

## ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АГРОДРОНІВ НА ТРИВАЛІСТЬ ЇХНЬОГО ПОЛЬОТУ

*Анатолій Тригуба, д. т. н., Андрій Шарибура, к. т. н., Зіновій Гошко, к. т. н.,  
Олександр Левчук, к. т. н., Руслан Барабаш, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: ascharibura@gmail.com; zinovijg9@gmail.com*

<https://doi.org/10.32718/agroengineering2025.29.27-33>

### **Тригуба А., Шарибура А., Гошко З., Левчук О., Барабаш Р. Вплив конструктивних параметрів агродронів на тривалість їхнього польоту**

Наведено результати експериментальних досліджень впливу конструктивних та енергетичних параметрів агродрона малого класу на тривалість його польоту. Об'єктом дослідження є агродрон 7" класу, оснащений літій-іонними акумуляторними батареями різної ємності, призначений для виконання завдань моніторингу посівів і локального внесення агротехнологічних препаратів. Встановлено закономірності впливу ємності акумуляторної батареї та маси корисного навантаження на час перебування агродрона у повітрі в умовах стабілізованого польоту.

Експериментальні дослідження проведено за одно- та двофакторним планом із повторенням вимірювань. Ємність акумуляторних батарей змінювалася в діапазоні 4000-10000 мА·год, а маса корисного навантаження – від 0 до 1,5 кг. Для кожного режиму виконувалося три польоти з подальшою статистичною обробкою результатів. Політ вважався завершеним за досягнення граничної напруги 2,66 В на елемент акумулятора. Дослідження проводилися за температури навколишнього середовища 18-22 °С та швидкості вітру до 2 м/с.

Встановлено, що збільшення ємності акумуляторної батареї з 4000 до 8000 мА·год забезпечує зростання тривалості польоту в середньому на 29 % за відсутності корисного навантаження, тоді як подальше збільшення ємності до 10000 мА·год має обмежену ефективність через зростання маси батареї. Показано, що збільшення маси корисного навантаження від 0 до 1 кг призводить до зменшення часу польоту на 42-50 % незалежно від ємності акумулятора. Визначено, що для агродрона 7" класу оптимальною з кута зору співвідношення маси та тривалості польоту є акумуляторна батарея ємністю 8400 мА·год, яка забезпечує час перебування у повітрі в межах 13-29 хв залежно від навантаження.

Отримані результати можуть бути використані у виборі енергетичних параметрів агродронів малого класу для задач точного землеробства.

**Ключові слова:** агродрон, акумуляторна батарея, ємність батареї, корисне навантаження, тривалість польоту, точне землеробство.

### **Tryhuba A., Sharybura A., Hoshko Z., Levchuk O. Barabash R. Influence of structural parameters of agricultural drones on their flight duration**

The paper presents the results of experimental studies on the influence of structural and energy parameters of a small-class agricultural drone on its flight duration. The object of the study is a 7-inch class agricultural drone equipped with lithium-ion battery packs of various capacities, intended for crop monitoring and localized application of agricultural treatments. The study aims to determine the regularities of the influence of battery capacity and payload mass on the airborne time of the agricultural drone under stabilized flight conditions.

The experimental investigations were carried out according to single-factor and two-factor experimental designs with repeated measurements. Battery capacity ranged from 4000 to 10000 mAh, while payload mass ranged from 0 to 1.5 kg. For each operating mode, three flight tests were performed, followed by statistical processing of the obtained data. A flight was considered completed when the battery cell voltage reached the cutoff value of 2.66 V. The experiments were conducted at an ambient temperature of 18-22 °C and wind speeds not exceeding 2 m/s.

The results showed that increasing the battery capacity from 4000 to 8000 mAh led to an average increase in flight duration of approximately 29% under no-payload conditions, whereas a further increase to 10000 mAh provided limited improvement due to the increased battery mass. It was found that increasing the payload mass from 0 to 1 kg reduced the flight time by 42-50%, regardless of battery capacity. The study determined that, for a 7-inch class agricultural drone, a battery capacity of 8400 mAh is optimal in terms of the balance between mass and flight duration, providing an airborne time of 13-29 minutes depending on the payload.

The obtained results can be used to select the energy parameters of small-class agricultural drones for precision agriculture applications.

