УДК 517.9:629.7.015.3/.7

В. И. Макеев, Н. Н. Ляпа, кандидаты техн. наук,
С. П. Латин, **П. Е. Трофименко**, кандидаты воен. наук
Сумской госуниверситет
(Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2,
тел. (0542)62-83-15, e-mail: pavel200808@meta.ua)

Методика определения поправок на нелинейность и взаимодействие возмущающих факторов

Разработанная методика учета поправок на нелинейность и взаимодействие возмущающих факторов для летательных аппаратов с различными способами стабилизации основана на использовании системы дифференциальных уравнений движения летательных аппаратов в возмущающей среде и математических методов планирования экспериментов. Современная методика расчета аэродинамических характеристик позволяет значительно повысить точность рассчитанных поправочных граф таблиц полета и является дополнением к существующей дифференциальной теории поправок.

Розроблена методика урахування поправок на нелінійність і взаємодію збурюючих факторів для апаратів, що літають, використовуючи різні способи стабілізації, базується на застосуванні системи диференціальних рівнянь руху апаратів, що літають у збуреному середовищі, і математичних методів планування експериментів. Сучасна методика розрахунку аеродинамічних характеристик дозволяє значно підвищити точність розрахованих поправочних граф таблиць польоту і є доповненням до існуючої диференціальної теорії поправок.

К л ю ч е в ы е с л о в а : функция отклика, план эксперимента, коэффициенты регрессии, летательный аппарат, дальность полета, возмущающие факторы.

Важной практической задачей расчета траектории движения неуправляемых летательных аппаратов (ЛА) различных классов есть определение влияния поправок на отклонение условий полета от табличных. Таблицы полета составлены для каждой системы и содержат все составляющие, необходимые для подготовки данных для полета. Они составлены для стандартных условий пусков, которые называются табличными или нормальными, а влияние отклонений от этих стандартных условий учитывается посредством введения необходимых поправок.

В работах [1, 2] упоминается о влиянии поправок на нелинейность и о взаимозависимости возмущающих факторов, но не даны рекомендации относительно рациональной системы поправок, которая учитывала бы поправки на нелинейность и взаимозависимость возмущающих факторов. Одно из допущений внешней баллистики, на основе которого рассчитываются поправочные графы таблиц полета, заключается в том, что все поправки изменяются пропорционально величине отклонения фактора и независимы между собой [1, 2]. Согласно результатам проведенных расчетов, это допущение справедливо при небольших отклонениях возмущающих факторов от их табличных значений. Однако в случаях, когда отклонения возмущающих факторов α_i принимают большие значения, зависимость изменений элементов траектории от изменений возмущающих факторов нельзя считать линейной. Кроме того, при одновременном изменении двух или нескольких возмущающих факторов влияние их на изменение элементов траектории становится взаимозависимым. Отсюда следует, что необходимо рассматривать возникающие ошибки в изменении элементов траектории, когда изменение возмущающих факторов весомо.

Выбор и обоснование математического аппарата для решения поставленной задачи. Рассмотрим случай, когда изменяется только один из возмущающих факторов α_i на величину $\delta\alpha_i$. Тогда соответствующее изменение любого элемента траектории δX_i, например дальности полета X, может быть представлено следующим разложением в ряд Тейлора по степеням $\delta\alpha_i$ [3]:

$$\delta X_i = \frac{\partial X}{\partial \alpha_i}\delta\alpha_i + \frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i^2}\frac{\delta\alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^3 X}{\partial \alpha_i^3}\frac{\delta\alpha_i^3}{3!} + \ldots \qquad (1)$$

Поскольку в дифференциальной теории поправок учитывается только член, содержащий первую производную $\dfrac{\partial X}{\partial \alpha_i}$ [1, 2], аналогичное выражение получим в случае, когда изменяется только возмущающий фактор α_j на величину $\delta\alpha_j$. Сумму членов, содержащих однородные производные второго и высших порядков, назовем ошибкой вследствие нелинейности поправок и обозначим $\delta_{\text{н}}(\delta X)$. При одновременном изменении нескольких возмущающих факторов эту ошибку рассчитываем по формуле

$$\delta_{\text{н}}(\delta X) = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i^2}\frac{\delta\alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^3 X}{\partial \alpha_i^3}\frac{\delta\alpha_i^3}{3!} + \ldots\right),$$

где n — число одновременно изменяющихся возмущающих факторов.

