

11. STANAG 4355 (Edition 3). (2009), The modified point mass and five degrees of freedom trajectory models: NSAI0454(2009)-JAIS/4355, dated 17 April 2009. 95 p. (NATO Standardization Agency).

12. Baranowski L. (2013), Effect of the mathematical model and integration step on the accuracy of the results of

computation of artillery projectile flight parameters. *Bulletin of the Polish Academy of sciences technical sciences*. Vol. 61, No. 2, pp. 475–484. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0047.

13. Matveyev L.T. (1976), "Kurs obshchey metrologii. Fizika atmosfeyu" [Course of general metrology. Atmospheric physics]. Moskva : Gidrometeoizdat. 639 p. [in Russian].

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF THE APPROXIMATION OF THE NONLINEAR PARAMETERS OF THE PROJECTILE FLIGHT

V. Maidaniuk, S. Bondarenko, A. Onofriichuk

The article evaluates the accuracy of the approximation of the aerodynamic force coefficients (moments) of the projectile and atmospheric parameters, which are significantly nonlinear. The aerodynamic force coefficients (moments) of the 155-mm Assegai M2000 projectile of the South African company Denel Naschem and atmospheric parameters defined by the international standard ISO 2533:1975/Add.1:1985(en) Standard Atmosphere are taken as basis. The estimation of the accuracy of the approximation of the tabular values is presented through the relative error (misalignment) between the given tabular data and the values of the approximated function of the aerodynamic force coefficients (moments). Analytical functions are used as approximating functions, such as the sum of a support function (error function) and a set of basic functions (Gaussian functions), which makes it possible to obtain an approximating function continuously differentiated on the segment of the change in the projectile flight parameter, which can be represented by a single expression. In the Maple software environment, analytical functions (error functions and Gaussian functions) were approximated to the tabulated values of the aerodynamic coefficients of forces (moments) of the 155-mm Assegai M2000 projectile. The obtained values of the single analytical functions of force coefficients (moments) and atmospheric parameters can be used to solve the problems of calculating firing tables, preparing data using ballistic integrating algorithms (ballistic calculators) for firing existing, new artillery systems and those systems being modernized. It is shown that by iterative procedures of approximation of tabular data of aerodynamic force coefficients (moments) and parameters of the atmosphere, it is possible to construct analytical functions in the form of a continuous function of the projectile flight parameter within the entire range of its change, ensuring the given accuracy of its approximation to the tabular data.

Keywords: projectile, aerodynamic forces (moments), atmospheric parameters, approximation, analytical function, tabular function, relative error.

УДК 623.7

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.42-53>

Ю.А. Мирончук, С.П. Оверчук, А.О. Ткач

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

Article history: Received 21 November 2023; Revised 08 December 2023; Accepted 31 March 2023

ІНЖЕНЕРНО-ШТУРМАНСЬКИЙ РОЗРАХУНОК ПОЛЬОТІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТАКТИЧНИХ КЛАСІВ

Нормативними документами Міністерства оборони України передбачена штурманська підготовка екіпажів безпілотних авіаційних комплексів та встановлена необхідність наявності штурманського плану та інженерно-штурманського розрахунку польоту на робочому місці зовнішнього пілота БпЛА. У статті зазначено, що на сьогодні відсутні нормативні документи, якими було б встановлено зміст і обсяг інженерно-штурманських розрахунків та методів їх виконання для безпілотних авіаційних комплексів тактичних класів. Стаття в цілому присвячена розгляду питань методичного забезпечення штурманської підготовки екіпажів безпілотних авіаційних комплексів тактичного класу з електричною силовою установкою. Вказано, що виходячи із тактико-технічних можливостей БпЛА тактичних класів, характеру виконуваних ними задач та типового освітнього рівня їх зовнішніх пілотів, вимагається створення максимально спрощеної методики виконання основних інженерно-штурманських розрахунків польотів БпЛА. Математична складність такої методики не повинна виходити за межі загальної

середньої освіти. При виконанні навігаційних розрахунків польотів повітряних суден основну складність створює проблема врахування впливу вітру. Запропоновано прості алгоритми розрахунку поправки до курсу на знесення вітром, шляхової швидкості та тривалості польоту на прямолінійних ділянках маршруту та ділянках розворотів за наявності вітру. Запропоновано алгоритми розрахунку повної потреби в енергоресурсах для здійснення польоту за заданим маршрутом та за окремими ділянками маршруту, включаючи додаткові потреби енергоресурсу для ділянок набору висоти. Наведено рекомендації з оцінювання енергоємності акумуляторної батареї, доступної для виконання польоту. Запропоновано алгоритм розрахунку критичного запасу енергоресурсу, який необхідний для можливості повернення БпЛА із найвіддаленішої точки маршруту за метеорологічних умов на плановий час польоту. Запропоновані варіанти повного та скороченого інженерно-штурманських розрахунків.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, планування маршруту польоту, навігаційний трикутник, штурманський розрахунок, енерговитрати на політ.

Постановка проблеми

Широке застосування безпілотних літальних апаратів (БпЛА) у збройних силах для ведення повітряної розвідки, коригування артилерійського вогню та виконання ударних операцій вимагає підготовки персоналу, який володіє навичками постановки та планування польотних завдань. Невід'ємною складовою планування і підготовки польоту є розроблення маршруту і штурманського плану та виконання інженерно-штурманського розрахунку.

Штурманська підготовка входить до переліку обов'язкових знань (навичок/умінь) зовнішнього пілота, починаючи з базового кваліфікаційного рівня БКР-1, встановлених Наказом Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661 “Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України” [1], та включає в себе:

- складання штурманського плану польоту;
- виконання штурманських розрахунків польоту вручну;
- виконання інженерно-штурманських розрахунків польоту;
- виконання розрахунку фактичної витрати пального (заряду акумуляторів);
- виконання штурманських розрахунків у польоті;
- визначення поправок з урахуванням вітру в польоті;
- розрахунок (уточнення) часу посадки;
- контроль за витратою пального в польоті.

Пунктом VII.9. Наказу [1] у переліку документів, які повинні бути на робочому місці зовнішнього пілота під час виконання польотів БпЛА, вказані як обов'язкові: польотна карта (електронний планшет); штурманський план польоту; інженерно-штурманський розрахунок.

Для екіпажів пілотованих повітряних суден вимоги щодо обсягу та змісту штурманської підготовки визначено Наказом Міністерства оборони України № 100 від 23.02.2016 “Про затвердження Правил штурманського забезпечення польотів державної авіації України” [2], яким установається обов'язкова штурманська підготовка льотного складу. Зокрема, пунктом IV.10.4. встановлена вимога, що “Під час попередньої підготовки до польоту кожен екіпаж розробляє штурманський план польоту виходячи із завдання на політ ...”. Для забезпечення штурманської підготовки екіпажів пілотованих повітряних суден розроблено широкий спектр методів розв'язання різноманітних навігаційних задач, які викладено у численних підручниках.

