Вооружение, военная и специальная техника

Научная статья
УДК 531.55.58 + 623.5

Светлана Дмитриевна Беляева
доктор технических наук, профессор
mvaa.mil.ru

Михайловская военная артиллерийская академия
Российская Федерация, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 22

Условия устойчивости полета неуправляемых артиллерийских снарядов

Аннотация: Статья посвящена аналитическому решению проблемы устойчивости полета неуправляемых артиллерийских снарядов. Условия устойчивости полета неуправляемых артиллерийских снарядов получены с помощью формальной классификации сил по методу аналитической механики с использованием теорем Томсона и Тэта и условий Гурвица [6, 7]. Выявленные условия обобщают известные критерии Маиевского и Забудского [1, 2, 3, 4, 5] и дают новые зависимости, которые точно определяют опытные коэффициенты оценки устойчивости по аэродинамическим и конструктивным параметрам снаряда.

Ключевые слова: консервативные силы, гироскопические силы, диссипативные силы, неконсервативные позиционные силы, коэффициент гироскопической устойчивости, параметры снаряда, возможности ствола, момент вылета снаряда, канал ствола, требуемая длина хода нарезов

Для цитирования: Беляева С.Д. Условия устойчивости полета неуправляемых артиллерийских снарядов // Артиллерийский журнал. – 2023. – № 1. – С. 16–23.

Svetlana D. Belyaeva
Dr. Sci. (Tech.), Professor
mvaa.mil.ru

Mikhailovskaya Military Artillery Academy
22, Komsomola str., Saint Petersburg, 195009, Russian Federation

The conditions of flight unmanaged artillery projectiles stability

Abstract: This article provides an analytical solution of the problem of stability flight unmanaged artillery projectiles. The conditions of stability flight unmanaged artillery projectiles are received by help of the formal classification of forces with the methods of analytical mechanics, using the theorems of Tomson W. (lord Kelvin) and Tait P.C., and conditions of Gurvits [6, 7]. The received conditions generalize well-known criterions by Maievskiy and Zabudskiy [1, 2, 3, 4, 5], and give a new dependence, which determine exactly the experienced coefficients estimation of stability by aerodynamically and constructive parameters of projectile.

Keywords: conservative forces, gyroscopic forces, dissipative forces, non-conservative positional forces, gyroscopic stability coefficient, projectile parameters, barrel capabilities, projectile departure moment, barrel bore, required rifling stroke length

For citation: Belyaeva S.D. The conditions of flight unmanaged artillery projectiles stability // The Artillery Journal – 2023. – № 1. – P. 16–23.

Введение. Уравнения вращательного движения с учетом поступательного пространственного движения его центра инерции и линеаризации по переменным δ_1, δ_2 и их производных были получены в [1].

$$\ddot{\delta}_1 + 2a\dot{\delta}_2 + 2b\dot{\delta}_1 - c\delta_1 - e\delta_2 = g(V^{-1}\cos\Theta)'_t + 2k\,gV^{-1}\cos\Theta$$
$$\ddot{\delta}_2 - 2a\dot{\delta}_1 + 2b\dot{\delta}_2 - c\delta_2 + e\delta_1 = -2\alpha gV^{-1}\cos\Theta$$

Для настильных траекторий система уравнений, описывающая поведение оси снаряда, имеет вид:

$$\begin{aligned} &\ddot{\delta}_1 + 2a\dot{\delta}_2 + 2b\dot{\delta}_1 - c\delta_1 - e\delta_2 = 0 \\ &\ddot{\delta}_2 - 2a\dot{\delta}_1 + 2b\dot{\delta}_2 - c\delta_2 + e\delta_1 = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь

$$a = a + \xi;\ \ b = k + \mu;\ \ c = \pm\beta - 2\dot{\mu} + 4a\xi - 4k\mu;$$

$$e = \nu - 2\dot{\xi} - 4a\mu - 4k\xi.$$

Система уравнений (1) допускает частное решение

$$\delta_1 = \delta_2 = 0;\ \dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = 0;$$

Физически оно соответствует винтовому движению оси вращающегося артиллерийского снаряда около касательной к траектории центра масс снаряда. Такое движение в баллистике принято называть абсолютно правильным полетом снаряда.

