

А.О. Константинов¹, О.Б. Леонтьєв¹, А.Г. Дмитрієв¹, Д.С. Печура²

¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, Харків, Україна

²Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИЦІЛЬНО-НАВІГАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ БАЛІСТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АВІАЦІЙНИХ БОМБ ЗІ СКЛАДНОЮ БАЛІСТИЧНОЮ СХЕМОЮ

У статті розглядається методичний підхід визначення балістичних характеристик авіаційних бомб зі складною балістичною схемою для введення у прицільно-навігаційні комплекси ударних літальних апаратів. Розглядається алгоритм визначення повної системи числових балістичних характеристик, які узгоджені за відносом. Запропонований методичний підхід дозволяє за допомогою узгоджених балістичних коефіцієнтів розрахувати функцію умов бойового застосування, що задані для конкретної області та відповідного авіаційного засобу ураження. Надалі, використовуючи процедури, які моделюють існуючі балістичні таблиці, за допомогою прив'язки знаходять необхідні еквівалентні балістичні характеристики. Сукупність відповідних характеристик дозволяє вирішити завдання прицілювання під час бомбометання у всіх наявних та перспективних прицільно-навігаційних комплексах ударних літальних апаратів.

Ключові слова: авіаційна бомба, балістичні характеристики, прицільно-навігаційний комплекс, літальний апарат.

Вступ

Постановка проблеми. Досвід бойових дій свідчить, що ефективність застосування некерованих авіаційних бомб залежить від багатьох чинників [1, с. 84, 85]. Одним з них є точність вирішення задачі прицілювання, а саме вирішення балістичних задач для забезпечення прицільно-навігаційних комплексів (ПрНК) бойових авіаційних комплексів балістичними характеристиками авіаційних бомб.

Вирішення балістичних задач дозволяє визначити:

вихідні дані для прицілювання вручну у випадку відмови прицільної системи;

поправки для особливих умов бойового застосування (перевищення цілі над рівнем моря, істотні відхилення від норми атмосферних умов тощо);

поправки для прицільного застосування засобів ураження зі складною балістичною схемою;

розміри зон накриття касетних боєприпасів і звичайних авіаційних бомб під час серійного застосування;

час дистанційної дії підривачів засобів ураження тощо [2, с. 59...64].

В якості прикладу у статті розглядається вирішення балістичних задач для авіаційних бомб зі складною балістичною схемою, що призначені для ураження сил і засобів противника на широких площах, зокрема, це стосується сил ворога, які перебувають у щільній обороні, і на тих ділянках фронту, де ворог намагається наступати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з елементів балістичного забезпечення

ПрНК є система балістичних характеристик авіаційних бомб для вирішення задачі прицілювання. Для авіаційних бомб зі складною балістичною схемою (АБ) у систему балістичних характеристик входять [2, с. 54...58]:

балістичні характеристики АБ на кожній i -ій ділянці траєкторії, які приводяться у формі балістичного коефіцієнту C_i , або характеристичного часу Θ_i , чи характеристичної швидкості ϑ_{Θ_i} та інші;

еквівалентні балістичні характеристики ($C_e, \Theta_e, \vartheta_e$ та інші) для ПрНК, балістична задача в яких вирішується на основі методу готових рішень;

закони опору АБ $C_{xe}(M)$, на i -ій ділянці траєкторії по відношенню до яких визначені балістичні характеристики $C_i, \Theta_i, \vartheta_{\Theta_i}$ та індивідуальні залежності $C_x(M)$ по ділянкам;

система параметрів, які визначають межі ділянок траєкторії (t_i – час руху до кінця i -ої ділянки, y_i – висота на кінцевій i -ій ділянці).

Система балістичних характеристик повинна забезпечувати точний розрахунок відносу АБ. Але, оскільки прицільна система є моделлю істинної динаміки руху АБ, більш-менш наближеної, тому на систему балістичних характеристик покладається задача непрямого урахування розходження моделі з дійсною динамікою АБ. Відповідне врахування повинно виконуватися на основі достовірних даних про елементи траєкторії АБ. Найбільш доцільним убагацьється його представлення інтегральним узгодженням розрахункових елементів траєкторії з фактичними

елементами траєкторії, які отримуються під час проведення натурних випробувань. За допомогою узгоджених балістичних характеристик, які вводяться в ПрНК, значною мірою усуваються помилки, викликані такими факторами, як відмінність індивідуальної залежності $C_x(M)$ від закону опору, особливості умов відділення АБ, коливання АБ, неврахування динаміки переходу з однієї ділянки на іншу тощо, чим забезпечується мінімальний промах на землі [2, с. 65...69].