**Keywords:** agricultural drone, battery capacity, payload, flight duration, lithium-ion battery, precision agriculture.

**Постановка проблеми.** Розвиток точного землеробства та біотехнологій вимагає ефективних мобільних платформ для моніторингу та обробки посівів. Агродрони – легкі та маневрені безпілотні літальні апарати – дедалі ширше застосовуються в аграрному секторі для моніторингу посівів і виконання технологічних операцій.

Якщо перші агродрони використовували переважно для моніторингу посівних площ, то сьогодні спектр їхнього застосування значно розширюється. Одним із чинників зростання застосування агродронів в Україні є воєнні дії, які обмежують використання традиційної сільськогосподарської техніки, особливо на прифронтових територіях. Війна наклала багато обмежень на аграрний сектор (брак робочих рук, обмеженість у застосуванні техніки у прифронтових територіях та ін.). Фахівці відзначають велику зацікавленість фермерів до технології ультрамалого обприскування (УМО) із середньою нормою витрати робочої суміші 5–10 л/га. Технологія ультрамалого обприскування забезпечує дрібнодисперсне внесення робочої рідини, що підвищує коефіцієнт покриття поверхні рослин і ефективність захисту від хвороб та шкідників. Ще один напрямок використання агродронів – захист ділянок поля із локальним розмноженням гризунів (миші, ховрахи).

Розширення функціональних можливостей агродронів і зростання номенклатури виконуваних ними завдань зумовлює підвищені вимоги до їхніх енергетичних характеристик, зокрема до тривалості польоту за різних умов експлуатації та рівнів корисного навантаження. У цьому контексті ключовим чинником є вибір акумуляторної батареї, маса та ємність якої безпосередньо впливають на ефективність виконання агротехнологічних операцій.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу ємності акумуляторної батареї та маси корисного навантаження на тривалість польоту агродрона 7" класу в умовах аграрного застосування.

У статті показано метод оцінки впливу зміни корисного навантаження на споживання енергії агродрона 7" класу з метою його застосування в системах моніторингу посівних площ на основі експериментальних даних.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Агродрони – це складні системи, які сміливо можна назвати новим етапом еволюції землеробства. Завдяки стрімкому розвитку безпілотних технологій ці літальні апарати стають незамінними помічниками сучасних аграріїв, пропонуючи безліч

переваг порівняно з традиційними методами обробки полів. Агродрони для сільського господарства відкривають можливості до більш точного, ефективного, екологічного та економічно вигідного господарювання. У статті «Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БпЛА» [4] оцінено вплив зміни температури навколишнього середовища на процес розряду акумуляторної батареї безпілотного літального апарата (БпЛА). Досліджено особливості роботи акумуляторів у різних температурних умовах і визначено їхні можливі впливи на тривалість польоту та продуктивність БпЛА. Результати дослідження можуть бути корисні для оптимізації роботи акумуляторних систем в умовах змінних температур, що сприятиме покращенню ефективності та надійності безпілотних літальних апаратів у різних кліматичних умовах. У статті «Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві» [6] проаналізовано застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві для захисту рослин від хвороб та шкідників на основі вивчення зарубіжного досвіду використання мобільних авіаційних комплексів, маркетингових досліджень іноземних компаній та вивчення переваг і недоліків БпЛА порівняно з пілотними літальними апаратами. Виявлено, що Україна має потенціал до використання БпЛА у сільському господарстві з огляду на технічні, економічні та людські ресурси. Досліджено основні виробники БпЛА, зокрема для потреб сільського господарства іноземних та українських; визначено основні технічні характеристики БпЛА, що можуть бути використані для потреб сільського господарства в наукоємні технології, представлено SWOT-аналіз розвитку безпілотної сільськогосподарської авіації.