Ошибка вследствие нелинейности поправок не является единственной ошибкой дифференциальной теории поправок. При одновременном изменении двух или нескольких возмущающих факторов, например α_i и α_j соответственно на $\delta\alpha_i$ и $\delta\alpha_j$, изменение элемента траектории δX, например X, не будет равным сумме $\delta X_i + \delta X_j$. Действительно, раскладывая δX в ряд Тейлора по степеням величин $\delta\alpha_i$ и $\delta\alpha_j$ [3], получаем

$$\delta X = \frac{\partial X}{\partial \alpha_i}\delta\alpha_i + \frac{\partial X}{\partial \alpha_j}\delta\alpha_j + \frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i^2}\frac{\delta\alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_j^2}\frac{\delta\alpha_j^2}{2!} + \ldots$$

$$\ldots + \frac{\partial^2 X}{\partial\alpha_i \partial\alpha_j}\delta\alpha_i\delta\alpha_j + \frac{1}{2}\frac{\partial^3 X}{\partial\alpha_i^2\partial\alpha_j}\delta\alpha_i^2\delta\alpha_j + \frac{1}{2}\frac{\partial^3 X}{\partial\alpha_i\partial\alpha_j^2}\delta\alpha_i\delta\alpha_j^2 + \ldots \qquad (2)$$

Сумму членов, содержащих смешанные производные, назовем ошибкой вследствие взаимозависимости поправок и обозначим $\delta_{\text{в}}(\delta X)$. В случае, когда одновременно изменяются n возмущающих факторов, эту ошибку рассчитываем по формуле

$$\delta_{\text{в}}(\delta X) = \sum_{i<j}^{n}\left(\frac{\partial^2 X}{\partial\alpha_i\partial\alpha_j}\delta\alpha_i\delta\alpha_j + \frac{1}{2}\frac{\partial^3 X}{\partial\alpha_i^2\partial\alpha_j}\delta\alpha_i^2\delta\alpha_j + \frac{1}{2}\frac{\partial^3 X}{\partial\alpha_i\partial\alpha_j^2}\delta\alpha_i\delta\alpha_j^2\right) + \ldots$$

Тогда ошибка в дальности вследствие нелинейности и взаимозависимости факторов определяется выражением $\delta_{\text{н.в}}(\delta X) = \delta_{\text{н}}(\delta X) + \delta_{\text{в}}(\delta X)$.

Для решения данной задачи предлагается следующая система дифференциальных уравнений движения ЛА, которая позволяет рассчитывать поправочные графы полных таблиц полета (линейная часть) для ЛА, стабилизирующихся в полете вращением и оперением, с включением двигателя при сходе с направляющей и на траектории [4]:

$$\dot{x} = V\cos\theta\cos\Psi / 1 - \frac{2Y}{R_3};$$

$$\dot{y} = V\sin\theta;$$

$$\dot{z} = V\cos\theta\sin\Psi;$$

$$\dot{V} = a_p - a_x\cos\gamma - g_0\sin\theta\left(1 - \frac{2Y}{R_3}\right); \qquad (3)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{\cos\theta\, g_0(1-2Y/R_3)}{V} - \frac{a_x\cos\gamma W_x\sin\theta}{V_r^2} + \frac{V\cos\theta}{R_3+Y} + 2\Omega_3\cos B\sin(a_{\tilde{a}} - \Psi);$$

$$\dot{\Psi} = -\frac{a_x\cos\gamma W_z}{\cos\theta V_r^2} + 2\Omega_3(\sin B - \cos B\cos(a_{\tilde{a}} - \Psi)\, tg\theta);$$

$$\dot{\pi}(\acute{o}) = -\frac{\pi(y)\,\dot{y}}{R[\tau(y) + \Delta\tau]},$$

где для ЛА с активно-реактивным двигателем

$$a_p = \frac{\omega_0(I_{1N} + k_1\Delta T_{\text{зр}})}{m_0[\tau_{aN} + k_2\Delta T_{\text{зр}}](1-\mu_y)},\ \mu_y = \frac{\omega_0 t}{g_0 m_0(\tau_{aN} + k_2\Delta T_{\text{зр}})},$$

$$\alpha_x = 0{,}474\frac{id^2}{q_0 + \Delta q}\pi(y)V_{r\tau}^2 C_x(V_{r\tau});$$