При розробленні маршрутів польотів малих БпЛА та виконанні їх штурманських розрахунків основною проблемою є коректне врахування впливу вітру на режими польоту. Так паспортна крейсерська швидкість більшості БпЛА 1-го класу знаходиться в межах $15 \div 25$ м/с. У той же час, за статистичними даними спостережень метеорологічних станцій [3], практично по всій території України постійно наявний вітер зі швидкістю $4 \div 6$ м/с. Максимальна швидкість вітру для різних областей України сягає $25 \div 40$ м/с. Наведені співвідношення швидкостей свідчать, що затрати часу та витрати енергоресурсу для здійснення польоту БпЛА за деяким заданим маршрутом значною мірою залежать від швидкості та напрямку вітру під час здійснення польоту [4].

Історично проблема врахування впливу вітру у штурманських розрахунках та плануванні маршруту польоту прийшла в авіацію від судноплавства, в якому при прокладці курсу судна необхідно було враховувати, окрім впливу вітру, також і вплив водних течій. Незважаючи на історичну давність задачі,

науковий інтерес до її вирішення з часом не тільки не зникає, а й поглиблюється [5–15]. Використання у навігації сучасних вимірювальних засобів та сучасних обчислювальних систем дає можливість вирішувати задачі навігації при стохастичному вітрові, параметри якого вимірюються бортовими засобами літального апарата під час польоту та враховуються бортовими навігаційними системами для оперативного коригування курсу польоту. Для транспортної та пасажирської авіації особливою актуальністю має задача Цермело, формалізована у 1930 р. Ернстом Фридрихом Фердинандом Цермело [14]. У класичній навігаційній задачі Цермело метою є відшукання мінімальних за часом траєкторій судна чи літального апарата, який переміщується у збуреному просторі, що розглядається як векторне поле водяних течій та повітряних потоків. Якщо початково методи розв'язку задачі Цермело розроблялись для стаціонарних плоских двовимірних векторних полів, то на сьогодні інтереси дослідників змістились у напрямку нестационарних стохастичних тривимірних векторних полів, що вимагає розроблення та застосування відповідного математичного апарату. Набули актуальності формулювання задачі Цермело, метою яких є відшукання траєкторій з мінімальною витратою енергоресурсу на переміщення з початкової у кінцеву точку маршруту [10].

Актуальність та мета

У галузі малої безпілотної авіації, незважаючи на вимоги наказу [1], систематизовані методичні напрацювання щодо забезпечення штурманської підготовки зовнішніх пілотів (операторів) БпАК сьогодні відсутні. Пряме перенесення методів розв'язку штурманських задач із галузі пілотованої авіації на малі БпЛА не завжди можливе через ряд факторів – масштаби розмірів, швидкостей, відстаней, потужностей, можливостей бортового та наземного навігаційного обладнання тощо. Враховуючи певну математичну складність методів виконання штурманських та інженерних розрахунків, основним обмежувальним фактором є освітній рівень – якщо члени екіпажів пілотованої авіації проходять довготривалу підготовку з отриманням вищої освіти, то члени екіпажів малих БпАК 1-го класу проходять короткочасне навчання на базі загальної середньої освіти.

Таким чином, постає актуальна задача розроблення спрощеної методики інженерно-штурманських розрахунків польоту, точність яких задовольняє умовам застосування малих БпЛА та математичний апарат яких не виходить за межі загальної середньої освіти. Методика повинна бути адаптована для навчальних цілей при підготовці екіпажів БпАК.

Задача розрахунку тривалості польоту за заданим маршрутом особливо актуальна у випадках необхідності розрахунку часу старту для прибуття в задану точку в заданий час за наявності вітру. Зокрема, це вимагається для налагодження ефективної взаємодії підрозділів БпАК та артилерійських підрозділів при коригуванні артилерійського вогню.

Метою статті є викладення загальної методики та висвітлення проблемних питань виконання інженерно-штурманського розрахунку при розробленні маршруту та плануванні польоту малих БпЛА.

Зміст і задачі інженерно-штурманського розрахунку маршруту польоту БпЛА

Штурманська підготовка польоту БпЛА полягає у розробленні маршруту та штурманського плану польоту, поділі загального маршруту на ділянки, призначенні режиму польоту для кожної ділянки, розробленні висотного профілю польоту, розробленні погодинного графіка польоту, встановленні просторових і часових координат виконання окремих польотних завдань.

Інженерним розрахунком встановлюється технічна можливість здійснення польоту за штурманським планом. Основною задачею інженерного розрахунку є визначення необхідної кількості (достатності) бортового енергоресурсу (заряду акумуляторної батареї, маси рідкого пального) для здійснення польоту за штурманським планом. Незадовільні результати інженерного розрахунку є підставою для перегляду та коригування штурманського плану.

Оскільки розроблення маршруту та штурманського плану польоту проводиться за ділянками одночасно з інженерними розрахунками для цих ділянок, то доцільно таку сукупність взаємопов'язаних дій розглядати як єдиний процес інженерно-штурманського розрахунку польоту.

Порядок виконання інженерно-штурманського розрахунку польоту

У загальному випадку необхідні зміст і обсяг штурманських та інженерних розрахунків залежать від типу літального апарата, від характеру польотного завдання, від природно-кліматичних умов на час виконання завдання. З врахуванням цього, пунктом IV.10.5 Наказу МОУ [2] встановлено, що “штурманський план польоту розробляється в довільній формі” – тобто, зміст, обсяг, способи оформлення вибираються самостійно виконавцем.

Початковими даними для розрахунків є зміст польотного завдання та тактико-технічні характеристики обраного БпЛА. Для розвідувальних польотів важливе значення мають технічні характеристики оптико-електронних систем літального апарату.

За результатами запиту метеорологічних умов проводиться розрахунок висоти нижньої межі хмар та розрахунок вірогідності обмерзання за умов метеопрогнозу на час виконання польоту [16].

Для розвідувального завдання виконується розрахунок робочої висоти польоту для проведення аерофотознімання, яке залежить від вимог до роздільної здатності фото- та відеоматеріалів і від технічних параметрів оптико-електронного обладнання БПЛА. Методика розрахунку робочої висоти викладена у [17]. Залежно від робочої висоти розраховується ширина зони огляду об'єктива оптико-електронної системи БПЛА. При проведенні повітряної розвідки способом сканування території суміжними смугами ставиться вимога, щоб суміжні смуги сканування перекривались на $15 \div 20\%$. Тому ширина смуги сканування приймається $80 \div 85\%$ від ширини зони огляду матриці об'єктива

$$A' = (0,8 \div 0,85) \cdot A. \quad (1)$$

Маршрут польоту розроблюється з використанням карти (топографічної чи супутникової) місцевості, на якій повинні розміщуватись зона ведення розвідки та зони розташування основного та запасних стартових майданчиків (рис. 1). Одночасно із

нанесенням маршруту на карту виконується його інженерно-штурманський розрахунок. Результати розрахунку заносяться у бланк інженерно-штурманського розрахунку (рис. 2).

Загальна послідовність проходження маршруту планується з врахуванням сили та напрямку вітру.

Напрямок старту з основного стартового майданчика задається проти вітру.

