВт. Застосований на БЛА ПД потужністю 2,0 кВт дозволяв йому досягти максимальної швидкості 123 км/год. Розрахункова робоча швидкість складала 77,23 % від максимальної, а запас за наявною потужністю – 46 %.

Аналіз даних табл. 3 свідчить про те, що фактична ширина захвату БЛА з двома робочими органами та відстанню між їх осями 3,44 м залежить від робочої висоти польоту БЛА. На робочій висоті польоту 3 м у двох дослідів фактична ширина захвату коливалась у межах 4,5–5,7 м; середнє значення у двох дослідів – 5,23 м.

На робочій висоті 6 м у двох дослідів V_{ϕ} коливалось у межах 5,3–7,0; середнє значення у двох дослідів – 6,86 м.

Застосовуючи формулу (5), доходимо висновку, що ефективна ширина захвату БЛА для робочої висоти 3 м дорівнює 7,23 м, а для робочої висоти 6 м – 8,86 м.

Експериментальні значення щільності a_i розселення трихограми залежно від схеми розміщення робочих органів та робочої висоти польоту БЛА наведено в табл. 4.

Згідно з методикою польових досліджень обраховували: A – середньоарифметичне значення дослідних щільностей a_i , δ_i – відхилення значень a_i від A , Δ – середньоквадратичну похибку дослідів та коефіцієнт варіації R_b [6]. Аналіз даних таблиць показує, що для робочої висоти 3 м відхилення від розрахункової щільності $X = 20$ особин/м² дослідних щільностей a_i в середньому становить 9,32 % для схеми з двома робочими органами при $\overline{R_b} = 0,03$ та 3,37 % для схеми з трьома робочими органами, якщо $\overline{R_b} = 0,036$.

Для робочої висоти 6 м відхилення від розрахункової щільності становить 44,8 % при $\overline{R_b} = 0,38$ для схеми з двома робочими органами, а для схеми з трьома робочими органами відхилення – 33,4 %, якщо $\overline{R_b} = 0,26$.

Згідно з агротехнічними вимогами відхилення від розрахункової щільності не повинно складати 20 %. Тому очевидна значна перевага у використанні для проведення біологічного захисту за допомогою БЛА робочої висоти 3 м, навіть якщо це призводить до певної втрати у ширині захвату БЛА і як наслідок до втрати у годинній продуктивності.

Годинну продуктивність (га/год) БЛА обчислювали за формулою

$$W_{\text{год}} = 0,1 B_{\text{еф}} V_p R,$$

де $B_{\text{еф}}$ – ефективна ширина захвату, м; V_p – робоча швидкість БЛА, км/год; R – коефіцієнт використання робочого часу (0,9).

Для робочої висоти 3 м $W_{\text{год}} = 61,81$ га/год; для робочої висоти 6 м – $75,75$ га/год. Втрата продуктивності при роботі БЛА на робочій висоті 3 м відносно робочої висоти 6 м становить 18,11 %.

Висновки

1. Унаслідок природної здатності трихограми самостійно вести пошук шкідника на певній віддалі від точки падіння (радіус пошуку) фактична ширина захвату БЛА збільшувалась на два таких радіуси і зростала з 5,28 м до 7,83 м на робочій висоті 3 м.

2. Продуктивність БЛА у комплексі з розробленим пристроєм розселення на робочій висоті 6 м становила $75,75$ га/год, а на робочій висоті 3 м – відповідно $61,81$ га/год.

3. Нерівномірність унесення трихограми на робочій висоті 3 м склала 9,32% за коефіцієнта варіації $\overline{R}_b = 0,03$. Відповідно для робочої висоти 6 м ці показники становили 44,8% та $\overline{R}_b =$

0,38. Тому для практичної реалізації біологічного захисту рослин за допомогою БЛА можна рекомендувати для застосування робочу висоту близько 3 м, хоч це і призводить до деякої втрати (на 18,11%) годинної продуктивності БЛА.

4. Потужність двигуна, потрібна для розгону БЛА до робочої швидкості 95 км/год, становить 0,95–1,0 кВт.

5. Безпілотний літальний апарат для механізованого внесення трихограми повинен піднімати у повітря масу корисного навантаження, що складається з мас дозатора, робочих органів, трихограми та приводу дозатора.

Література

1. *Арепьев А. В.* Выбор параметров радиоуправляемой авиамодели // Крылья Родины. – 1988. – № 4. С. 12–13.
2. *Матійчик М. П.* Ефективність використання радіокерованих літальних апаратів при біологічному захисті рослин // Зб. наук. пр. – К.: Нац. ун-т «Києво-Могилянська академія», 1998. – С 223–226.
3. *Боголюбов В. М., Матійчик М. П.* Розробка агротехнічних вимог до використання трихограми при захисті рослин від шкідників // Зб. наук. пр. – К.: Нац. ун-т «Києво-Могилянська академія», 1998. – Т. 5. – С 79–82.
4. *Матійчик М. П.* Обгунтування параметрів пристрою і технології механізованого розселення трихограми. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Глеваха, 1994. – С. 15–17.
5. *Чумак П. И., Кривокрисенков В. Ф.* Расчет, проектирование и постройка сверхлегких самолетов. – М.: Патриот, 1991. – С. 12–19.
6. *Крутов В. И., Грушко И. М.* Основы научных исследований. – М.: Высш. шк., 1989. – С. 280–289.

Стаття надійшла до редакції 29.11.06.