для оперенных ЛА

$$\alpha_x = \frac{i_a d^2}{q_A}10^3\pi(y)\frac{F_{58}(V_{r\tau})}{1-\mu_y},\ m_0 = \frac{q_A}{g_0},\ \cos\gamma = \frac{V - W_{ax}\cos\theta}{V_r},$$

$$V_r = V\sqrt{1-\frac{2(W_{ax}\cos\theta\cos\Psi + W_{az}\sin\Psi\cos\theta)}{V}+\frac{W^2}{V^2}};\ W^2 = W_{ax}^2 + W_{az}^2;$$

$$V_{r\tau} = V_r\sqrt{\frac{\tau_{ON}}{\tau(y)+\Delta\tau}};$$

$$\tau(y) = \begin{cases} 289{,}0 - 0{,}006328Y \text{ при } 0 \le Y \le 9324; \\ 230 - 0{,}006328(Y-9324) + 0{,}000001172(Y-9324)^2 \text{ при } 9324 < Y \le 12000; \\ 221{,}5 \text{ при } 12000 < Y \le 25700; \\ 221{,}5 + 0{,}00265(Y-25700) \text{ при } Y > 25700. \end{cases}$$

Здесь и далее все обозначения в формулах — общепринятые во внешней баллистике. При проведении исследований использована современная методика расчета аэродинамических характеристик [5], что значительно повысило достоверность полученных результатов. Для расчета поправок на нелинейность и взаимовлияние возмущающих факторов использованы математические методы планирования экспериментов [6, 7].

Из всех возмущающих факторов, действующих на полет оперенного ЛА (ОЛА) как на активном так и на пассивном участках траектории, наибольшее влияние оказывает ветер. Результаты исследований и расчетов влияния ветра на полет ОЛА свидетельствуют о том, что наиболее приемлемой в настоящее время является методика, предложенная в работе [4]. Так, на активном участке траектории ОЛА при $t = t_\text{к}$, где $t_\text{к}$ — конец работы двигателя, прямое влияние ветра определяется из следующих зависимостей:

для боковой слагающей ветра W_{az}

$$\Delta\psi_\text{к} = -\frac{\gamma_W W_{az}}{\cos\theta_\text{к}};\ \psi = \psi_\text{к} + \Delta\psi,\ \Delta Z_{W_{az}} = \frac{Z_{W_{az}} - Z_\text{т}}{0{,}001X_\text{т}},$$

где $Z_\text{т}$ и $X_\text{т}$ — табличные значения дальности и направления полета;

для продольной слагающей ветра W_{ax}

$$\Delta\theta_{\text{к}W_{az}} = \gamma_W W_{ax}\sin\theta_{\text{ср}},\ \theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_0 + \theta_{\text{к}}}{2};\ \theta = \theta_{\text{к}} + \Delta\theta_{\text{к}W_{ax}},\ \Delta\Pi_{W_{az}} = \Delta\theta_{\text{к}W_{ax}}\frac{3000}{\pi}.$$

Перекрестное влияние ветра определяем из таких зависимостей:

для боковой слагающей ветра W_{az}

$$\Delta\theta_{\text{к}W_{az}} = \gamma_{\text{м}} W_{az},\ \theta = \theta_{\text{к}} + \Delta\theta_{\text{к}W_{az}},\ \Delta\Pi_{W_{az}} = \Delta\theta_{\text{к}W_{az}}\frac{3000}{\pi};$$

для продольной слагающей ветра W_{ax}

$$\Delta\psi_{W_{ax}} = \frac{\gamma_{\text{м}} W_{ax}\sin\theta_{\text{ср}}}{\cos\theta_{\text{к}}},\ \theta_{\text{ср}} = \frac{\theta_0 + \theta_{\text{к}}}{2};\ \psi = \psi_{\text{к}} + \Delta\psi_{\text{к}W_{ax}},\ \Delta Z_{W_{ax}} = \frac{Z_{W_{ax}} - Z_{\text{т}}}{0{,}001X_{\text{т}}},$$

где $\gamma_{\text{м}}$ — ветровой коэффициент.