Точка входження в зону розвідки задається так, щоб надалі політ БПЛА відбувався вздовж границі зони розвідки на відстані, рівній половині ширини смуги сканування оптико-електронної системи БПЛА. Розворот БПЛА виконується після його виходу за границю зони розвідки. Радіус розвороту приймається рівним половині розрахункової ширини смуги сканування оптико-електронної системи БПЛА.

На лінії маршруту вказуються вузлові точки – це точки зміни напрямку польоту, зміни висоти польоту, вмикання/вимикання оптико-електронних систем тощо. Точки послідовно нумеруються, починаючи з нуля. За нульову приймається точка старту (відриву БПЛА від поверхні Землі).

Вузлові точки розбивають маршрут на ділянки.

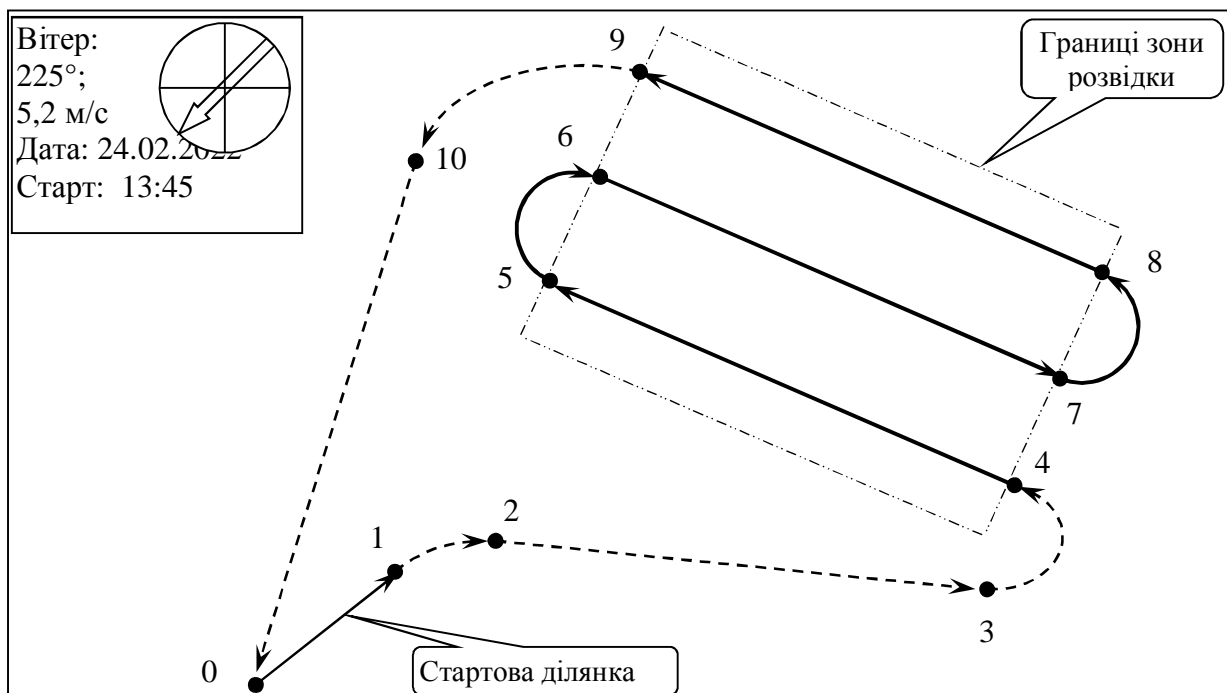


Рис. 1. Нанесення шляху маршруту на карту

Бланк інженерно-штурманського розрахунку

Інженерно-штурманський розрахунок маршруту виконується одночасно з прокладанням маршруту. Результати розрахунку вносяться у бланк інженерно-штурманського розрахунку польоту (див. рис. 2).

Результати інженерно-штурманського розрахунку для окремих ділянок є необхідними для можливості розроблення маршруту – наприклад, виконання розрахунку довжини стартової ділянки для набору заданої висоти польоту необхідне для можливості призначення координат точки виконання повороту у напрямку точки входження в зону розвідки.

Згідно з пунктом IV.10.5 Наказу Міністерства оборони України № 100 від 23.02.2016 штурманський план польоту розробляється в довільній формі, на розсуд розробника плану та відповідно до тих вимог і задач, для вирішення яких планується політ. Нижче пропонується можливий варіант бланка розрахунку.

Пропонована форма бланка інженерно-штурманського розрахунку містить 3 таблиці.

У маршрутну (основну) таблицю вносять результати інженерно-штурманського розрахунку етапів польоту за кожною з ділянок.

У таблицю планування часу вносять час доби для початку розгортання БпАК на стартовій позиції,

час старту, час посадки, час завершення згортання. Якщо передбачається політ з проміжними посадками, то вноситься час проміжних посадок та стартів.

У таблицю планування енергоресурсів (зарядів бортових акумуляторних батарей) вносять розрахункові дані щодо потреби в енергоресурсах на здійснення польоту. Якщо передбачається політ з проміжними посадками, то вносяться дані про початкові (на момент старту) та кінцеві (на момент посадки) заряди бортових батарей. У цій же таблиці вказується кількість основних та резервних комплектів батарей, необхідних для виконання польотного завдання.

Інженерно-штурманський розрахунок польоту

Зона розвідки: _____

Дата старту: _____

Час старту: _____

Маршрутна таблиця

Ділянка	Координати початкової точки ділянки	Висота	Швидкість		Курс			Шлях	Час	Тривалість	Батарея, залишок	
			повітряна	шляхова	шляховий кут	кут знесення	курс-вий кут				кМ-год	%
			км/год	км/год	°	°						
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-	-10-	-11-	-12-	-13-
0-1												
1-2												
÷												
(N-1)-N												
N-0												
Всього:												

Таблиця планування часу

	План	Факт
Розгортання		
Зліт		
Вихід на ціль		
Відхід від цілі		
Посадка		
Згортання		
Всього:		

Таблиця планування енергоресурсів

	Витрата		Залишок	
	мА-год	мА-год	мА-год	%
Заряд батареї стартовий				
Передпольотна підготовка				
До виходу на ціль				
До відходу від цілі				
До посадки				
Невикористаний залишок				
Критичний залишок				
Комплектів батарей (основних + резерв):				

Розрахунок виконав _____

Рис. 2. Варіант форми бланка інженерно-штурманського розрахунку польоту

Таблиці планування часу та планування енергоресурсів заповнюються на основі даних із маршрутної таблиці.

У маршрутній таблиці для кожної ділянки виділяється окремий рядок, в який вписуються результати розрахунку для цієї ділянки.

Для ділянок, на яких відбувається зміна висоти, вказується висота польоту на початку ділянки та наноситься стрілка, яка вказує напрям зміни висоти польоту (приклад показано на рис. 2, стовпчик 3).

Для криволінійних ділянок маршруту у стовпчик 6 вноситься шляховий кут напряму з початкової точки ділянки на кінцеву точку ділянки. Після величини кута додається в дужках примітка (R). Стовпчики 7, 8 не заповнюються.

У стовпчики 12, 13 вноситься розрахунковий залишок заряду батареї після завершення проходження ділянки маршруту. (за 100% приймається номінальна ємність батареї. Фактична розрядна ємність батареї менша за паспортну – з врахуванням

поправочних коефіцієнтів на експлуатаційне старіння та вплив температури довкілля).