Основная часть. Примем это движение в качестве невозмущенного и исследуем его устойчивость с помощью теорем Томсона и Тэта [7] по формальной классификации сил. Следуя аналитической механике, применим формальную классификацию сил по матрицам из уравнений движения.

название	“консервативные силы“	“силы полной диссипации”
матрица	$C = \begin{pmatrix} -c & 0 \\ 0 & -c \end{pmatrix}$	$B = \begin{pmatrix} 2b & 0 \\ 0 & 2b \end{pmatrix}$

название	“гироскопические силы“	“неконсервативные позиционные силы“
матрица	$A = \begin{pmatrix} 0 & 2a \\ -2a & 0 \end{pmatrix}$	$P = \begin{pmatrix} 0 & -e \\ e & 0 \end{pmatrix}$

Покажем на примерах значения всех величин, входящих в формулы для формальной классификации сил, при максимальной скорости:

	d(мм) (мм)	V_0 (м/с)	α	ξ	γ	κ	μ	ν	4αξ	β	4kμ	4αμ	4κξ
ОФ-482 ОФ482	130	930	63,38	0,011	0,006	0,26	0,314	24,97	2,85	3184,35	0,33	79,85	0,012
ОФ-540	152	655	63,08	0,010	0,004	0,180	0,235	11,60	2,18	2253,53	0,17	56,22	0,006

$\dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = 0$ будет неустойчиво под действием только «консервативных сил» в соответствии с первой теоремой Томпсона и Тэта [7].

Из таблицы видно, что для вращающихся снарядов:

1) $\mathrm{a} = \alpha + \xi \approx \alpha$;

2) $\mathrm{b} = \kappa + \mu$, причем у вращающихся и оперенных снарядов κ и μ одного порядка;

3) $\mathrm{c} = \beta - 2\dot{\mu} + 4\alpha\xi - 4\kappa\mu \approx \beta$. В силу малости величин μ и ξ, их производными пренебрегаем в сравнении с оставленными слагаемыми.

4) $\mathrm{e} = \nu - 2\xi - 4\alpha\mu - 4\kappa\xi\ \ \nu - 4\alpha\mu$.

С учетом оценок для коэффициентов *a, b, c, e* заключаем следующее:

Коэффициент «консервативной силы» *c*, в основном, зависит от величины коэффициента β, характеризующего опрокидывающий момент.

Коэффициент «неконсервативной силы» $\mathrm{e} \approx \nu - 4\alpha\mu$ зависит от величины и знака приведенного момента силы Магнуса ν и от совместного влияния подъемной силы и вращения снаряда около оси симметрии, оцениваемого произведением $4\alpha\mu$. Оба фактора, как следует из таблицы выше, вносят равноценный вклад в возникновение такого рода «сил» у вращающихся снарядов.

Коэффициент «силы полной диссипации» *b* получается сложением коэффициента экваториального тушащего момента κ и коэффициента μ, связанного с подъемной силой. Обе составляющие имеют один порядок. Необычным является вклад подъемной силы, увеличивающей коэффициент «силы полной диссипации» *b*.

Коэффициент «гироскопической силы» α определяется величиной коэффициента $\alpha = \frac{1}{2}\frac{A}{B}p$, характеризующего «закрутку» снаряда. Незначительный вклад вносит сила Магнуса, но им можно пренебречь.