На пассивном участке траектории для ЛА з различными способами стабилизации влияние ветра определяем из равенств

$$\cos\gamma = \frac{V - W_{\text{п}x}\cos\theta}{V_r};$$

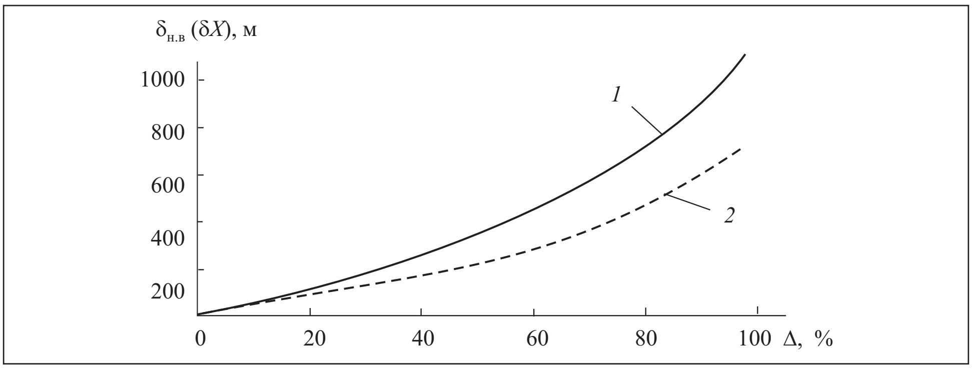
$$V_r = V\sqrt{1 - \frac{2(W_{\text{п}x}\cos\theta\cos\Psi + W_{\text{п}z}\sin\Psi\cos\theta)}{V} + \frac{W^2}{V^2}};\ W^2 = W_{\text{п}x}^2 + W_{\text{п}z}^2,$$

где $W_{\text{п}x}^2$ и $W_{\text{п}z}^2$ — продольная и боковая слагающие баллистического ветра на пассивном участке траектории.

Влияние поправок на нелинейность и взаимовлияние возмущающих факторов. Определим ошибки в дальности вследствие неучета поправок на нелинейность и взаимозависимость возмущающих факторов $\delta_{\text{н.в}}(\delta X)$ при полете ЛА в условиях, когда предельные значения возмущающих факторов могут достигать значений, приведенных в [8]. Указанные ошибки найдем как разность отклонений в дальности, определенную с помощью системы (3) для различных уровней отклонений Δ возмущающих факторов от их табличных значений (см. рисунок). При этом линейная составляющая имеет вид

$$(\delta X)_{\text{л}} = \sum_{i=1}^{n}\frac{\partial X}{\partial\alpha_i}\delta\alpha_i,$$

где n — число возмущающих факторов.



Кривые ошибок в дальности $\delta_{н.\,в}(\delta X)$ при различных значениях Δ (в условиях зимы) для некоторых типов ЛА: *1* — 203 мм СП 2С7, сн ОФ-44, $\theta_0 = 0{,}8726$; *2* — 152 мм СП 2С5, сн ОФ-30, $\theta_0 = 0{,}7896$

В результате анализа проведенных расчетов для различных типов ЛА и различных условий (зима, лето), углов бросания и уровней отклонений возмущающих факторов установлено следующее:

ошибки вследствие нелинейности и взаимозависимости поправок при средних и больших отклонениях условий стрельбы от табличных могут достигать существенных значений: зимой до 2,0 % дальности, летом — не более 0,5 %;

с увеличением диаметра ЛА и его дальности полета ошибки $\delta_{н.в}(\delta X)$ при одном и том же уровне возмущающих факторов увеличиваются;

неучет поправок на нелинейность и взаимозависимость возмущающих факторов незначительно влияет на направление полета ЛА и ими можно пренебречь.