Під заповненою таблицею (в рядку “Всього:” вказується сумарна протяжність (шлях, земний) маршруту, сумарний час на проходження маршруту. Також вказується розрахунковий залишок заряду батареї після посадки.

За необхідності маршрутна таблиця виконується на декількох аркушах, таблиці планування часу та планування енергоресурсів можуть бути виконані на окремих аркушах.

Розрахунок основних елементів ділянок маршруту за впливу вітру

Управління польотом БПЛА (людиною чи автопілотом) ведеться так, щоб літальний апарат йшов вздовж заданого маршруту. Координати точок маршруту вказані відносно земної поверхні. Координати БПЛА під час польоту отримуються від бортової навігаційної системи. За наявності вітру під час проходження різних ділянок маршруту необхідно постійно вносити поправки до кута курсання БПЛА для компенсації знесення вітром. Через це тривалість проходження ділянок маршруту та витрата бортового енергоресурсу за наявності вітру буде інша, ніж при безвітряній погоді. Тому метою інженерно-штурманського розрахунку є визначення часу та витрат енергоресурсу на проходження різних ділянок маршруту за наявності вітру.

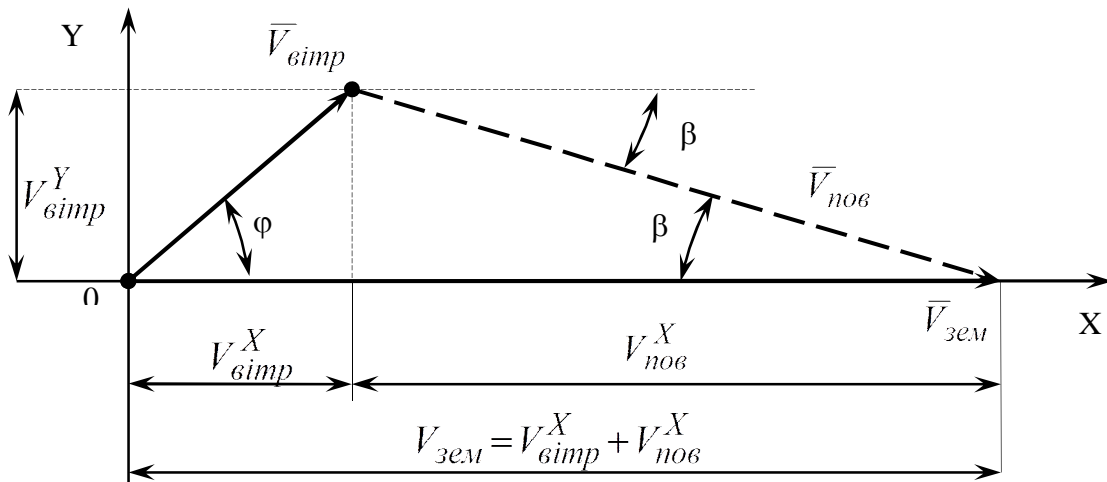


Рис. 3. Схема до розрахунку поправки на знесення БПЛА вітром

Величина шляхової (земної) швидкості БПЛА вздовж заданої лінії шляху повітряного судна

$$V_{зем} = V_{нов}^X + V_{вiмр}^X. \quad (6)$$

Для компенсування бокового знесення вітром кут курсання БПЛА повинен відрізнятись від курсового кута заданої лінії шляху на величину

$$\beta = \text{ArcCos} \left(\frac{V_{нов}^X}{V_{нов}} \right) = \text{ArcSin} \left(\frac{V_{вiмр}^Y}{V_{нов}} \right). \quad (7)$$

Для прямолінійної ділянки маршруту розрахунок виконується у послідовності:

- 1) визначається кут φ між напрямком заданої лінії шляху повітряного судна та напрямком вітру;
- 2) назначається повітряна швидкість БПЛА;
- 3) розраховується величина шляхової (земної) швидкості БПЛА та величина поправки на знесення вітром до кута курсу. Алгоритм виконання розрахунку пояснюється на рис. 3.

У системі координат X, Y вісь X суміщається із заданою лінією шляху БПЛА. Напрямок осі X приймається у напрямку польоту. Від початку координат відкладається вектор швидкості вітру під кутом φ до осі X.

Розраховуються величини проєкції вектора швидкості вітру на осі X, Y:

$$V_{вiмр}^X = V_{вiмр} \times \text{Cos} \varphi, \quad (2)$$

$$V_{вiмр}^Y = V_{вiмр} \times \text{Sin} \varphi. \quad (3)$$

Вектор повітряної швидкості (на рис. **Ошибка!** **Источник ссылки не найден.** показаний штриховою лінією) також може бути розкладений на проєкції на осі X, Y. Тоді, згідно з теоремою Піфагора

$$(V_{нов})^2 = (V_{вiмр}^Y)^2 + (V_{нов}^X)^2. \quad (4)$$

Звідси знаходиться величина проєкції вектора повітряної швидкості на вісь X

$$V_{нов}^X = \sqrt{(V_{нов})^2 - (V_{вiмр}^Y)^2}. \quad (5)$$

Затрати часу на проходження прямолінійної ділянки маршруту знаходяться діленням довжини ділянки $L_{зем}^{прям}$ на шляхову (земну) швидкість БПЛА

$$T = \frac{L_{зем}^{прям}}{V_{зем}}. \quad (8)$$

За цей час БПЛА пролітає у повітрі відстань

$$L_{нов}^{прям} = T \times V_{нов}. \quad (9)$$

Політ з набором висоти (рис. 4) вимагає додаткової потужності від силової установки БпЛА понад потужність, необхідну для горизонтального польоту (наявний запас додаткової потужності силової установки можна оцінити за паспортними даними БпЛА, порівнявши максимальну та крейсерську швидкості польоту).

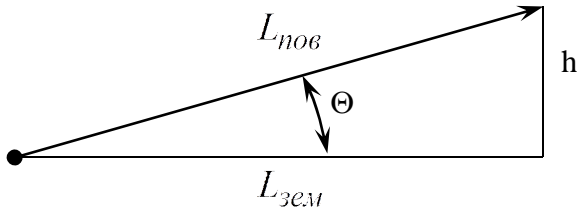


Рис. 4. Схема до розрахунку довжини ділянки набору висоти

Загалом набір висоти рекомендується здійснювати з кутом набору висоти $\Theta = 10 \div 15^\circ$ (при спробах набору висоти з більшим кутом та при недостатньому запасі потужності силової установки виникає можливість виходу БпЛА на критичний кут атаки із загрозою звалювання).