У праці [6] досліджено проблему адаптивності літій-іонних батарей, що живлять БпЛА до екстремальних температурних умов. Результати досліджень свідчать, що високі температурні умови можуть значно знизити термін служби батарей. У праці [8] вивчено вплив струму та навколишньої температури на термічну відповідь літій-іонних батарей. Співвідношення між цими факторами та температурними варіаціями всередині батареї розглянуто в контексті їхнього впливу на поведінку розряду та заряду. Стаття [4] пропонує оптимізаційний підхід для врахування впливу зміни температури повітря на ємність акумуляторної батареї БпЛА. Досліджено методи планування польотів БпЛА з урахуванням невизначеності тривалості роботи батареї та температурних умов. У праці [1] акцентується на точному прогнозуванні

рівня заряду (SOC) літій-іонних батарей для БпЛА, використовуючи метод опорних векторів. Стаття “All-temperature area battery application mechanism, performance, and strategies” [4] є комплексним оглядом, який досліджує теплові характеристики та управління літій-іонними батареями в усіх температурних зонах, включаючи їхню продуктивність та стратегії використання. Як бачимо, дослідження впливу зміни температури на розряд батарей БпЛА є актуальним та важливим напрямком у наукових дослідженнях. Підходи, представлені у дослідженнях, дають змогу краще розуміти механізми впливу температурних змін на роботу батарей та розробляти оптимальні стратегії для підвищення ефективності та тривалості польотів БпЛА. Перелічені статті можуть бути корисними для подальших досліджень та розробки нових технологій у галузі безпілотної авіації.

**Постановка завдання.** Попит на використання агродронів у сільському господарстві невпинно зростає. Відкриваються курси з підготовки відповідних фахівців управління агродронами. Рівень підготовки операторів агродронів безпосередньо впливає на ефективність застосування цих технологій у сільському господарстві. Тому є потреба в поглибленому вивченні та дослідженні малих літальних апаратів. Збільшення часу перебування дронів у повітрі – важлива проблема, тож дослідження факторів, що впливають на цей процес, дуже цінні. Агродрони забезпечують автоматизацію технологічних процесів і високу точність виконання операцій, що підвищує їх економічну та технологічну доцільність. Вони здійснюють моніторинг і обробку з найменшою похибкою, що робить процес більш ефективним і економічним. Технології, що використовуються в агродронах, охоплюють системи навігації, які дозволяють дрону точно стежити за маршрутами і виконувати завдання з максимальною ефективністю.

Особливу увагу слід звернути на такі показники:

- корисне навантаження – визначає об’єм ємності або масу контейнера для сипучих речовин. Більш корисне навантаження сприяє збільшенню площі обробки посівів за один виліт;
- продуктивність – це гектари за годину або кілограми на годину – вища продуктивність скорочує терміни обробки;
- ширина захвату – впливає на продуктивність агродрона за один політ;
- час польоту – визначає тривалість первинної роботи агродрона на одному заряді акумулятора;

- швидкість польоту та опір вітру – ці дані важливі для польоту в різних погодних умовах;

- наявність в агродроні функцій обприскування, розкидання, навігації та керування, а також системи безпеки у вигляді датчиків перешкод, систем запобігання зіткнень та резервних систем живлення.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальні дослідження проводили за одно- та двофакторним планом із повторенням вимірювань. Ємність акумуляторної батареї та маса корисного навантаження змінювалися дискретно. Кожен експериментальний режим повторювався тричі, що дало змогу оцінити середні значення та варіацію результатів. Тривалість польоту вимірювали до досягнення граничної напруги 2,66 В на елемент акумулятора. Температура навколишнього середовища під час експериментів становила 18-22 °С, швидкість вітру не перевищувала 2 м/с, висота польоту – 10-15 м. Перед початком досліджень проводили калібрування датчиків та перевіряли енергетичну систему дрона.

Дослідження проводили для визначення закономірностей впливу конструктивних параметрів агродронів на тривалість польоту за зміни основних характеристик енергосистеми та навантаження. Для цього використали агродрон 7-дюймового класу масою 0,57 кг, обладнаний польотним контролером SpeedyBee F405 V4, двигунами типу 2807 1300KV, трипелюстковими пропелерами 7×3,5×3 та живленням від акумуляторної батареї типу 6S Li-Ion. Експерименти проводили у стабілізованому режимі польоту (Angle, Horizon), який забезпечує сталу тягу й дозволяє об’єктивно оцінити енергоспоживання під час горизонтального руху або режиму зависання.

Під час виконання експерименту змінювали два основні параметри – ємність акумулятора та корисне навантаження. Ємність батарей відповідно прийнята 4000, 8000, 8400 та 10000 мА·год, а маса навантаження змінювалась у межах від 0 до 1,5 кг. Для кожного варіанта параметрів виконували три польоти, після чого розраховували середнє значення тривалості польоту. Політ вважався завершеним у момент зниження напруги до 2,66 В на елемент.

