

УДК 629.072.19 (075.8)

В.И. Макеев¹, В.И. Грабчак², П.Е. Трофименко¹, Ю.И. Пушкарев¹

¹Сумской государственной университет

²Львівський інститут Сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного НУ «ЛП»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ДАЛЬНОСТЬ И КУЧНОСТЬ СТРЕЛЬБЫ РЕАКТИВНЫХ СНАРЯДОВ

В статье проводится исследование влияния параметров работы реактивного двигателя реактивных снарядов на дальность и кучность стрельбы. Исследуются влияние температуры реактивного заряда на единичный импульс тяги и время работы реактивного двигателя. Рассматривается порядок определения поправок в дальность с учетом изменения температуры реактивного заряда. Предлагается математическая модель движения летательных аппаратов на твердом топливе, позволяющая учитывать влияние изменения единичного импульса тяги и времени работы двигателя от температуры реактивного заряда.

Ключевые слова: реактивные снаряды, реактивный двигатель, дальность и кучность огня, температура порохового заряда, единичный импульс тяги, коэффициент дегрессивности горения.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время в связи с внедрением автоматизированных систем подготовки установок и корректирования стрельбы реактивных снарядов (активно-реактивных снарядов, активно-реактивных мин), а также при разработке перспективных систем вооружения данного класса, актуальным является вопрос разработки математической модели полета неуправляемых летательных аппаратов на твердом топливе [1].

На сегодняшний день, при изучении полета снарядов, важной задачей является исследование влия-

ния параметров работы реактивного двигателя на дальность и кучность огня, выбор оптимальных параметров работы реактивных двигателей на твердом топливе, а также определение поправок в дальность на изменение температуры реактивного заряда, кроме того, важной практической задачей является учет влияния температуры реактивного заряда на единичный импульс тяги и время работы двигателя.

Целью статьи является исследование влияния параметров работы реактивного двигателя на дальность и кучность стрельбы реактивных снарядов, разработка системы дифференциальных уравнений движения неуправляемых летательных аппаратов на

твердом топливе, позволяющая учитывать влияние изменения единичного импульса тяги и времени работы двигателя от температуры реактивного заряда.

Основная часть

Как известно, любые реактивные снаряды отличаются от артиллерийских снарядов тем, что кроме обычных сил и моментов, к ним приложены реактивные силы и моменты, создаваемые движением реактивной струи, и моменты, создаваемые опережением.

Следуя традициям классической баллистики, при составлении уравнений будем пользоваться баллистической моделью движения.

Сила тяги может быть определена по зависимости [2]

$$P = \mu \cdot u + (p_{\alpha} - p_0) \cdot F_a, \tag{1}$$

где μ – секундный расход газов через сопло; p_{α} – среднее давление газов в выходном сечении; p_0 – атмосферное давление; F_a – площадь выходного сечения; u – среднее по сечению значение скорости истечения газов.

Или через эффективную скорость истечения газов

$$P = \mu \cdot u_e, \tag{2}$$

где $u_e = u + \frac{(p_{\alpha} - p_0)}{\mu} \cdot F_a$ – эффективная скорость истечения.

Учитывая то, что секундный расход газов через сопло μ пропорционален давлению в камере, то из формулы (2) следует, что величина тяги $P(t)$ пропорциональна давлению в камере $p(t)$. Результаты расчетов, проведенные по аналитическим зависимостям, численным интегрированием общей системы уравнений внутренней баллистики для реактивных двигателей на твердом топливе (РДТТ) гипотетического активно-реактивного снаряда 152-мм калибра, а также экспериментальные данные изменения давления в камере РДТТ во времени [3] показаны на рис. 1.