За відсутності вітру, для того, щоб піднятися на висоту h , літак повинен пролетіти у повітрі відстань

$$L_{нов} = \frac{h}{\sin(\Theta)}. \quad (10)$$

При цьому відносно землі літак переміститься на відстань

$$L_{зем} = L_{нов} \times \cos(\Theta) = h \times \operatorname{Ctg}(\Theta). \quad (11)$$

Час, необхідний для набору висоти

$$T_{(0-1)} = \frac{L_{нов}}{V_{нов}}. \quad (12)$$

При злеті проти вітру за той час, поки БпЛА набиратиме висоту, він буде знесений вітром на відстань

$$L_{вімп} = V_{вімп} \times T_{(0-1)}. \quad (13)$$

З врахуванням цього за час набору висоти h літак пролетить шлях

$$L_{(0-1)} = L_{зем} - L_{вімп}. \quad (14)$$

$$L_{(0-1)} = h \times \operatorname{Ctg}(\Theta) - \frac{V_{вімп}}{V_{нов}} \times \frac{h}{\sin(\Theta)}. \quad (15)$$

Земна (шляхова) швидкість на цій ділянці шляху становить

$$V_{зем} = \frac{L_{(0-1)}}{T_{0-1}}. \quad (16)$$

Для ділянки розвороту на кут 180° розрахунок виконується згідно зі схемою на рис. 5.

Розворот на 180° виконується для заходу на нову смугу ведення аерофотознімання, яка паралельна попередній смузі. Основним завданням виконання розрахунку є відшукування часу T , необхідного для виконання розвороту з врахуванням знесення вітром.

Через початкову та кінцеву точки дуги розвороту проводиться вісь X . Вектор вітру розкладається на складові $V_{вімп}^X$ та $V_{вімп}^Y$.

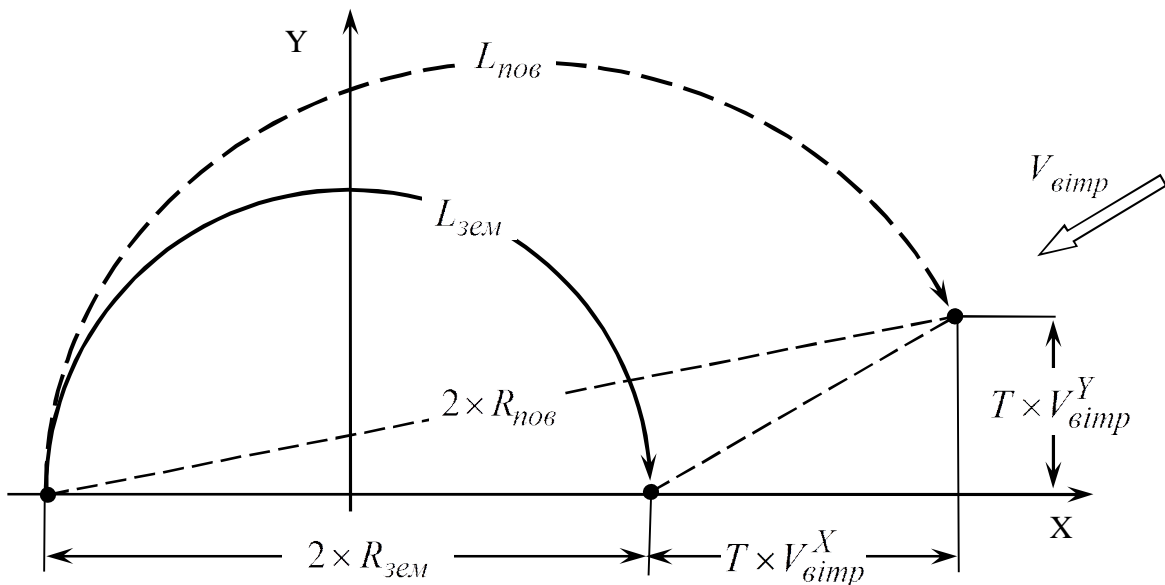


Рис. 5. Схема до розрахунку тривалості розвороту на 180°

Для здійснення розвороту БПЛА повинен пролетіти відносно землі шлях $L_{зем} = \pi \cdot R_{зем}$. Радіус дуги розвороту (відносно землі) приймається рівним половині ширини смуги сканування БПЛА – $R_{зем} = A'/2$.

Для компенсування знесення вітром за час виконання розвороту T БПЛА повинен пролетіти у повітрі шлях

$$L_{нов} = \pi \cdot R_{нов} = V_{нов} \cdot T, \quad (17)$$

У (17) вважається, що шлях $L_{нов}$ БПЛА пролітає по дузі радіусу $R_{нов}$

$$R_{нов} = \frac{V_{нов} \cdot T}{\pi}. \quad (18)$$

Згідно з теоремою Піфагора із розгляду прямокутного трикутника на рис. 5 виконується співвідношення

$$\begin{aligned} & \left(2 \times R_{зем} + T \times V_{вімп}^X\right)^2 + \left(T \times V_{вімп}^Y\right)^2 = \\ & = (2 \times R_{нов})^2 = \left(2 \times \frac{V_{нов} \cdot T}{\pi}\right)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

Після виконання перетворень отримується квадратне рівняння

$$\begin{aligned} & \left[\left(V_{вімп}^Y\right)^2 - \left(2 \times \frac{V_{нов}}{\pi}\right)^2 \right] \times T^2 + \\ & + \left(4 \cdot R_{зем} \cdot V_{вімп}^X\right) \times T + 4 \cdot R_{зем}^2 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Із розв'язку рівняння (20) знаходиться час T для виконання розвороту на 180° для виходу БПЛА на задану точку маршруту із компенсацією знесення вітром.

Розрахунок тривалості розвороту виконаний виходячи з того, що величина (але не напрям) повітряної швидкості БПЛА під час розвороту залишається сталою. Шляхова (земна) швидкість БПЛА вздовж ділянки розвороту буде змінною – відповідно до зміни кута між векторами вітру та повітряної швидкості БПЛА під час розвороту. Середнє значення шляхової швидкості на ділянці розвороту на 180° становить

$$V_{зем} = \frac{\pi \cdot R_{зем}}{T_{розв}}. \quad (21)$$

Наближений розрахунок тривалості повороту БПЛА на кут γ , відмінний від 180° , можна виконувати, застосувавши допущення, що тривалість повороту пропорційна куту повороту. Для цього:

- задається радіус $R_{зем}$ дуги повороту та кут повороту γ ;

- через початкову та кінцеву точки дуги повороту проводиться вісь X;

- виконується розрахунок часу розвороту на 180° (при заданих $R_{зем}$ та напрямку осі X).

Наближений час T_γ повороту на кут γ

$$T_\gamma = \frac{\gamma}{180} \times T_{180}. \quad (22)$$

Середнє значення шляхової швидкості на ділянці повороту на кут γ знаходиться діленням довжини дуги повороту на час виконання повороту

$$V_{зем} = \frac{\gamma}{180} \times \frac{\pi \cdot R_{зем}}{T_\gamma}, \quad (23)$$

Доступна енергоємність батареї

У ході тривалої експлуатації відбувається спрацювання батареї, тому її фактична енергоємність $C_{б.ф.}$ стає меншою за паспортну $C_{б.п.}$. При експлуатації БПЛА фактичну енергоємність визначають за показниками зарядного пристрою після повного заряду акумуляторної батареї.