Исследуем теперь, как влияют эти «силы» на устойчивость невозмущенного движения $\delta_1 = \delta_2 = 0$; $\dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = 0$. Для вращающихся снарядов $c \cong \beta$, поэтому матрица «консервативных сил» содержит два отрицательных коэффициента Пуанкаре. Следовательно, невозмущенное движение $\delta_1 = \delta_2 = 0$;

Физически ясно, что движение оси снаряда под действием опрокидывающего момента, определяющего «консервативные силы», не может быть устойчивым. Как известно, для нейтрализации опрокидывающего момента снаряд закручивают около его оси симметрии с помощью нарезов на внутренней поверхности ствола. С точки зрения формальной классификации сил к «консервативным силам» добавляются «гироскопические силы», тогда на основании второй теоремы Томсона и Тэта [7] при определенных условиях возможна стабилизация невозмущенного движения $\delta_1 = \delta_2 = 0$; $\dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = 0$.

Вместе с тем, третья теорема Томсона и Тэта [7] утверждает, что «силы полной диссипации» разрушают гироскопическую стабилизацию с течением времени. Неустойчивое движение под действием опрокидывающего момента («консервативных сил») может быть стабилизировано вращением около оси снаряда, благодаря нарезам в канале ствола («гироскопических сил»). Однако стабилизация будет временной из-за «сил полной диссипации», разрушающих гироскопическую стабилизацию. Томсон и Тэт называли гироскопическую стабилизацию временной.

Рассмотрим теперь влияние «неконсервативных сил». Четвертая теорема Томсона и Тэта [7] утверждает, что устойчивость можно восстановить при определенных условиях, обеспечив устойчивое поведение оси снаряда на траектории, так называемый правильный полет. Применим для количественных оценок условия Гурвица [6].

Характеристическое уравнение системы уравнений (1) имеет вид:

$$\lambda^4 + 4\mathrm{b}\lambda^3 + (4\mathrm{b}^2 - 2\mathrm{c} + 4a^2)\lambda^2 - - 4(a\mathrm{e} - \mathrm{bc})\lambda + \mathrm{c}^2 + \mathrm{e}^2 = 0 \qquad (3)$$

Составим определитель Гурвица для этого характеристического уравнения:

$$H = \begin{vmatrix} 4b & -4(ae+bc) & 0 & 0 \\ 1 & (4b^2+4a^2-2c) & (c^2+e^2) & 0 \\ 0 & 4b & -4(ae+bc) & 0 \\ 0 & 1 & (4b^2+4a^2-2c) & (c^2+e^2) \end{vmatrix}$$

Условия Гурвица [6] являются необходимыми и достаточными требованиями для отрицательности вещественных частей корней характеристического уравнения (3). При этом все главные миноры определителя Гурвица должны быть не отрицательны:

1) $4b \geq 0$;

2) $4b(4b^2 + 4a^2 - 2c) + 4(ae + bc) \geq 0$;

3) $-4b(4b(c^2 + e^2)) - 4(ae + bc)\ [4b(4b^2 - 4a^2 - 2c) + 4(ae + bc)] \geq 0$.

Последнее неравенство после приведения подобных примет вид:

$$(b^4 + a^2b^2)[4c + 4a\frac{e}{b} + (\frac{e}{b})^2] \leq 0$$

Неравенство выполнится, если $4c + 4a\frac{e}{b} + (\frac{e}{b})^2 \leq 0$.

Левая часть последнего неравенства является квадратным трехчленом относительно дроби $(\frac{e}{b})$.

Неравенство выполнится, если

1. $a^2 - c \geq 0$;

2. $-2a(1 + \sqrt{1-\frac{c}{a^2}}) \leq \frac{e}{b} \leq -2a(1 - \sqrt{1-\frac{c}{a^2}})$.

Перепишем последнее неравенство:

$$2a(1-\sigma) \leq -\frac{e}{b} \leq 2a(1+\sigma); \quad \sigma = \sqrt{1-\frac{c}{a^2}}.$$

Отсюда следует, что $\frac{e}{b} \leq 0$ или $e \leq 0$.