Рассмотрим частный случай учета силы тяги, наиболее часто встречающийся при решении уравнений движения реактивных снарядов [4], когда диаграмма реактивной силы имеет прямоугольную форму, т.е. для $P = const$. Это допущение справедливо при $\omega / q_n > 0,3$, тогда

$$\frac{d\bar{m}}{dt} = -\mu = -\frac{P}{u_e} = const$$

и, следовательно, масса реактивного снаряда является линейной функцией от времени

$$m(t) = \mu t,$$

где $\mu = \omega / (g \cdot \tau_a)$ – относительный расход топлива; ω – вес реактивного заряда; τ_a – время работы реактивного двигателя; m_n – начальная масса реактивного снаряда; t – время полета реактивного снаряда; g – ускорение силы тяжести.

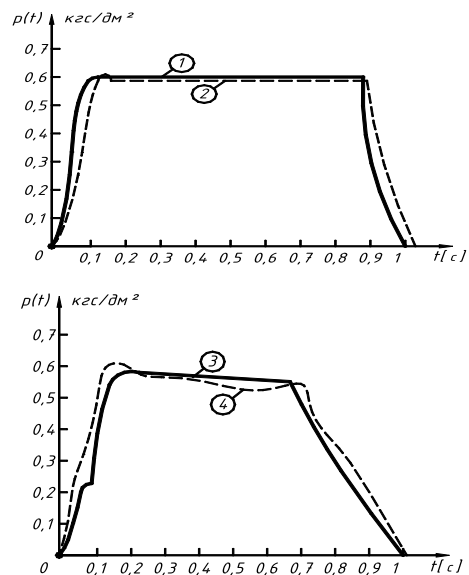


Рис. 1. Кривые изменения давления $p(t)$ в камере РДТТ: 1 – по аналитической зависимости; 2 – методом численного интегрирования; 3, 4 – экспериментальные

Тогда $P = \mu \cdot u_e = (\omega / (g \cdot \tau_a)) \cdot u_e$, а реактивное ускорение $a(t)$ определится по формуле

$$a(t) = \frac{P}{m(t)} = \frac{\omega \cdot u_e / (g \cdot \tau_a)}{m_n - \mu \cdot t} = \frac{\omega \cdot I_1}{\tau_a (q_n / g - (\omega / (g \cdot \tau_a)) \cdot t)}, \tag{3}$$

где $I_1 = u_e / g$ – единичный импульс тяги; q_n – полный вес реактивного снаряда.

Однако в ряде случаев при изучении влияния работы двигателя на полет реактивных снарядов, определении числовых характеристик закона распределения скорости, угла наклона вектора скорости в точке выключения двигателя влияние других параметров работы реактивного двигателя на дальность и кучность стрельбы, при указанных выше допущениях, невозможно. Кроме того, величина единичного импульса I_1 зависит от таких факторов, как свойства пороха, условия горения реактивного заряда в камере и конфигурации сопла. Так, например, единичный импульс тяги I_1 и время работы двигателя в значительной степени зависят от температуры реактивного заряда, а этим как показали исследования пренебрегать нельзя [3]. Поэтому учет этих параметров должен быть обязательным в системе дифференциальных уравнений движения летательных аппаратов на твердом топливе.

Изменение температуры порохового заряда приводит к изменению скорости горения пороха и, следовательно, к изменению времени работы двигателя и единичного импульса порохового заряда.

При увеличении температуры порохового заряда скорость горения пороха увеличивается, интенсивность газообразования и давление пороховых газов в камере сгорания двигателя увеличивается, поэтому увеличивается и текущее значение силы тяги двигателя, пропорциональное давлению в камере сгорания, а время работы двигателя уменьша-

ется, так как пороховой заряд сгорает быстрее $\tau_a < \tau_{aN}$ (рис. 2).