Залежність тривалості польоту  $T$  від енергетичних характеристик системи описується співвідношенням:

$$T = \frac{60 \cdot E_u}{P_h}, \quad (1)$$

де  $E_u$  – використана енергія акумулятора;  $P_h$  – потужність, потрібна для утримання апарата в повітрі.

Потужність у режимі зависання визначається за узагальненою формулою, що базується на теорії імпульсу для гвинтових апаратів:

$$P_h = k \frac{(mg)^{3/2}}{\sqrt{2\rho A_\Sigma}}, \quad (2)$$

де  $m$  – маса дрона з навантаженням;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\rho$  – густина повітря;  $A_\Sigma$  – сумарна площа дисків пропелерів;  $k$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує втрати у системі приводу.

Повну енергію акумулятора розраховували за формулою:

$$E = \frac{C}{1000} U, \quad (3)$$

де  $C$  – ємність, мА·год;  $U$  – робоча напруга батареї, В

З урахуванням внутрішніх втрат реальна використана енергія становить:

$$E_u = \eta_u \cdot E, \quad (4)$$

де  $\eta_u$  – коефіцієнт корисного використання енергії, що залежить від типу акумулятора та режиму розряду.

Для статистичної обробки результатів розраховували середнє значення тривалості польоту, стандартне відхилення та довірчий інтервал. Середню тривалість визначали за формулою:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (5)$$

а стандартне відхилення –

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість повторів вимірювання.

Узагальнені результати експерименту подано у табл., де наведено середні значення тривалості польоту за різних ємностей батарей та навантажень.

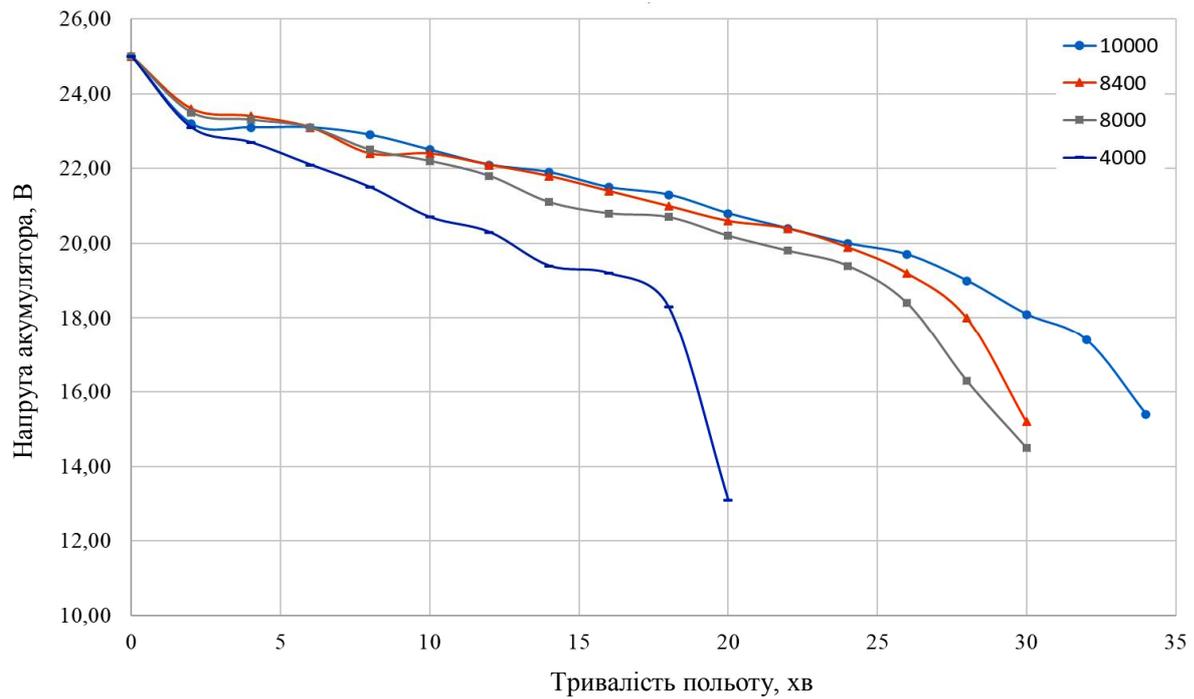
Статистична обробка результатів показала, що стандартне відхилення тривалості польоту в усіх експериментальних режимах не перевищувало 6–9 % від середнього значення, що свідчить про задовільну відтворюваність результатів. Довірчі інтервали для середніх значень тривалості польоту за рівнів значущості 0,95 не перекривалися для режимів із різною масою навантаження, що підтверджує статистично значущий вплив корисного навантаження на час польоту.