Проверим второе условие. Раскрывая скобки, получим:

$$4b(3b^2 + 4a^2 - 2c) + 4(ae + bc) = 4b^2 + 4a^2 - c + \frac{ae}{b}$$

Подставим сюда правую и левую часть второго условия

$$4b^2 + 4a^2 - c + \frac{ae}{b} = 4b^2 + a^2 - c + a^2(3 - 2(1-\sigma) \geq 0.$$

$$4b^2 + 4a^2 - c + \frac{ae}{b} =$$

$$= 4b^2 + a^2 - c + a^2(3 - 2(1+\sigma) = 4b^2 + a^2(\sigma^2 + 1 - 2\sigma) =$$

$$= 4b^2 + a^2(1-\sigma)^2 \geq 0.$$

Следовательно, если выполнены требования для третьего условия Гурвица, то второе условие выполняется автоматически. Окончательно для устойчивости невозмущенного движения $\delta_1 = \delta_2 = 0$; $\dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = 0$ должны выполняться два основных условия:

1) $a^2 - c \geq 0$;

2) $2a(1-\sigma) \leq -\frac{e}{b} \leq 2a(1+\sigma); \quad \sigma = \sqrt{1-\frac{c}{a^2}}$; $e \leq 0$

Первое условие обобщает условие Маиевского [1, 2, 3, 4] , второе условие получено автором.

В результате проведенного исследования на базе формальной классификации сил видим две противоборствующие группы сил. К первой группе относятся «консервативные силы и силы полной диссипации», которые стремятся уничтожить устойчивость полета снаряда. Физически эти «силы» обусловлены опрокидывающим моментом, тушащими моментами и влиянием подъемной силы. Вторая группа «сил» стремится восстановить устойчивость полета снаряда. Это «гироскопические и неконсервативные силы», которые обусловлены закруткой снаряда, вызывающей силу и момент Магнуса, а также совместным влиянием подъемной силы и собственного вращения снаряда около оси симметрии. Здесь видна двоякая роль подъемной силы, вносящей свой вклад и в первую, и во вторую группу «сил».

Преобладание второй группы «сил» над первой будет иметь место при соблюдении двух полученных выше условий. Покажем, что полученные условия накладывают ограничения на параметры снаряда и его аэродинамику. Рассмотрим условие $e \leq 0$. Это условие выполняется всегда, если выполняется соотношение $\nu - 4\alpha\mu \leq 0$ или в развернутом виде

$$0{,}474\ \frac{d^3L}{Bg}\frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}}\ H(y)pVm^{\bar{p}\delta}{}_L -$$

$$-0{,}474\ \frac{A}{B}\frac{d^2}{q}\frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}}\ H(y)pVc^{\delta}{}_{\gamma} \leq 0.$$

После преобразований останется следующее:

$$\frac{dL}{g}\ m^{\bar{p}\delta}{}_L - \frac{Ac^{\delta}{}_{\gamma}}{q} \leq 0$$

Если ввести коэффициент инерции снаряда $\mu_{ин} = \frac{4Ag}{qd^2}$, то последнее неравенство примет вид:

$$m_L^{\bar{p}\delta} \le \frac{1}{4}\mu_{ин}\frac{d}{L}c_y^{\delta}.$$

Составим теперь отношение:

$$\frac{e}{b} = \frac{0{,}474\frac{d^3L}{Bg}\frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}}H(y)pV\left(m_L^{\bar{p}\delta} - \frac{1}{4}\mu_{ин}\frac{d}{L}c_y^{\delta}\right)}{0{,}474\frac{d^2L^2}{2Bg}\frac{\Pi_0}{\Pi_{0N}}H(y)V\left(m_z^{\bar{\omega}_z} + \frac{B}{mL^2}c_y^{\delta}\right)}.$$