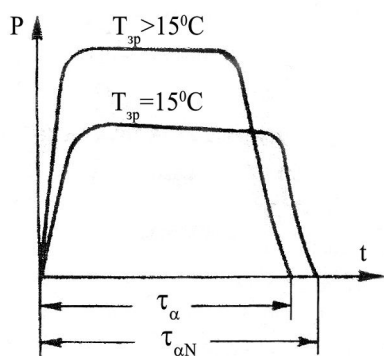


Рис. 2. Диаграмма силы тяги $P(t)$ при $T_{зр} = 15^\circ\text{C}$ и $T_{зр} > 15^\circ\text{C}$

С увеличением температуры заряда $T_{зр}$ площадь индикаторной диаграммы $P(t)$, характеризующая полный импульс силы тяги увеличивается, несмотря на уменьшение времени работы двигателя. Следовательно, при неизменном весе порохового заряда с увеличением его температуры увеличивается единичный импульс силы тяги (порохового заряда) и уменьшается время работы двигателя.

При небольшом диапазоне изменения температуры заряда пользуются приближенными линейными зависимостями единичного импульса I_1 и времени работы двигателя τ_a от температуры заряда $T_{зр}$ [4]:

$$\begin{cases} I_1 = I_{1N} + k_1(T_{зр} - 15^\circ\text{C}); \\ \tau_a = \tau_{aN} - k_2(T_{зр} - 15^\circ\text{C}), \end{cases} \quad (4)$$

где I_{1N} и τ_{aN} – нормальное значение единичного импульса силы тяги (порохового заряда) и времени работы двигателя для нормальной температуры заряда $T_{зр} = 15^\circ\text{C}$; k_1 и k_2 – коэффициенты, определяемые опытным путем.

При больших диапазонах изменения температуры заряда, зависимости единичного импульса и времени работы двигателя от температуры заряда имеют нелинейный характер и их аппроксимируют по опытным данным более сложными выражениями.

Учитывая влияние изменения единичного импульса силы тяги и времени работы двигателя на дальность полета реактивных снарядов, можно заключить, что с увеличением температуры порохового заряда дальность полета реактивных снарядов увеличивается, а с уменьшением – уменьшается.

При больших отклонениях баллистических параметров, особенно температуры заряда и времени работы двигателя, изменения элементов траектории и, в частности, полной дальности полета реактивных снарядов зависят нелинейно от изменения баллистических условий пуска и должны определяться методом разностей с помощью системы дифференциальных уравнений движения центра масс реактивных снарядов.

Исходя из вышеизложенного для исследования влияния параметров работы реактивного двигателя (времени выключения двигателя – t_n , времени работы двигателя – τ_a и др.) на полет реактивных снарядов в системе дифференциальных уравнений предлагается следующее выражение для определения силы тяги:

$$P(t) = i_p \cdot P_{эТ} - F_a \cdot \pi(\gamma) \cdot P_0, \quad (5)$$

где $P_{эТ} = \dot{\omega}_{эТ} \cdot I_1$; $\dot{\omega}_{эТ} = \frac{\omega}{\tau_a}$; i_p – коэффициент расхода топлива (дегрессивности горения); P_0 – атмосферное давление; F_a – площадь выходного сечения сопла; $\dot{\omega}_{эТ}$ – эталонный расход топлива; τ_a – время работы двигателя.

Коэффициент расхода может быть определен соотношением

$$i_p = \dot{\omega} / \dot{\omega}_{эТ}. \quad (6)$$

Расход топлива в этом случае определяется зависимостью:

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{эТ} \left[i_p - 2(i_p - 1)(t - t_n) / \tau_a \right]. \quad (7)$$

Следует отметить, что определение расхода топлива по зависимости (6) будет точно только при относительно небольших изменениях коэффициента расхода $1 \leq i_p \leq 2$.

Форма уравнения (6) предлагается, исходя из анализа диаграммы давлений в камере при стендовых испытаниях реактивных двигателей. При изучении и анализе диаграммы стендовых испытаний активно-реактивных мин 3Ф2 получены следующие величины коэффициента расхода i_p [5]:

- при температуре заряда « \leftarrow » 40°C , $i_p = 1,20 \div 1,24$;
- при температуре заряда « \rightarrow » 50°C , $i_p = 1,12 \div 1,13$.