З огляду на те, що балістична задача в існуючих ПрНК вирішується як за методом готових рішень на базі різноманітних балістичних таблиць, так і за методом числового інтегрування системи диференціальних рівнянь із використанням різноманітних законів опору, виникає практична необхідність визначення числових балістичних характеристик, які належать до всіх діючих видів балістичних таблиць [3, с. 45...50].

Слід акцентувати увагу, що на теперішній час інформація щодо проведених досліджень та розрахунків про повну систему числових балістичних характеристик для АБ зі складною балістичною схемою відсутня. Існуючі дані не в повній мірі відповідають реальному діапазону їх бойового застосування [2, с. 59, 60]. Крім того, ці дані мають індивідуальний характер у зв'язку з тим, що визначалися не за всією сукупністю існуючої експериментальної інформації.

Тому розробка методики та алгоритму визначення повної системи числових балістичних характеристик авіаційних бомб зі складною балістичною схемою з використанням максимально наявної інформації про їх натурні випробування є **актуальним науково-технічним завданням**.

Мета статті – розробка методичного підходу щодо забезпечення прицільно-навігаційних комплексів сучасних ударних літальних апаратів балістичними характеристиками авіаційних бомб зі складною балістичною схемою.

Виклад основного матеріалу

Враховуючи те, що всі форми представлення балістичних характеристик $(C_i, \theta_i, \vartheta_0)$ пов'язані між собою відомими аналітичними або табличними залежностями надалі буде розглядатися методика визначення балістичних коефіцієнтів узгоджених по відносу.

Зробимо припущення, що траєкторія АБ зводиться до схеми двох ділянок, тобто перехід з однієї ділянки на іншу здійснюється миттєво із заміною балістичного коефіцієнту C_1 на C_2 . Задача зводиться до узгодження розрахункового A_p та експериментального A_e відносів за деяким критерієм.

Для узгодження використаємо метод максимальної правдоподібності, який у дослідженнях різноманітних задач є одним із найефективніших методів оцінювання невідомих параметрів [4, с. 4, 5].

Далі визначимо вектор балістичних та часових характеристик $\bar{C}(C, C_{xe}(M), C_1, \dots, C_n, t_1, y_1)$, звертаючий в максимум функцію правдоподібності $\{L(a_1, a_2, \dots, a_n)\}_{\max}$.

Вважаючи, що складові вектора експериментальних відносів незалежні та нормальні

$$A_{ei} \in N(a_{pi}(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K}), \sigma_i) \quad (1)$$

де $a_{pi}(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})$ – математичне очікування A_{ei} ; σ_i – середня квадратична помилка вимірювання відносу; $\bar{A}_e(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})$ – вектор експериментальних відносів; $\bar{A}_p(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})$ – вектор розрахункових відносів, які визначаються ПрНК або балістичними таблицями; $\bar{X}(H, V_{o1}, \lambda_{o1})$ – вектор початкових умов; $\bar{C}$ – вектор балістичних та часових характеристик; $\bar{K}(y_1, y_k)$ – вектор кінцевих (граничних) умов; H, V_{o1}, λ_{o1} – висота, швидкість та кут скидання АБ відповідно; y_1, y_k – висота траєкторії АБ у точці переходу та в кінці траєкторії відповідно, функцію правдоподібності представимо як:

$$L(\bar{a}_e) = \psi e^{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_{ei} - a_{pi}(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})}{\sigma_i} \right)^2}, \quad (2)$$

$$\text{де } \psi = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}}.$$

Оскільки максимум функції правдоподібності незалежно від значення ψ досягається при мінімумі показника експоненти:

$$Q = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_{ei} - a_{pi}(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})}{\sigma_i} \right)^2 \right\}_{\min_{\bar{C}}}, \quad (3)$$

то, за наведених припущень, метод максимальної правдоподібності зводиться до методу найменших квадратів [5, с. 439...451; 6, с. 68...73].