Методика учета поправок на нелинейность и взаимовлияние возмущающих факторов. При вычислении отклонений в дальности ΔX условий полета от табличных будем учитывать только члены, содержащие производные второго порядка. Тогда запишем

$$\Delta X = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial X}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i + \sum_{i<j}^{n} \frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Delta\alpha_i \Delta\alpha_j + \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i^2} \Delta\alpha_i^2,$$

где $\dfrac{\partial X}{\partial \alpha_i}, \dfrac{\partial^2 X}{\partial \alpha_j^2}, \dfrac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j}$ — коэффициенты, которые могут быть найдены при использовании математических методов планирования эксперимента [6, 7].

Основное преимущество факторного эксперимента состоит в том, что в опытах одновременно варьируются все переменные. Поэтому каждый коэффициент регрессии определяется по результатам всех N экспериментов. При традиционном (классическом) подходе к определению поправочных коэффициентов (линейной части) опыты ставят в такой последовательности, чтобы при переходе от одного опыта к другому изменялся только один фактор, а остальные оставались на постоянном (табличном) уровне [1, 2].

Для решения данной задачи аналитическое выражение функции отклика X может быть представлено полиномом [7]

$$X = b_0 + b_1\alpha_1 + \ldots + b_n\alpha_n + b_{n+1}(\alpha_1^2 - a) + \ldots$$
$$\ldots + b_{2n}(\alpha_n^2 - a) + \ldots + b_{2n+1}\alpha_1\alpha_2 + \ldots + b_k\alpha_{n-1}\alpha_n, \tag{4}$$

где a — коэффициент, обеспечивающий приведение квадратных членов к ортогональности,

$$a = \sum_{j=1}^{N} \frac{(\alpha_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \gamma}{N}, \;\; N = 2^{n-p} + 2n + k;$$

γ — плечо звездных точек,

$$\gamma = \sqrt{2^{\frac{n-p}{2}-1}\left(\sqrt{N} - 2^{\frac{n-p}{2}}\right)};$$

i — номер фактора; j — номер опыта; 2^{n-p} — число точек ядра плана; p — дробная реплика; k — последнее парное взаимодействие.

При решении в качестве плана эксперимента будем использовать дробный факторный план 2^{n-p} [6, 7]. В план эксперимента включено восемь факторов ($n = 8$). Их число может быть и уменьшено и увеличено. Характерным для ортогональных планов является то, что для кодированных переменных матрица этих планов задается одинаково при любой размерности факторного пространства. Для упрощения записи условий каждого опыта при обработке выборочных данных эксперимента масштабы по осям факторов выберем так, чтобы верхний уровень соответствовал +1, нижний –1, а основной — нулю. Это достигается с помощью преобразования

$$x_i = \frac{(\alpha_i - \alpha_{i0})}{I_i}, \tag{5}$$

где x_i — кодированное значение i-го фактора; α_i — фактор в натуральном масштабе; α_{i0} — основной (табличный) уровень для фактора в натуральном масштабе; I_i — интервал варьирования i-го фактора, $I_i = (\alpha_{i\,\max} - \alpha_{i\,\min})/2$.

Рассмотрим ортогональное композиционное планирование (с ядром плана 2^{8-3}), в котором в силу ортогональности матрицы плана все коэффициенты полинома (4) оцениваются независимо один от другого. Матрица планирования из восьми переменных приведена в работе [8]. Использование дробных факторных планов 2^{n-p} в качестве ядра плана позволяет существенно сократить число опытов для определения коэффициентов регрессии. Например, проведение эксперимента с использованием в качестве ядра композиционного плана дробного факторного плана 2^{8-3} вместо 2^{8-2} позволило сократить число опытов с 81 до 49.

Число факторов может быть значительно больше восьми, и тогда возрастает число экспериментов, которое можно уменьшить посредством дробных реплик. Элементы матрицы C определены по формулам

$$C_1 = \frac{1}{2^{n-p} + 2\gamma^2};$$

$$C_2 = \frac{1}{2^{n-p}(1-a)^2 + 2(\gamma^2 - a)^2 + (2n-1)\,a^2}; \tag{6}$$

$$C_3 = \frac{1}{2^{n-p}}.$$

Параметры ортогонального центрального композиционного плана, рассчитанные по зависимостям (4)—(6) следующие:

Размерность	8
Ядро плана	2^{8-3}
Число опытов	49
γ	1, 949
a	0, 808

Элементы матрицы C: $C_1 = 0{,}0252537$; $C_2 = 0{,}0346585$; $C_3 = 0{,}03125$.