После сокращений получаем

$$\frac{e}{b} = \frac{2p\frac{d}{L}\left(m_L^{\bar{p}\delta} - \frac{1}{4}\mu_{ин}\frac{d}{L}c_y^{\delta}\right)}{\left(m_z^{\bar{\omega}_z} + \frac{B}{mL^2}c_y^{\delta}\right)};$$

$$2a(1-\sigma) \le -\frac{e}{b} \le 2a(1+\sigma); \quad \sigma = \sqrt{1-\frac{c}{a^2}}$$

Заменяя $a \cong a = \frac{1}{2}\frac{A}{B}p$ и учитывая зависимость для $\frac{e}{b}$, имеем следующее:

$$(1-\sigma) \le \frac{2\frac{B}{A}\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{1}{4}\mu_{ин}\frac{d}{L}c_y^{\delta} - m_L^{\bar{p}\delta}\right)}{\left(m_z^{\bar{\omega}_z} + \frac{B}{mL^2}c_y^{\delta}\right)} \le (1+\sigma).$$

Отсюда для коэффициента гироскопической устойчивости получаем условие:

$$\sigma \ge \sigma_{доп} = \left|1 - \frac{2\frac{B}{A}\left(\frac{d}{L}\right)\left(\frac{1}{4}\mu_{ин}\frac{d}{L}c_y^{\delta} - m_L^{\bar{p}\delta}\right)}{\left(m_z^{\bar{\omega}_z} + \frac{B}{mL^2}c_y^{\delta}\right)}\right| \quad (4)$$

Одной из самых трудных задач, стоящих перед конструктором, является определение значения $\sigma_{доп}$ в точке вылета снаряда. Например, Окунев Б.Н. считал, что $\sigma_{доп} = 0{,}6 \div 0{,}8$ [2].

Полученная здесь зависимость (4) позволяет на основании конкретных конструктивных и аэродинамических данных установить истинное, а не ориентировочное значение допустимой величины коэффициента гироскопической устойчивости, при котором снаряд будет устойчив.

Сравним теперь это значение с тем, которое может быть обеспечено орудием.

Имеем

$$\sigma_{орудия} = \sqrt{1-\frac{\beta_0}{\alpha_0^2}} = \sqrt{1 - \frac{\pi\Pi_{0N}}{8}\frac{d^2L}{Bg}\frac{m_z^{\delta}{V_0}^2}{\frac{A^2}{4B^2}\left(\frac{2\pi V_0}{\eta d}\right)^2}}$$

Здесь $\alpha_0 = \frac{1}{2}\frac{A}{B}p_0$; $p_0 = \frac{2\pi V_0}{\eta d}$; η – длина хода нарезов, определяющая расстояние по длине ствола, на котором снаряд делает один оборот.

Для тангенса угла наклона нарезов справедлива формула $\tan\gamma = \frac{\pi d}{\eta d}$.

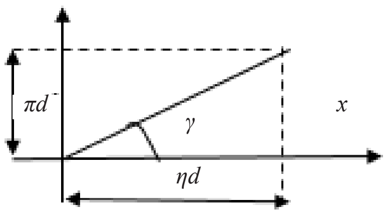

Рис.1. Определение угла наклона нарезов

Соответственно, окружная скорость $V_R = p_0\frac{d}{2}$ относится к линейной скорости V_0 тоже, как $\tan\gamma = \frac{\pi d}{\eta d}$, т.е. $\frac{p_0\frac{d}{2}}{V_0} = \tan\gamma = \frac{\pi}{\eta}$.

Отсюда получаем $p_0 = \frac{2\pi V_0}{\eta d}$.