По суті [4, с. 4, 5; 5, с. 439...451] потрібний вектор може бути визначений розв'язанням відповідної системи:

$$\frac{\partial Q}{\partial C_i} = 0; (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Так як функція $a_{pi}(\bar{X}, \bar{C}, \bar{K})$, що виражається системою диференціальних рівнянь руху центру маси

АБ [1, с. 45...50], у загальному випадку нелінійна відносно $\bar{C}$, то пошук параметрів $C_1, \dots, C_m$ безпосередньо виявляється занадто громіздким. Проведені дослідження показують, що більш ефективними будуть методи пошуку екстремуму багатопараметричних функцій.

При цьому треба розуміти, що під час проведення натурних випробувань АБ виникає ряд труднощів у отриманні необхідних даних для безпосереднього застосування вказаного критерію. Отже, в критерії узгодження повинні бути використані дисперсії експериментальних відносінь, які обумовлюються помилками проведення телеметрії, а також дією деякої кількості перешкод (відхилення атмосферних умов від нормальних, мінливість вітру тощо). Такого роду інформація під час проведення випробувань зазвичай не фіксується і відновлення її з достатньою достовірністю неможливе. Проте подальші дослідження за умовою (3) без врахування експериментальних даних видаються неправомірними, оскільки окремі вимірювання явно не є точними. Тому в таких умовах втрачені значення σ_i^2 замінюються нормативними дисперсіями, які розраховуються у відповідності з конкретними умовами висоти та швидкості (H, V_{oi}) за кожним експериментом, що дозволяє проводити ранжування даних максимально якісно [4, с. 27...31].

Слід зазначити, що частина інформації про умови та результати експерименту потребує суттєвої переробки перед введенням її у відповідний алгоритм, що буде працювати за критерієм (3). Насамперед це стосується даних про відносінь $\bar{A}_e$, які в процесі експерименту перераховуються, як правило, у масив характеристичних часів $\bar{\Theta}_e$, які рахуються за балістичними таблицями, і тому є потреба у зворотному перерахунку в масив даних $\bar{A}_e$. Також дуже часто відсутня повна інформація про елементи траєкторії АБ у точці переходу на іншу ділянку що представляються тільки у вигляді масиву висот переходу $\bar{y}_i$ або у вигляді масиву часу переходу $\bar{t}_i$.

Розглянемо деякі особливості побудови алгоритму визначення повної системи числових балістичних характеристик та результати його роботи на прикладі розрахунків системи числових балістичних характеристик разових бомбових касет (РБК). Повна система характеристик цих об'єктів, а саме вектор $\bar{C}$ включає в себе балістичні коефіцієнти РБК на першій та другій ділянках траєкторії C_1 та C_2 , а також еквівалентний

балістичний коефіцієнт C_e , узгоджений по відносу центру зони накриття РБК.

Особливістю касет є те, що час t_i переходу на другу ділянку по змісту є балістичною характеристикою, а по місцю у відповідному алгоритмі вихідною умовою, такою ж як $H, \vartheta_{o1}, \lambda_{o1}$, у зв'язку з тим, що час задається встановленням дистанційного підричника.

Якісний та числовий аналіз показують унімодальність критерію Q по відношенню до аргументів C_1 та C_2 (рис. 1), що дозволяє застосувати достатньо простий послідовний спосіб пошуку екстремуму [7, 8].

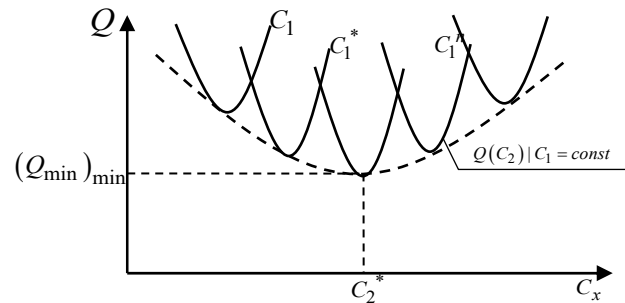


Рис. 1. Унімодальність критерію

Джерело: розроблено авторами

Отже, відбулася побудова залежності критерію від другого коефіцієнту $Q(C_2) | C_1 = const$ при фіксованому першому, потім залежність мінімумів критерію від першого коефіцієнту $Q_{min}(C_1)$ при локальних оптимумах другого та відповідну функцію $C_2(C_1)$. За допомогою останніх функцій знаходяться потрібні значення C_1^* , C_2^* та $(Q_{min})_{min}$.

Еквівалентні балістичні характеристики, наприклад C_e , які забезпечують співпадіння розрахункових і фактичних кінцевих елементів траєкторії, потрібні для вводу в ПрНК, засновані на методі готових рішень [2, с. 66, 67].