Коэффициенты регрессии с помощью ортогонального плана определяются по следующим формулам:

свободный член уравнения регрессии $b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} X^j$;

для линейных членов $b_i = C_1 \sum_{j=1}^{N} \alpha_i^j X^j$, $i = 1, ..., n$;

для нелинейных членов $b_{ii} = C_2 \sum_{j=1}^{N} [(\alpha_{i-n}^j)^2 - a] X^j$, $i = n+1, ..., 2n$;

для членов взаимного влияния $b_{ij} = C_3 \sum_{j=1}^{N} \alpha_\mu^j \alpha_\lambda^j X^j$, $\mu = 1, 2, ..., n$, $\mu \neq \lambda$; $i = 2n + 1, \ldots, k$.

Поправочный коэффициент	Размерность	Значение	Поправочный коэффициент	Размерность	Значение
$\frac{\partial X}{\partial \tau_0}$	$м/1°$	–10,1	$\frac{\partial^2 X}{\partial h_0 \partial T_{з.р}}$	$м/1мм.рт.ст,\ 1°$	–0,084
$\frac{\partial X}{\partial h_0}$	$м/1мм.рт.ст$	+56,9	$\frac{\partial^2 X}{\partial h_0 \partial T_{з.м}}$	$м/1мм.рт.ст,\ 1°$	–0,095
$\frac{\partial X}{\partial W_x}$	$м/1м/с$	–77,1	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial W_x}$	$м/1\%, 1м/с$	+1,1
$\frac{\partial X}{\partial T_{з.р}}$	$м/1°$	–40,9	$\frac{\partial^2 X}{\partial W_x \partial W_z}$	$м/1м/с, 1м/с$	+0,016
$\frac{\partial X}{\partial T_{з.м}}$	$м/1°$	–35,3	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial T_{з.м}}$	$м/1\%, 1°$	+1,42
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0 \partial h_0}$	$м/1°,\ 1мм.рт.ст$	–0,62	$\frac{\partial^2 X}{\partial W_x^2}$	$м/1м/с$	–0,096
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0 \partial V_0}$	$м/1°,\ 1\%$	–1,22	$\frac{\partial^2 X}{\partial T_{з.р}}$	$м/1°$	–0,12
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0 \partial T_{з.р}}$	$м/1°,\ 1°$	–0,094	$\frac{\partial^2 X}{\partial T_{з.м}^2}$	$м/1°$	–0,11
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0 \partial T_{з.м}}$	$м/1°,\ 1°$	–0,129	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0^2}$	$м/1\% V_0$	–0,82
$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial h_0}$	$м/1\%, 1мм.рт.ст$	–0,131	$\frac{\partial^2 X}{\partial q^2}$	$м/1в/зн$	–0,6
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0 \partial W_x}$	$м/1°,\ 1м/с$	–0,009	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial q}$	$м/1\%, 1в/зн$	+1,21
$\frac{\partial Z}{\partial W_z}$	$м/1м/с$	–1,3	$\frac{\partial^2 X}{\partial T_{з.р} \partial T_{з.м}}$	$м/1°,\ 1°$	–0,096
$\frac{\partial X}{\partial q}$	$м/1в/зн$	–14,0	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial W_z}$	$м/1\%,\ 1м/с$	–0,019
$\frac{\partial X}{\partial V_0}$	$м/1\% V_0$	–88,2	$\frac{\partial^2 X}{\partial V_0 \partial T_{з.р}}$	$м/1\%, 1°$	–0,012
$\frac{\partial^2 X}{\partial \tau_0^2}$	$м/1°$	–0,076	$\frac{\partial^2 X}{\partial h_0 \partial W_x}$	$\frac{м}{1мм.рт.ст, 1м/с}$	–0,011
$\frac{\partial^2 X}{\partial h_0^2}$	$м/1мм.рт.ст$	+8,1			

Примечание: $T_{з.р}$ — температура реактивного заряда; $T_{з.м}$ — температура метательного заряда.