Провівши статистичну обробку даних, будемо графічні залежності (рис. 1-4).

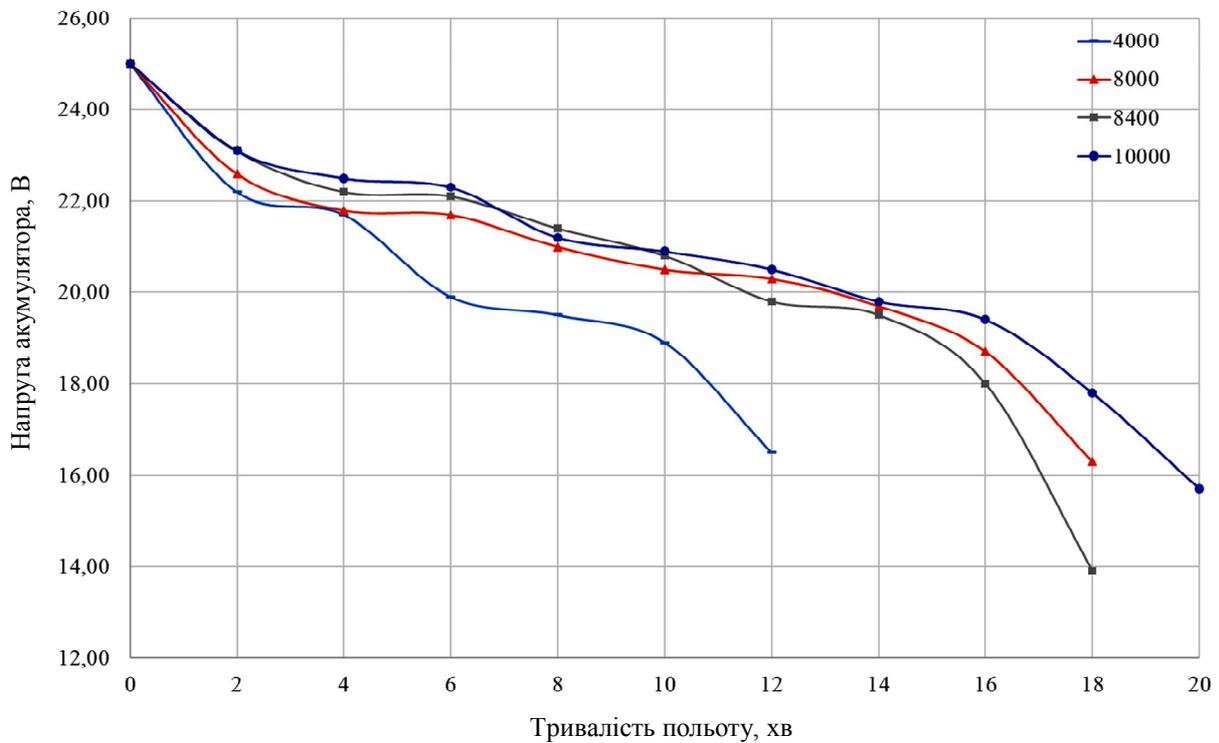
**Таблиця.** Середня тривалість польоту агродрона 7" класу для різних значень ємності батареї та маси корисного навантаження

**Table.** Average flight duration of a 7-inch class agricultural drone for different battery capacities and payload masses