Суть можливої методики їх розрахунків складається з того, що знаючи узгоджені балістичні коефіцієнти C_1^* та C_2^* можливо розрахувати $A_p(H, V_{oi}, \lambda_{o1}, t_i)$ як функцію умов бойового застосування $(H, V_{oi}, \lambda_{o1}, t_i)$, що задані для конкретної області та РБК. Потім, використовуючи процедури, які моделюють існуючі балістичні таблиці, за допомогою прив'язки знаходять необхідні еквівалентні балістичні характеристики.

При цьому простіше спочатку розрахувати еквівалентні балістичні коефіцієнти $C_e(H, V_{oi}, \lambda_{o1}, t_i)$, а потім на підставі відповідних визначень переводити ці коефіцієнти в інші форми балістичних характеристик.

Так, наприклад, характеристичний час знаходиться за процедурами, які моделюють ті чи інші таблиці. Проводиться розрахунок часу падіння бомби зі знайденими значеннями балістичних коефіцієнтів c_e та початковими умовами, які відповідають класичному визначенню характеристичного часу $H = 2000\text{ м}$, $\vartheta_{oi} = 40\text{ м/с}$, $\lambda_{oi} = 0$.

Характеристична швидкість визначається за відомим відношенням [3, с. 60]:

$$\vartheta_{oi} = \sqrt{\frac{8000g_0}{\pi\rho_{N0}C_e}}. \quad (5)$$

Спрощена блок-схема розглянутого алгоритму визначення повної системи числових балістичних характеристик, які узгоджені по відносу, наведена на рисунку 2.