При плануванні польоту необхідно враховувати, що при зміні температури довкілля відбувається зміна розрядної ємності $C_{б.р.}$ (кількості електричного заряду, яку при розряджанні віддає повністю заряджений акумулятор)

$$C_{б.р.} = k_t \times C_{б.ф.} \quad (24)$$

Значення поправочного коефіцієнта k_t , який враховує вплив температури довкілля, приймається згідно з таблицею 1.

Керівництва з льотної експлуатації БПЛА вимагають, щоб після завершення польоту залишався незнижуваний залишок заряду батареї не менше 20% від її паспортної енергоємності

$$C_{б.незн} = 0,2 \times C_{б.п.} \quad (25)$$

З врахуванням цього розрядна енергоємність батареї, доступна для використання на здійснення польотного завдання (включаючи передпольотну підготовку та перевірку БПЛА)

$$C_{б.дост.} = C_{б.р.} - C_{б.незн}. \quad (26)$$

Таблиця 1

Поправочний коефіцієнт впливу температури довкілля на розрядну ємність акумуляторної батареї

Температура довкілля, °C	≤ -10	≤ -5	≤ 0	≤ +5	≤ +15	≤ +35	≤ +40
k_t	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1	0,95
При $t \leq -25$ і при $t > +50$ політ заборонено							

Розрахунок енерговитрат на політ

Для розрахунку енерговитрат на політ бажано мати залежність (графік чи таблицю) сили споживаного струму від повітряної швидкості горизонтального польоту для конкретного БПЛА. Якщо така залежність відсутня, її можна отримати дослідним

шляхом при експлуатації БПЛА. Для орієнтовних розрахунків можна використовувати значення номінального струму $I_{ном}$ при горизонтальному польоті БПЛА на крейсерській швидкості. Отримати значення $I_{ном}$ можна, розділивши паспортну енергоємність батареї на максимальну тривалість польоту БПЛА, які вказуються у паспортних даних БПЛА.

На горизонтальних ділянках маршруту витрата заряду батареї на здійснення польоту протягом часу $T_{дil}$ становить

$$C_{дil} = k_V \times T_{дil} \times I_{ном}. \quad (27)$$

де k_V – швидкісний коефіцієнт, який враховує залежність питомих енерговитрат від фактичної повітряної швидкості польоту.

Сила аеродинамічного опору польоту БПЛА пропорційна квадрату повітряної швидкості польоту

$$Q \sim \xi \cdot \rho_{нов} \cdot \frac{V_{нов}^2}{2}. \quad (28)$$

Робота силової установки з переміщення БПЛА за одиницю часу знаходиться як добуток сили аеродинамічного опору на відстань, пройдену за одиницю часу (добуток сили на повітряну швидкість)

$$A = Q \times V_{нов} \sim \xi \cdot \rho_{нов} \cdot \frac{V_{нов}^3}{2}. \quad (29)$$

Величина виконаної роботи дорівнює кількості витраченої енергії. Тому згідно з (29) витрата енергії бортової акумуляторної батареї за одиницю польотного часу пропорційна кубові повітряної швидкості польоту. Звідси швидкісний коефіцієнт, який враховує залежність питомих енерговитрат від фактичної повітряної швидкості польоту

$$k_V \approx \left(\frac{V_{нов}}{V_{крейс}} \right)^3. \quad (30)$$

Формула (30) є наближеною, оскільки в ній не враховано, що коефіцієнт аеродинамічного опору ξ залежить від швидкості польоту.

При польоті з набором висоти вимагається виконання додаткової роботи ΔA на збільшення потенціальної енергії $\Delta\Pi$ літального апарата в гравітаційному полі

$$\Delta\Pi = m \cdot g \cdot \Delta h, \quad [\text{Дж}], \quad (31)$$

де: m – маса літального апарата, кг;

Δh – приріст висоти польоту, м;

$g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння.

Силова установка літального апарата включає в себе акумуляторну батарею, регулятор обертів основного електродвигуна, головний електродвигун, повітряний гвинт. Величина роботи ΔA , яку повинна виконати силова установка для збільшення

потенціальної енергії $\Delta\Pi$ літального апарата в гравітаційному полі

$$\Delta A = \frac{\Delta\Pi}{\eta_{бат} \times \eta_{р.об} \times \eta_{дв} \times \eta_{гв}}, \quad [\text{Дж}], \quad (32)$$

де: $\eta_{бат}$ – коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї;

$\eta_{р.об}$ – коефіцієнт корисної дії регулятора обертів двигуна;

$\eta_{дв}$ – коефіцієнт корисної дії електродвигуна;

$\eta_{гв}$ – коефіцієнт корисної дії повітряного гвинта.

Витрата заряду батареї на виконання додаткової роботи ΔA на збільшення потенціальної енергії $\Delta\Pi$ літального апарата в гравітаційному полі

$$C_{\Delta h} = 3,6 \times \frac{\Delta A}{U}, \quad [\text{мА}\cdot\text{год}], \quad (33)$$

де: U – напруга бортової батареї, вольт;

3,6 – коефіцієнт переведення у міліампер-години (ємність батарей БПЛА 1-го класу прийнято вимірювати у міліампер-годинах).

Витрата заряду батареї на політ за ділянкою з набором висоти

$$C_{дil} = k_V \times T_{дil} \times E_{ном} + C_{\Delta h}. \quad (34)$$

Для ділянок розвороту (повороту) розрахунок енерговитрат можна виконати за (27, 33, 34) – як для прямолінійних ділянок, з обов'язковим врахуванням енерговитрат на зміну висоти польоту.

Енерговитрати на роботу бортових оптико-електронних систем враховуються тільки для тих ділянок маршруту, на яких ці системи ввімкнуті в роботу. Енерговитрати за ділянкою розраховуються як добуток сили струму, споживаного для роботи оптико-електронної системи на тривалість польоту за ділянкою маршруту. Сила струму, споживана оптико-електронними системами, може бути визначена дослідним шляхом при експлуатації БПЛА.

Розрахунок критичного залишку бортового енергоресурсу

Критичний залишок бортового енергоресурсу $C_{кр}$ включає в себе ту кількість енергоресурсу $C_{нов}$, яка необхідна для повернення з найвіддаленішої точки маршруту за наявних метеорологічних умов та незнижуваний залишок $C_{б.незн}$, встановлений керівництвом з льотної експлуатації БпАК.

$$C_{кр} = C_{нов} + C_{б.незн}. \quad (35)$$

Якщо висота польоту БПЛА у найвіддаленішій точці менша за безпечну, то при розрахунку критичного

залишку до його складу включаються затрати розрядної ємності для набору безпечної висоти.

Розрахунок критичного залишку виконується до початку заповнення бланка інженерно-штурманського розрахунку.

При заповненні бланка інженерно-штурманського розрахунку польоту необхідно в кожному рядку маршрутної таблиці (для кожної ділянки маршруту), починаючи від моменту початку передпольотної підготовки, проводити підсумовування витрати бортового енергоресурсу та підраховувати його залишок. За 100% приймається паспортна розрядна ємність $C_{б.н.}$. Після планового завершення польоту розрахунковий залишок енергоемності батареї повинен бути не меншим незнижуваного залишку (25), встановленого керівництвом з льотної експлуатації БпАК.