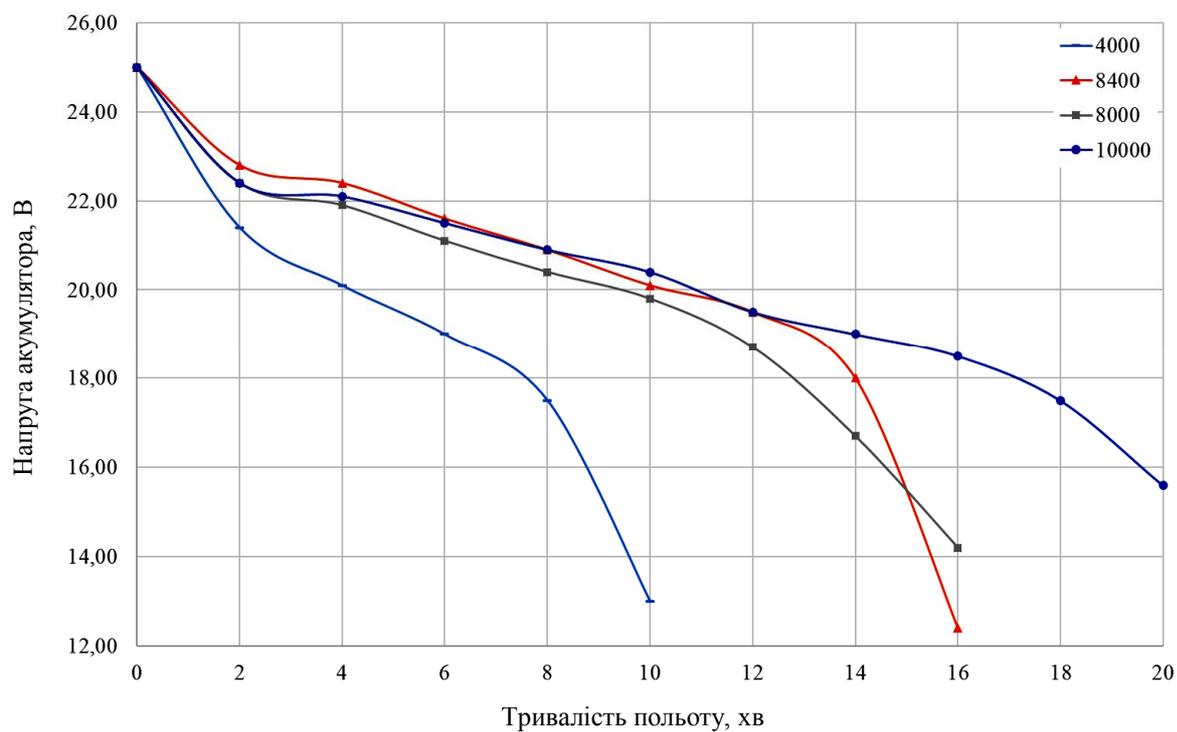
Навантаження, кг	Ємність, мА·год	Час польоту, хв																	
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
0,0	10000	25,00	23,20	23,10	23,10	22,90	22,50	22,10	21,90	21,50	21,30	20,80	20,40	20,00	19,70	19,00	18,10	17,40	15,40
	8400	25,00	23,60	23,40	23,10	22,40	22,40	22,10	21,80	21,40	21,00	20,60	20,40	19,90	19,20	18,00	15,20		
	8000	25,00	23,50	23,30	23,10	22,50	22,20	21,80	21,10	20,80	20,70	20,20	19,80	19,40	18,40	16,30	14,50		
	4000	25,00	23,10	22,70	22,10	21,50	20,70	20,30	19,40	19,20	18,30	13,10							
0,5	10000	25,00	23,10	22,50	22,30	21,20	20,90	20,50	19,80	19,40	17,80	15,70							
	8400	25,00	23,10	22,20	22,10	21,40	20,80	19,80	19,50	18,00	13,90								
	8000	25,00	22,60	21,80	21,70	21,00	20,50	20,30	19,70	18,70	16,30								
	4000	25,00	22,20	21,70	19,90	19,50	18,90	16,50											
1,0	10000	25,00	22,40	22,10	21,50	20,90	20,40	19,50	19,00	18,50	17,50	15,60							
	8400	25,00	22,80	22,40	21,60	20,90	20,10	19,50	18,00	12,40									
	8000	25,00	22,40	21,90	21,10	20,40	19,80	18,70	16,70	14,20									
	4000	25,00	21,40	20,10	19,00	17,50	13,00												
1,5	10000	25,00	22,00	21,50	21,10	20,40	19,50	18,40	16,10										
	8400	25,00	22,20	21,80	20,90	20,20	19,40	17,60											
	8000	25,00	21,90	21,30	20,40	19,50	18,40	16,00											
	4000	25,00	20,60	19,40	18,10														