Преобразуем формулу для $\sigma_{орудия}$, введя коэффициент веса $c_q = \frac{q}{d^3}10^{-3}$ и коэффициент инерции $\mu_{ин} = \frac{4Ag}{qd^3}$, тогда

$$\sigma_{орудия} = \sqrt{1 - \frac{\Pi_{0N}}{2\pi}\frac{L}{d}\frac{B}{A}\eta^2\frac{m_z^{\delta}10^{-3}}{c_q\mu_{ин}}}$$

Очевидно, если $\sigma_{орудия} < \sigma_{доп}$, то в момент вылета снаряд будет недостаточно стабилизирован, если же $\sigma_{орудия} \ge \sigma_{доп}$, то его стабилизация будет достаточной. Начиная с Забудского Н.А. [5], устойчивость оценивали с помощью допустимой длины хода нарезов $\eta_{доп}$.

Из условия $\sigma_{орудия} \ge \sigma_{доп}$ получаем

$$\eta_{доп} \le \sqrt{1-\sigma^2_{доп}}\sqrt{\frac{2\pi\,\mu_{ин}c_q 10^3}{\Pi_{0N}\frac{B}{A}\frac{L}{d}\,m_z^{\delta}}}\ .$$

В баллистике принято называть $\sqrt{1-\sigma^2_{доп}} = a_{доп}$, причем Вентцель Д.А. считал, что $a_{доп} = 0{,}75$; Окунев Б.Н. полагал $a_{доп} = 0{,}6 \div 0{,}8$; Першин В.Н. назначал $a_{доп} = 0{,}95$ [2, 3, 4].

Теперь этот параметр $a_{доп}$ можно определить по конкретным конструктивным и аэродинамическим характеристикам.

Проверим выполнение этих условий на конкретных снарядах.

1. Снаряд ОФ-540. Исходные данные:

M (число маха)	m^{α}_{z}	c^{α}_{γ}	$m_z^{\bar{\omega}z}$	$m_L^{\bar{p}\alpha}$
1,91	0,713	2,5584	0,19938	0,02489

q (кг)	d (м)	L (м)	A (кгмс2)	B (кгмс2)	Θ_0(тыс)	V_o(м/с)
43,56	0,1524	0,7024	0,0143	0,15256	850	655

По приведенным данным получаем:

$\sigma_{доп} = 0{,}35$; $\sigma_{ор} = 0{,}64$; $\eta_{доп} = 30{,}5$; $\eta_{ор} = 25$.

Оба условия устойчивости выполнены.

Поведение оси ОФ-540 на траектории и рассеивание представлено на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что снаряды ложатся кучно, а отклонение оси снаряда от вектора скорости убывает, стремясь к нулю, что является свидетельством устойчивости полета снаряда.

Снаряд ОФ-482. Исходные данные:

M(число маха)	m^{α}_{z}	c^{α}_{γ}	$m_z^{\omega z}$	$m_L^{p\alpha}$
2,7289	0,64048	2, 81269	0,14599	0,07

q (кг)	d (м)	L (м)	A (кгмс2)	B (кгмс2)	Θ_0(тыс)	V_o(м/с)
33,4	0,13	0,668235	0,00807	0,095	850	930