Якщо при заповненні бланка виявиться, що розрахунковий залишок бортового енергоресурсу досягає критичного значення (35) до завершення польоту, то необхідно планувати повернення БпЛА на стартовий майданчик для здійснення проміжної посадки з метою поповнення бортового запасу енергоресурсу (заміни бортових батарей).

Під час проміжних посадок обов'язково передбачається зняття отриманої розвідувальної інформації з бортових носіїв інформації – заміна бортових карт пам'яті на незаповнені. При цьому кількість змінних карт пам'яті (чи їх комплектів) повинна відповідати кількості проміжних посадок для поповнення бортового запасу енергоресурсу.

Скорочений інженерно-штурманський розрахунок

Скорочений інженерно-штурманський розрахунок включає:

- розрахунок висоти нижньої межі хмар та розрахунок вірогідності обмерзання за умов метеопрогнозу на час виконання польоту;

- розрахунок розрядної та доступної енергоемності акумуляторної батареї при метеорологічних умовах на час виконання польоту;

- визначення найвіддаленішої точки маршруту польоту;

- розрахунок часу на повернення з найвіддаленішої точки маршруту при метеорологічних умовах на час виконання польоту;

- розрахунок критичного залишку бортового енергоресурсу (35) для повернення з найвіддаленішої точки маршруту;

- порівняння доступної енергоемності та критичного залишку енергоресурсу, орієнтовна оцінка потреби в додаткових акумуляторних батареях, оцінка можливостей виконання польотного завдання в цілому.

Висновки

Розглянуто задачу розроблення маршрутів та штурманських планів польотів БпЛА 1-го класу та виконання їх інженерних розрахунків.

Визначено обсяг штурманських та інженерних розрахунків, виконання яких необхідне для розроблення маршруту та складання штурманського плану польоту БпЛА 1-го класу.

Запропоновано методику виконання інженерно-штурманських розрахунків польотів, точність яких задовольняє умовам застосування малих БпЛА, та складність математичного апарату яких не виходить за межі загальної середньої освіти, що відповідає вимогам до освітнього рівня операторів БпЛА 1-го класу. Розглянуто варіанти виконання повного та скороченого інженерно-штурманського розрахунку.

Викладена методика передбачає виконання розрахунків у “ручному режимі” і орієнтована на застосування для навчальних цілей при підготовці екіпажів БпЛА.

Для практичного застосування алгоритми виконання інженерно-штурманських розрахунків повинні бути вбудовані до програмного забезпечення пунктів дистанційного пілотування та виконуватись автоматично при плануванні маршрутів польотів. Під час польоту автоматично повинні виконуватись коригувальні розрахунки при зміні поточних метеорологічних умов чи внесенні змін до маршруту.

Список літератури

1. Наказ Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661 “Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України”.
2. Наказ Міністерства оборони України від 23.02.2016 № 100 “Про затвердження Правил штурманського забезпечення польотів державної авіації України”.
3. Український гідрометеорологічний центр. Інформаційний сервер погоди. Клімат по станціях. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/
4. Ткачук П., Коцемир О., Соколовський С., Білоус Д. Врахування реальних метеорологічних умов при плануванні польотного завдання безпілотного літального апарата. *Військово-технічний збірник*. 2021. Львів. № 25. С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.54-60>
5. Пашенцев С.В. Задача Цермело: аналитическое решение для вихревого поля скоростей. *Вестник МГТУ*. Мурманск, 2000. т. 3. № 1. С. 17–22.
6. Ashwini Ratnoo, P.B. Sujit, Mangal Kothari, Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011. Volume 44, Issue 1. pp. 12985-12990. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03720>

7. Bijlsma Sake J. Optimal aircraft routing in general wind fields. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2009. 32.3: pp. 1025-1029.

8. Bin Li, Chao Xu, Kok Lay Teo, Jian Chu. Time optimal Zermelo's navigation problem with moving and fixed obstacles. *Applied Mathematics and Computation*. 2013. Volume 224. pp. 866-875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.08.092>

9. Brossard Martin, Condomines Jean-Philippe, Bonnabel Silvère. Tightly Coupled Navigation and Wind Estimation for Mini UAVs. *Guidance, Navigation and Control Conference*. 2018. 20 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2018-1843>

10. Gustavo Toledo De Azevedo, Pedro Augusto Queiroz De Assis, Vandiberto Pereira Pinto and Roberto Kawakami Harrop Galvão. Pseudospectral Optimisation of UAV Trajectories for Minimal Battery Consumption in the Presence of a Wind Field. *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, 2018. pp. 272-276. DOI: <https://doi.org/10.1109/CONTROL.2018.8516807>

11. Guerrero J.A., Bestaoui Y. UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments. *Intell Robot Syst.* 2013. № 69, pp. 297-311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9778-2>

12. Jardin M.R., Bryson Jr. A.E. Methods for computing minimum-time paths in strong winds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Volume 35, Issue 1, January-February 2012, pp. 165-171. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.53614>

13. Je Hyeon Lee, Hakki Erhan Sevil, Atilla Dogan, David Hullender. Estimation of maneuvering aircraft states and time-varying wind with turbulence. *Aerospace Science and Technology*. 2013. Volume 31, Issue 1. pp. 87-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.09.009>

14. Nicoleta Aldea, Piotr Kopacz. Time-optimal navigation in arbitrary winds. *Annual Reviews in Control*. 2020. Volume 49. pp. 164-172. ISSN 1367-5788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.002>

15. Rhudy Matthew, Gross Jason, Gu Yu. Stochastic Wind Modeling and Estimation for Unmanned Aircraft Systems. *AAA Aviation 2019 Forum*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-3111>

16. Бойове застосування безпілотного авіаційного комплексу "Лелека-100". Військова тактична публікація підрозділам розвідки Сухопутних військ Збройних Сил України щодо застосування безпілотного авіаційного комплексу "Лелека-100".

17. Мирончук Ю.А., Оверчук С.П. Методика підготовки і планування повітряної розвідки на оперативнотактичну глибину з використанням БПЛА. *Військово-технічний збірник*. Львів: НАСВ, 2019. № 21. С. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.44-52>

References

1. (2016), "Nakaz Ministerstva obrony Ukrainy vid 08.12.2016 № 661 «Pro zatverdzhennya Pravyl vykonannya pol'otiv bezpilotnyumu aviatsiynumu kompleksamy derzhavnoyi aviatsiyi Ukrainy»" [Order of the Ministry of Defense of Ukraine dated 08.12.2016 № 661 «On approval of the Rules for the execution of flights by unmanned aircraft complexes of the state aviation of Ukraine»]. [in Ukrainian]

2. (2016), "Nakaz Ministerstva obrony Ukrainy vid 23.02.2016 № 100 «Pro zatverdzhennya Pravyl shturmans'koho zabezpechennya pol'otiv derzhavnoyi

aviatsiyi Ukrainy»" [Order of the Ministry of Defense of Ukraine dated 23.02.2016 № 100 "On approval of the Rules for navigational support of flights of the state aviation of Ukraine"]. [in Ukrainian]

3. "Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy tsentr. Informatsiynnyy server pohody. Klimat po stantsiyakh" [Ukrainian hydrometeorological center. Weather information server. Climate by stations]. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/ [in Ukrainian]

4. Tkachuk P., Kotsemir O., Sokolovsky S. and Bilous D. (2021), "Vrakhuvannya real'nykh meteorolo-hichnykh umov pry planuvanni pol'otnoho zavdannya bezpilotnoho lital'noho aparata" [Consideration of real meteorological conditions when planning the flight task of an unmanned aerial vehicle]. *Military and technical collection*. Lviv, 2021. No. 25. pp. 54-60. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.54-60/> [in Ukrainian].