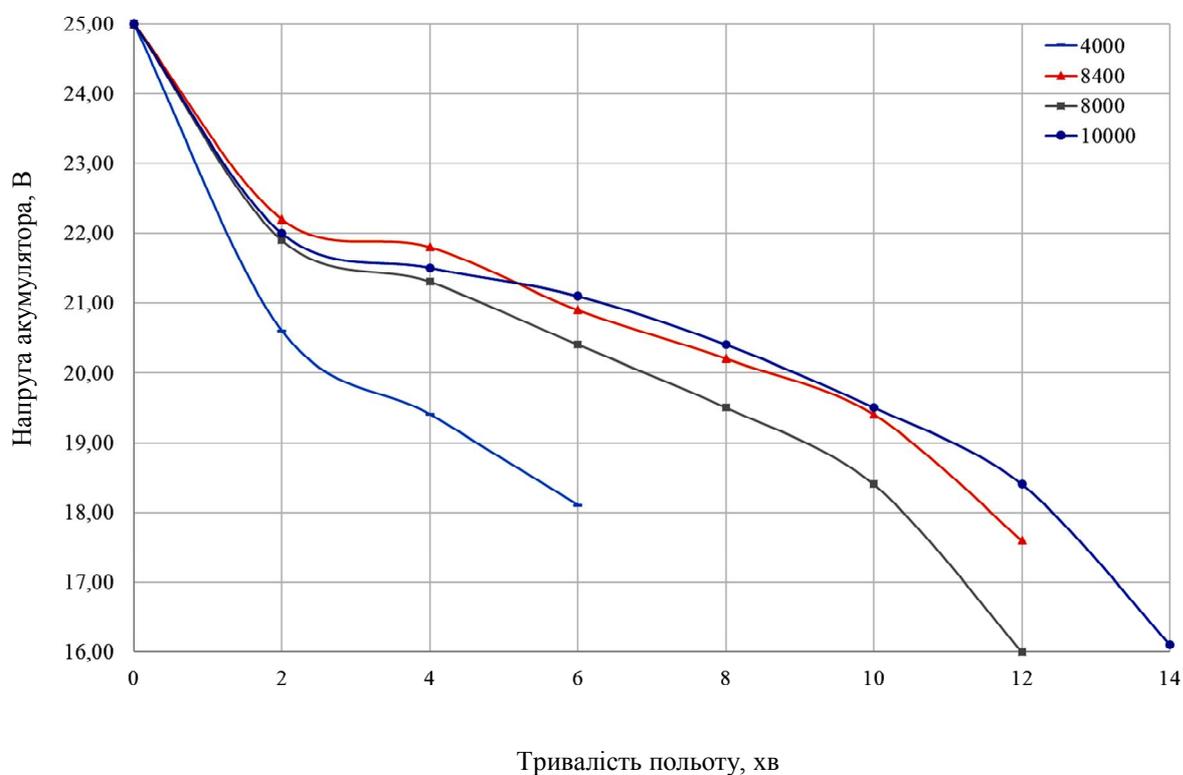
**Рис. 1.** Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 0 кг  
**Fig. 1.** Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 0 kg



**Рис. 2.** Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 0,5 кг  
**Fig. 2.** Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 0.5 kg



**Рис. 3.** Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 1,0 кг  
**Fig. 3.** Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 1.0 kg



**Рис. 4.** Залежність тривалості польоту агродрона від ємності батареї за корисного навантаження 1,5 кг  
**Fig. 4.** Dependence of the agricultural drone flight duration on battery capacity at a payload of 1.5 kg

Отримані експериментальні результати узгоджуються з даними літературних джерел [7], у яких показано нелінійний характер зростання енергоспоживання мультикоптерів зі збільшенням їхньої маси. Подібні тенденції також відзначено в дослідженнях, присвячених оптимізації енергетичних параметрів БПЛА для аграрних завдань. Водночас, на відміну від наведених праць, у нашому дослідженні акцент зроблено на практичному застосуванні агродрона конкретного класу (7"), що дозволяє отримати прикладні рекомендації для вибору акумуляторів залежно від маси навантаження. У подальшому планується проведення аналогічних досліджень для інших типів (10-ти та 11-тиждіймових) агродронів.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їхнього використання при проектуванні та експлуатації агродронів малого класу для завдань моніторингу посівів, локального внесення біологічних препаратів і захисту рослин. Запропоновані результати можна використати у виборі енергетичних параметрів дрона з урахуванням запланованого корисного навантаження.