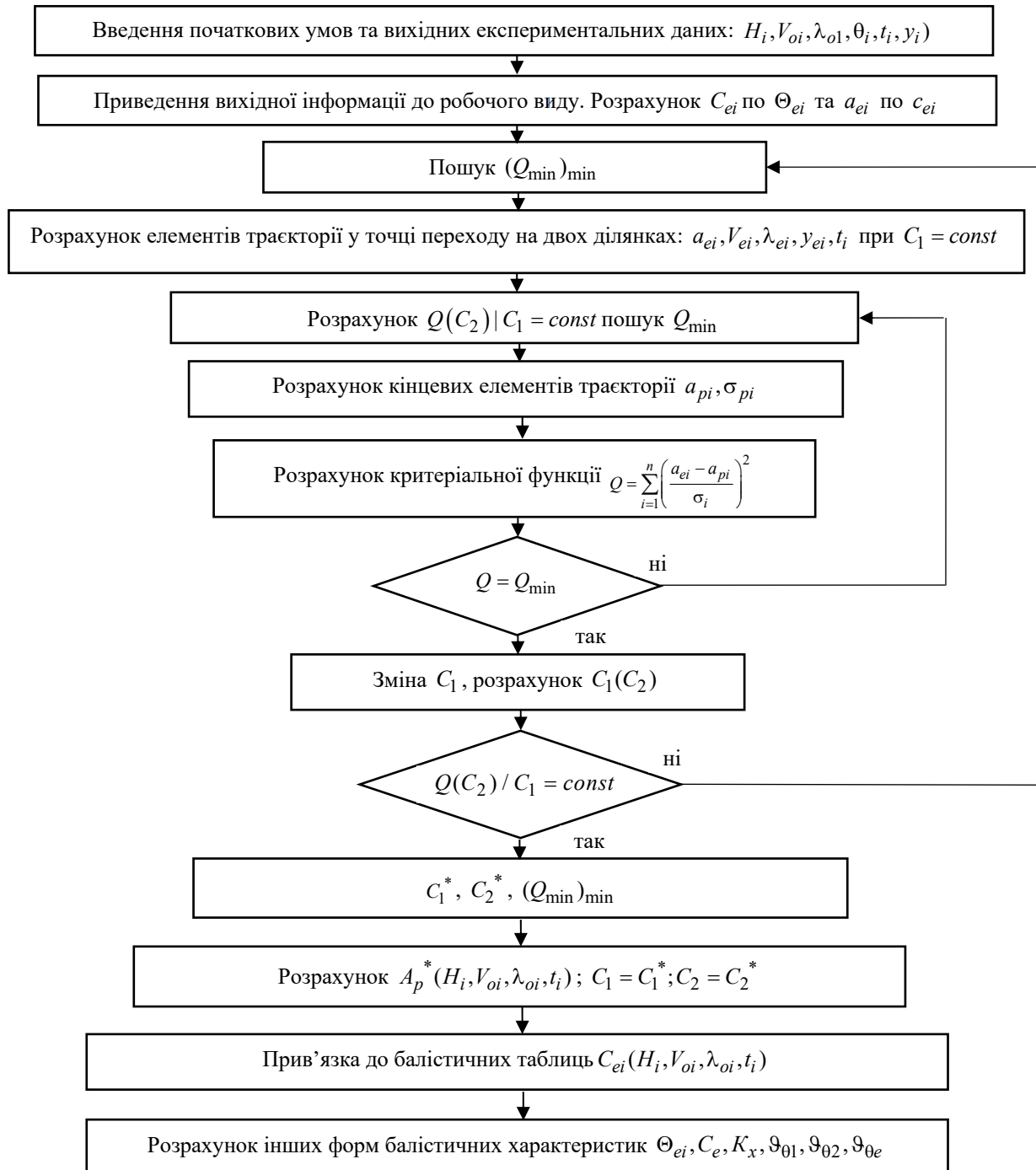


Рис. 2. Блок-схема алгоритму визначення повної системи числових балістичних характеристик
Джерело: розроблено авторами

Статистичні дані для РБК наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Вхідні дані до розрахунків

№ з/п	$H, м$	$V_1, км/год$	$y_1, м$	$t_1, с$	$(\Theta_K)_{64}, с$	$(\Theta_e)_{64}, с$
1.	464	902	288	5,3	26,97	29,74
2.	506	1096	279	4,9	25,37	25,64
3.	466	781	366	6,8	26,34	25,86
4.	656	926	229	7,3	24,84	24,67
5.	1051	880	443	11,7	23,86	23,52
6.	1020	1104	450	12,5	23,97	23,62
7.	1021	1017	345	12,9	23,34	23,12
8.	659	1068	199	6,8	24,98	24,61
9.	684	948	422	6,4	26,30	25,32

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки проводились шляхом моделювання в математичному середовищі MathCad.

Обробивши наведені статистичні дані за допомогою запропонованого алгоритму (рис. 2) отримано результати, які представлені у таблиці 2 і таблиці 3 відповідно.

Значення C_1^* , які розраховувалися по даним t_1 та y_1 , співпадають, а відповідне значення C_1^* різне. Але, оскільки відповідне значення критеріальної функції також суттєво відрізняється, то результат визначається по найменшому значенню $(Q_{\min})_{\min}$.

Таблиця 2

Балістичні характеристики РБК, узгоджені по відносу центру зони накриття

Тип АЗУ	Тип балістичних таблиць					
	БТ-64		БТ-86			
	C_0	K_x	C_1	C_2	ϑ_{01}	ϑ_{02}
РБК	0,0267	7,36	0,942	6,93	220	69

Джерело: розроблено авторами

Список літератури

1. В.М. Петров, А.А. Шалигін, А.Ф. Кудрявцев. Методичний підхід до рішення задачі прицілювання для скидання вільнопадаючих вантажів з безпілотних літальних апаратів. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2020. № 1(38). С. 84-90.
2. А. О. Константинов, О. М. Баранік. Зовнішня балістика. Ч. 1 Теоретичні основи авіаційної зовнішньої балістики. Харків: ХНУПС. 2022. – 320 с.
3. Шейгас А.К. Факторы, влияющие на элементы траектории бомбы: учет в перспективных системах бомбометания. 36. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил. 2014. № 3 (40). С. 44-46.
4. А. О. Константинов, Д. О. Васильченко, І. М. Ключніков. Зовнішня балістика. Ч. 2. Балістичне забезпечення авіаційних засобів ураження. Харків: ХУПС. 2016. – 359 с.
5. Я. С. Бондаренко, Д. О. Рачко, А. О. Розливан. Посібник до вивчення дисципліни "Імовірнісні графічні моделі" Ч. 2. Навчання байєсівської мережі. Дніпро: ДНУ імені Олеса Гончара. 2020. – 36 с.
6. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика. – Київ: ВПЦ Київський університет, 2007. – 504 с.
7. Weisstein E. "Unimodal." From MathWorld--A Wolfram Web Resource: веб-сайт. URL. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://mathworld.wolfram.com/Unimodal.html> (дата звернення 01.11.2024).
8. Одновимірна оптимізація (методи виключення) веб-сайт. URL. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://optymalizacja.w8.pl/Jednowymiarowa.html>.