Поведение оси ОФ-540

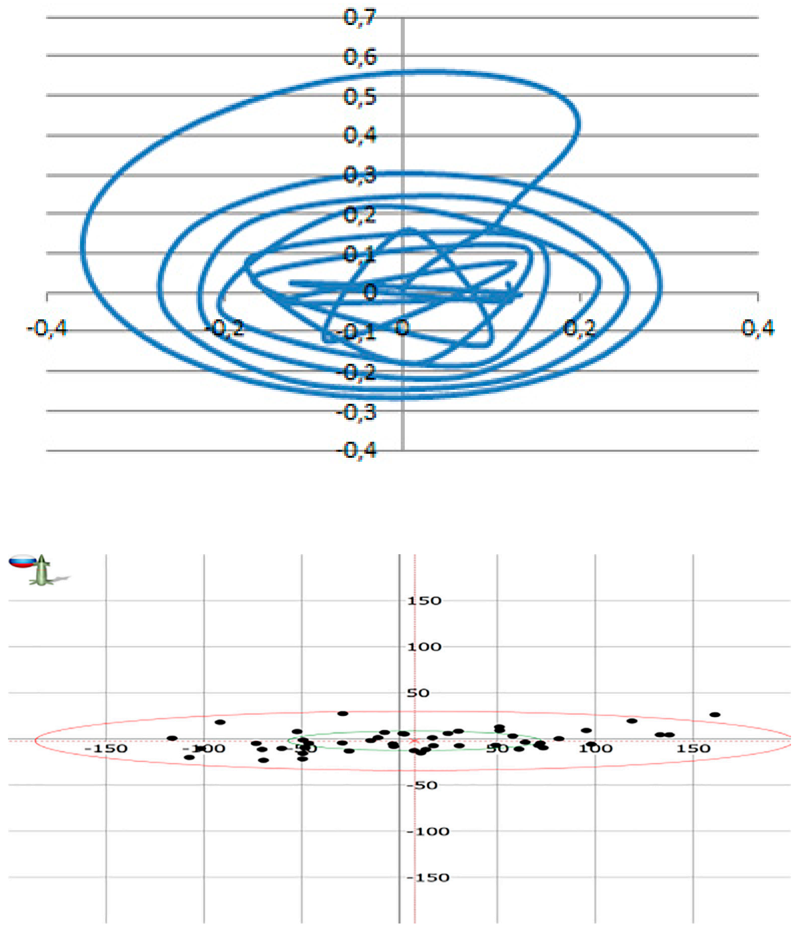

Рис. 2. Рассеивание ОФ-540 и поведение его оси

Имеем $\sigma_{доп} = 0{,}91$; $\sigma_{ор} = 0{,}46$; $\eta_{доп} = 19$; $\eta_{ор} = 30$.