Для расчета коэффициентов регрессии составлена программа на ЭВМ с языком программирования С++. Значения коэффициентов $\frac{\partial X}{\partial \alpha_i}$, $\frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i^2}$, $\frac{\partial^2 X}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j}$, рассчитанные по данной методике для одного из типов ЛА (203 мм СП 2С7), приведены в таблице.

Выводы

1. Ошибки в дальности вследствие нелинейности и взаимозависимости факторов наиболее значительны для участков, зависимых от изменения начальной скорости ЛА. Так, в зимнее время при $\tau_0 = -20$ °С, $\Delta V_0 = -4\% V_0$, $\Delta h = -15$ мм.рт.ст. ошибки на нелинейность и взаимовлияние $\delta_{\text{н.в}}(\delta X)$ составляют от 300 до 500 м. При этом отклонение начальной скорости на – 5,5 % V_0 вполне реально в условиях низких температур [2].

2. Ошибки в дальности вследствие нелинейности и взаимозависимости возмущающих факторов для ЛА с гироскопической стабилизацией настолько малы, что ими можно пренебречь.

3. Основная составляющая ошибки $\delta_{\text{н.в}}(\delta X)$ возникает вследствие отбрасывания членов, содержащих производные второго порядка.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при полете ЛА в условиях, резко отличающихся от табличных (особенно зимой) ошибки в дальности вследствие неучета поправок на нелинейность и взаимозависимость факторов могут достигать 2 % дальности. Неучет таких ошибок может привести к большим отклонениям точек падения от рассчитанных и, как результат, к невыполнению задачи.

The article in question focuses on the designing of accounting methods of correction detection for nonlinearity and disturbing factors interplay for flying units motion in the disturbed environment as well as on the use of mathematical methods of the experiment design. The use of the contemporary methods of aerodynamic characteristics calculation increases considerably the accuracy of the designed correction columns of the flight tables. These methods will serve as a supplement to the already existing differential correction theory.

1. *Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н.* Внешняя баллистика. — М. : Машиностроение, 2005. — 607 с.
2. *Лысенко Л. Н., Грабин В. В. и др.* Баллистика ствольных систем. Справочная библиотека разработчика-исследователя. — М. : Машиностроение, 2006. — 461 с.
3. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. — М. : Наука, 1964. — 572 с.
4. *Макеєв В. І. та ін.* Математична модель просторового руху літального апарату на твердому паливі в атмосфері// Вісн. СумДУ. — 2008. — № 2. — С. 5—12.

5. *Монченко Н. М.* Инженерный расчетный метод определения аэродинамических характеристик снарядов ствольной артиллерии. — М. : НИИ-3, 1982. — 34 с.
6. *Хартман К. и др.* Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. — М. : Мир, 1977. — 522 с.
7. *Налимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М. : Наука, 1965. — 340 с.
8. *Теоретические* основы стрельбы наземной артиллерии. Учебник. — М. : МО СССР, 1976. — 345 с.

Поступила 21.06.11

МАКЕЕВ Василий Ильич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры военной подготовки Сумского госуниверситета. В 1975 г. окончил Военную артиллерийскую академию (г. Ленинград). Область научных исследований — баллистическая подготовка пусков (стрельбы) ракет и артиллерии.

ЛЯПА Николай Николаевич, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры военной подготовки Сумского госуниверситета, который окончил в 1997 г. Область научных исследований — системы и процессы управления.

ЛАТИН Сергей Петрович, канд. воен. наук, доцент, доцент кафедры военной подготовки Сумского госуниверситета. В 1997 г. окончил Академию вооруженных сил Украины (г. Киев). Область научных исследований — боевое применение соединений, частей и подразделений в операции (бою).

ТРОФИМЕНКО Павел Евгеньевич, канд. воен. наук, профессор, профессор кафедры военной подготовки Сумского госуниверситета. В 1975 г. окончил Военную артиллерийскую академию (г. Ленинград). Область научных исследований — боевое применение соединений, частей и подразделений в операции (бою).