**Висновки.** Збільшення ємності акумуляторної батареї підвищує тривалість польоту агродрона, однак ефективність цього зростання має обмежений характер через збільшення маси батареї. Наприклад, за маси навантаження 0 кг використання батареї 8000 мА·год забезпечує на 29 % більший час перебування в повітрі порівняно з 4000 мА·год (див. рис.1). Отже, ефективність зростання ємності має обмежений характер, оскільки додаткова маса батареї частково нівелює вигоди у часі.

Збільшення маси корисного навантаження суттєво зменшує тривалість польоту. Так, при збільшенні навантаження від 0 кг до 1 кг час роботи агродрона скорочується в середньому на 42-50 %, навіть за використання батареї максимальної ємності.

Для агродрона 7" класу оптимальною з кута зору тривалості польоту виявилася батарея ємністю 8400 мА·год. При різних навантаженнях (порівняно з батареєю 10000 мА·год) різниця в тривалості польоту становила 7-16 %. Це забезпечує баланс між тривалістю польоту (13-29 хв) та допустимою масою, що дозволяє виконувати моніторинг посівів і локальне внесення препаратів. Використання батареї більшої ємності (10000 мА·год) доцільне лише при легших навантаженнях (до 0,5 кг), оскільки додаткова маса знижує ефективність.

Подальші експерименти варто спрямувати на: дослідження роботи дронів інших класів (10" та 11"); врахування впливу температурних умов на розряд батареї; перевірку дронів у динамічних польотних режимах (рух за маршрутом, зміна висоти, вітер); аналіз впливу типу акумуляторів (Li-Ion, Li-Po, LiFePO<sub>4</sub>).

Практичні рекомендації: для моніторингу посівів без додаткового обладнання оптимально використовувати батарею 10000 мА·год (польоти понад 30 хв); для внесення біопрепаратів із навантаженням до 1 кг доцільно застосовувати батарею 8400 мА·год, що забезпечує прийнятний баланс між масою та часом польоту (14-18 хв); навантаження понад 1 кг для агродронів 7" класу малоефективне, оскільки різко зменшує час перебування у повітрі.

### Бібліографічний список

1. Васильєв І.О. Акумуляторні системи для безпілотних літальних апаратів. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2. С. 45-51.
2. Васильєв І.О. Енергетичні системи БПЛА. *Технічна електроніка*. 2020. № 2. С. 45–51.
3. Дрони у сільському господарстві, або Як починалося точне землеробство. *Agravery*. URL: <https://agravery.com/uk/posts/show/droni-u-silkskomu-gospodarstviabo-ak-pocinalosa-tocne-zemlerobstvo> 14.02.2025 (дата звернення 10.01.2025)
4. Лось А.М., Велігорський О.А., Роженков А.М., Хоменко Є.В. Оцінка впливу зміни температури зовнішнього середовища на розряд акумуляторної батареї БПЛА. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*. 2023. Вип. 3(17). С. 31-36.
5. Офіційна документація Molicel та Samsung INR18650. URL: <https://www.molicel.com/inr-21700-p45b/> (дата звернення 10.01.2025)
6. Смірнов Я. Про дрони сільськогосподарського призначення. 50 North GIS Blog from Ukraine. URL: <http://www.50northspatial.org/ua/agricultural-drones/> (дата звернення 30.01.2025).
7. Юн Г. М., Мединський Д.В. Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 335-341.
8. Beigi P., Rajabi M.S., Aghakhani S. An Overview of Drone Energy Consumption Factors and Models. arXiv:2206.10775, 2022. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://arxiv.org/pdf/2206.10775> (дата звернення 10.01.2025)
9. Kalantari A., Gharibi M. Flight endurance optimization for multirotor UAVs. *Journal of UAV Systems*. 2022. № 10(2). С. 120-132.

Стаття надійшла 03.02.2025