Поведение оси ОФ-482

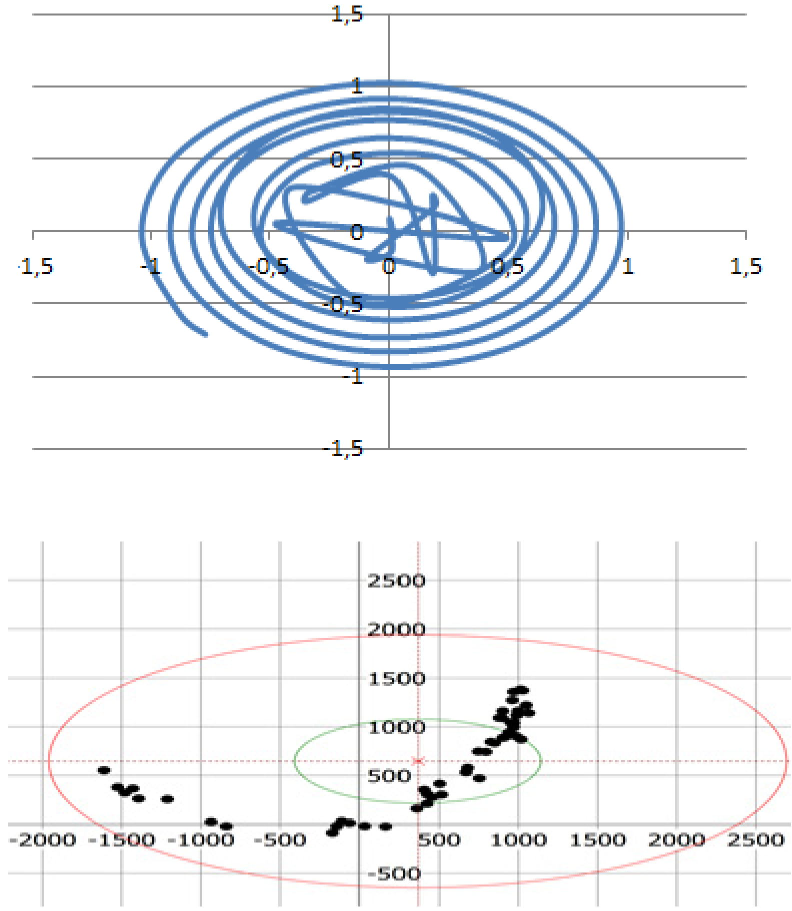

Рис. 3. Поведение оси ОФ-482 и его рассеивание

Оба условия устойчивости не выполнены. Этот снаряд неустойчив в полете, т.к. угол отклонения оси снаряда от вектора скорости растет, рассеивание – плохое. Поведение оси напоминает поведение детской игрушки «Юла» перед тем, как она упадет на бок. Этот снаряд снят с производства.

Заключение. Таким образом, теоретически получено на основании конкретных конструктивных и аэродинамических данных истинное, а не ориентировочное значение допустимой величины коэффициента гироскопической устойчивости $\sigma_{доп}$ и допустимой величины длины хода нарезов в стволе $\eta_{доп}$, при которых снаряд будет устойчив в полете. Сравнив это значение с $\sigma_{ор}$ и длиной хода нарезов данного орудия $\eta_{ор}$, можно прогнозировать, будет или нет устойчивым полет снаряда.

Список литературы

1. *Беляева С.Д.* Математические методы анализа движения в воздухе неуправляемых артиллерийских снарядов и мин. – Санкт-Петербург: МВАА, 2014. – 120 с.

2. *Вентцель Д.А., Окунев Б.Н., Шапиро Я.М.* Внешняя баллистика. – Ч.2. – Ленинград: Арт.Ак. РККА им. Дзержинского, 1934. – 205 с.

3. *Шапиро Я.М.* Внешняя баллистика. – Москва: Гос. из.–во оборон. пром.-ти, 1946. – 231 с.

4.*Окунев Б.Н.* Вращательное движение артиллерийского снаряда. – Москва: ОГИЗ, 1948. – 110 с.

5. *Забудский Д.А.* Внешняя баллистика. – Санкт-Петербург: типография Императорской Академии наук, 1895. – 380 с.

6. *Четаев Н.Г.* Устойчивость движения. – Москва: издательство АН СССР, 1962. – 97 с.

7. *Thomson W.* (Lord Kelvin) and Tait P.C. Treatise on Natural Philosophy. – Cambrige, 1912. – p.11.

References

1. *Belyaeva S.D.* Matematicheskie metody analiza dvizheniya v vozduhe neupravlyaemyh artillerijskih snaryadov i min. – Sankt-Peterburg: MVAA, 2014. – 120 s.

2. V*entcel' D.A., Okunev B.N., SHapiro YA.M.* Vneshnyaya ballistika. – Ch.2. – Leningrad: Art.Ak. RKKA im. Dzerzhinskogo, 1934. – 205 s.

3. *Shapiro Ya.M.* Vneshnyaya ballistika. – Moskva: Gos. iz.–vo oboron. prom.-ti, 1946. – 231 s.

4.*Okunev B.N.* Vrashchatel'noe dvizhenie artillerijskogo snaryada. – Moskva: OGIZ, 1948. – 110 s.

5. *Zabudskij D.A.* Vneshnyaya ballistika. – Sankt-Peterburg: tipografiya Imperatorskoj Akademii nauk, 1895. – 380 s.

6. *Chetaev N.G.* Ustojchivost' dvizheniya. – Moskva: izdatel'stvo AN SSSR, 1962. – 97 s.

7. *Thomson W.* (Lord Kelvin) and Tait P.C. Treatise on Natural Philosophy. – Cambrige, 1912. – p.11.

Статья поступила в редакцию 19.01.2023; одобрена после рецензирования 27.01.2023; принята к публикации 16.03.2023.

The article was submitted January 19, 2023; approved after reviewing January 27, 2023; accepted for publication March 16, 2023.