Таблиця 3

Еквівалентні балістичні характеристик РБК, узгоджені по відносу центру зони накриття

$H, м$	$t_1, с$	Тип балістичних таблиць					
		БТ-52		БТ-64		БТ-86	
		C	Θ	C	Θ	C	Θ
500	2	6,81	30,73	6,63	30,96	3,43	77
500	6	2,82	24,76	2,77	24,87	1,41	120
500	10	1,83	23,18	1,80	23,25	0,91	150
600	2	7,09	31,12	6,89	31,35	3,57	76
600	6	3,1	25,20	3,04	25,32	1,55	115
1000	6	3,89	26,44	3,81	26,58	1,96	102

Джерело: розроблено авторами

В залежності від повноти і якості вхідної інформації узгоджені балістичні коефіцієнти за ділянками можуть визначатися аналогічно або з використанням даних тільки про час руху на першій ділянці t_1 , або з використанням даних тільки про висоту розкриття РБК y_1 .

Висновки

Таким чином, розглянуті методика та алгоритм дозволяють визначити повну сукупність узгоджених числових балістичних характеристик для АБ зі складною балістичною схемою на основі обробки всієї інформації про експеримент. Така сукупність характеристик дозволяє вирішити задачу прицілювання при бомбометанні в існуючих ПрНК ударних літальних апаратів.

Подальші дослідження доцільно провести у напрямі вирішення задач прицілювання для ПрНК перспективних (модернізованих) ударних літальних апаратів під час застосування авіаційних бомб зі складною балістичною схемою

Надійшла до редколегії 15.11.2024
Схвалена до друку 20.11.2024

Відомості про авторів:

Константінов Андрій Олександрович

старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5712-7454>

Леонт'єв Олексій Борисович

доктор технічних наук
професор
головний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4003-7759>

Дмитрієв Андрій Геннадійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
докторант
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8710-5598>

Печура Дмитро Сергійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-організаційного відділу
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5703-4039>

Information about the authors:

Andrii Konstantinov

Senior Researcher
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5712-7454>

Oleksii Leontiev

Doctor of Technical Sciences
Professor
Chief Researcher
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4003-7759>

Andrii Dmytriiev

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Doctoral Candidate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8710-5598>

Dmytro Pechura

Candidate of Technical Science
Senior Researcher
Head of the Scientific and Organizational Department
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5703-4039>

A METHODOLOGICAL APPROACH TO PROVIDING TARGETING AND NAVIGATION COMPLEXES OF STRIKE AIRCRAFT WITH BALLISTIC CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT BOMBS WITH COMPLEX BALLISTIC SCHEMES

A. Konstantinov, O. Leontiev, A. Dmytriiev, D. Pechura

The combat experience shows that the effectiveness of the use of unguided bombs depends on many factors. One of them is the accuracy of solving the aiming tasks, namely the solution of ballistic task for sight systems of combat aircraft which using bombs with the complex ballistic scheme.

The article considers a methodical approach to determining the ballistic characteristics of bombs with a complex ballistic scheme for introduction into the targeting and navigation systems of aircraft. The algorithm for determining the complete system of numerical ballistic characteristics, which are consistent in relation, is considered.

Taken into account that all forms of presentation of ballistic characteristics are connected with each other by known analytical or tabular dependencies, the method of determining the ballistic coefficients agreed in diversion was used. The maximum likelihood method was used for matching.

The peculiarities of the construction of the algorithm for determining the complete system of numerical ballistic characteristics and the results of its work are considered on the example of calculations of the system of numerical ballistic characteristics of disposable bomb cartridges.

The proposed methodical approach makes it possible to calculate the function of the conditions of combat use specified for a specific area and the corresponding aviation means of attack with the help of agreed ballistic coefficients. Further, using procedures that simulate existing ballistic tables, the necessary equivalent ballistic characteristics are found with the help of anchoring.

The considered method and algorithm allow to determine a complete set of agreed numerical ballistic characteristics for bombs with a complex ballistic scheme based on the processing of all information about the experiment.

Such a combination of characteristics makes it possible to solve the task of targeting during bombing in the aiming systems of combat aircraft. It is proposed to carry out further research in the direction of solving aiming tasks for aiming systems of promising (modernized) combat aircraft when using aviation bombs with a complex ballistic scheme.

Keywords: bombs, complex ballistic scheme, ballistic characteristics, targeting and navigation system, aircraft.