5. Pashentsev S.V. (2000), "Zadacha Tsermelo: analytycheskoe reshenye dlya vykhrevoho polya skorostey" [The Zermelo problem: an analytical solution for the vortex field of velocities]. *Vest-nik of the MSTU*. Murmansk. Vol. 3, No. 1, pp. 17-22. [in Russian].

6. Ashwini Ratnoo, P.B. Sujit and Mangal Kothari. (2011), Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights. *IFAC Proceedings Volumes*. Volume 44, Issue 1. pp. 12985-12990. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03720>

7. Bijlsma Sake J. (2009), Optimal aircraft routing in general wind fields. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 32.3. pp. 1025-1029.

8. Bin Li, Chao Xu, Kok Lay Teo and Jian Chu. (2013), Time optimal Zermelo's navigation problem with moving and fixed obstacles. *Applied Mathematics and Computation*. Volume 224. pp. 866-875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.08.092>.

9. Brossard Martin, Condomines Jean-Philippe and Bonnabel Silvère. (2018), Tightly Coupled Navigation and Wind Estimation for Mini UAVs. *Guidance, Navigation and Control Conference*. 20 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2018-1843>

10. Gustavo Toledo De Azevedo, Pedro Augusto Queiroz De Assis, Vandiberto Pereira Pinto and Roberto Kawakami Harrop Galvão. (2018), Pseudospectral Optimisation of UAV Trajectories for Minimal Battery Consumption in the Presence of a Wind Field. *2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL)*, pp. 272-276. DOI: <https://doi.org/10.1109/CONTROL.2018.8516807>

11. Guerrero J.A. and Bestaoui Y. UAV Path Planning for Structure Inspection in Windy Environments. *J Intell Robot. Syst* 69, pp. 297-311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9778-2>

12. Jardin M.R. and Bryson Jr. A.E. (2012), Methods for computing minimum-time paths in strong winds. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Volume 35, Issue 1. pp. 165-171. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.53614>

13. Je Hyeon Lee, Hakki Erhan Sevil, Atilla Dogan and David Hullender. (2013), Estimation of maneuvering aircraft states and time-varying wind with turbulence. *Aerospace Science and Technology*. Volume 31, Issue 1. pp 87-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2013.09.009>

14. Nicoleta Aldea and Piotr Kopacz. (2020), Time-optimal navigation in arbitrary winds. *Annual Reviews in Control*. Volume 49. pp. 164-172, ISSN 1367-5788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.04.002>

15. Rhudy Matthew, Gross Jason and Gu Yu. (2019), Stochastic Wind Modeling and Estimation for Unmanned Aircraft Systems. *AIAA Aviation 2019 Forum*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2019-3111>

16. "Boyove zastosuvannya bezpilotnoho aviatsiy-noho kompleksu "Leleka-100" : Viys'kova taktychna publikatsiya pidrozdilam rozvidky Sukhoputnykh viys'k Zbroynykh Syl Ukrainy shchodo zastosuvannya bezpilot-noho aviatsiy-noho

kompleksu "Leleka-100" [Combat use of the "Stork-100" unmanned aircraft complex : Military tactical publication to the intelligence units of the Ground Forces of the Armed Forces of Ukraine regarding the use of the "Stork-100" unmanned aircraft complex]. [in Ukrainian].

17. Myronchuk Y.A. and Overchuk S.P. (2019), "Metodyka planuvannya i pidgotovky povitryanoi rozvidky na operatyvno-taktychnomu rivni z vykorystannyam BPLA" [Methods of preparation and planning of air reconnaissance for operational and tactical depth using UAVs]. *Military Technical Collection*. Lviv, 2019. Issue 21. pp. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.21.2019.44-52> [in Ukrainian].

ENGINEERING AND NAVIGATING CALCULATION THE FLIGHT OF UNMANNED AIRCRAFTS OF TACTICAL CLASS

Yu. Myronchuk, S. Overchuk, A. Tkach

The regulatory documents of the Ministry of Defense of Ukraine provide for navigational training of the crews of unmanned aircraft complexes and establish the necessity of having a navigational plan and an engineering-navigator flight calculation at the workplace of an external UAV pilot. The article notes that today there are no normative documents that would establish the content and scope of engineering and navigational calculations and methods of their implementation for unmanned aircraft complexes of tactical classes. The article as a whole is devoted to the consideration of issues of methodical support of navigator training of crews of unmanned aerial systems of the tactical class with an electric power plant. It is indicated that, based on the tactical and technical capabilities of UAVs of tactical classes, the nature of the tasks performed by them and the typical educational level of their external pilots, the creation of the most simplified methodology for performing basic engineering and navigational calculations of UAV flights is required. The mathematical complexity of such a method should not go beyond general secondary education. When performing navigational calculations of aircraft flights, the main difficulty is created by the problem of taking into account the influence of the wind. Simple algorithms for calculating the correction to the wind drift course, road speed and flight duration on straight sections of the route and sections of U-turns in the presence of wind are proposed. Algorithms for calculating the total need for energy resources for a flight along a given route and for separate sections of the route, including additional energy resource needs for sections of altitude gain, are proposed. Recommendations for evaluating the energy capacity of the battery available for flight performance are given. An algorithm for calculating the critical reserve of energy resources, which is necessary for the possibility of returning the UAV from the farthest point of the route under meteorological conditions for the scheduled flight time, is proposed. Options for full and abbreviated engineering and navigational calculations are offered.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, flight route planning, navigation triangle, navigator's calculation, energy consumption per flight.*

УДК 355.4, 623.626

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.53-60>

І.І. Танцюра, К.В. Коритченко, О.В. Стаховський, В.А. Шматков, О.П. Клімов, О.В. Лінивцев

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків

Article history: Received 06 February 2023; Revised 14 February 2023; Accepted 31 March 2023

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ АЕРОЗОЛЮ З ГРАФІТУ МАРКИ ГВ-50/12 У СИЛОВІЙ УСТАНОВЦІ ТАНКА ТИПУ Т-64Б

У роботі представлено результати експериментального дослідження властивостей графіту марки ГВ-50/12 та вимірювання термічних параметрів газового потоку у силовій установці танка типу Т-64Б щодо формування аерозолю з графіту, що спучується. Розкрито спосіб удосконалення термічної димової апаратури, що полягає у введенні графітового порошку до обвідних газоходу силовій установці танка типу Т-64, з подальшим виходом аерозольної хмари з силовій установці танка. Експериментальне дослідження розкладалось на дві складові: дослідження коефіцієнту спучення графіту ГВ-50/12; дослідження