Зависимости коэффициента деградации горения i_p от температуры реактивного заряда $T_{зр}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента деградации горения i_p от температуры реактивного заряда $T_{зр}$

$T_{зр}$	-40	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
i_p	1,22	1,21	1,20	1,19	1,19	1,18	1,18	1,17	1,17	1,16	1,161	1,15	1,15	1,14	1,14	1,13	1,129	1,125

Величина изменения времени работы двигателя (τ_a) и единичного импульса реактивной силы (I_1) зависит от чувствительности зарядов к изменению температуры реактивного заряда ($T_{зр}$) и определяется значениями производных:

$$\frac{dI_1}{dT_{зр}}, \frac{d\tau_a}{dT_{зр}}.$$

Зависимость единичного импульса и времени работы двигателя от температуры реактивного заряда приведены на рис. 3 и в табл. 2 [6].

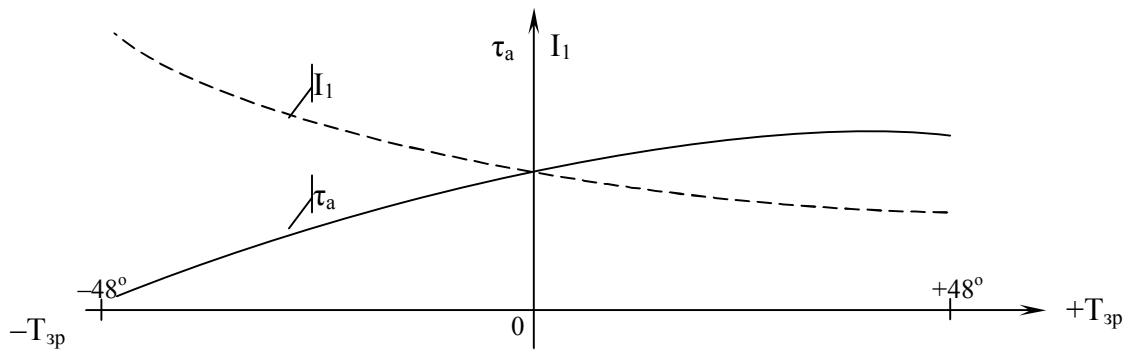


Рис. 3. Зависимость единичного импульса I_1 и времени работы двигателя τ_a , от температуры реактивного заряда $T_{зр}$

Таблица 2

Зависимость единичного импульса I_1 и времени работы двигателя τ_a от температуры реактивного заряда $T_{зр}$

$T_{зр}, ^\circ\text{C}$	-48	-40	-35	-30	-22	-18	-14	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	+6	+8	+10	+14	+15	+16	+18	+22	+30	+35	+40	+48
$\Delta T_{зр}, ^\circ\text{C}$	-63	-55	-50	-45	-37	-33	-29	-25	-23	-21	-19	-17	-15	-13	-9	-7	-5	-1	0	+1	+3	+7	+15	+20	+25	+33
$\Delta I_1, \text{В} / \%I$	-1,3	-1,13	-1,03	-0,92	-0,76	-0,68	-0,59	-0,52	-0,47	-0,43	-0,39	-0,35	-0,31	-0,27	-0,18	-0,14	-0,10	-0,02	0	+0,02	+0,04	+0,08	+0,25	+0,36	+0,49	+0,7
$\Delta \tau_a, \text{В} / \% \tau_a$	-31	-27	-24,5	-22	-18	-16	-14	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-4	-3,1	-2,1	-0,3	0	+0,49	+1,5	+3,4	+7,3	+9,7	+12,2	+16

С учетом этого, выражение силы тяги будет иметь вид:

$$P(t) = \dot{\omega} \left(I_{1N} + \frac{dI_1}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр} \right) - 13,6 \cdot F_a \pi(\gamma) \cdot h_0, \quad (8)$$

где h_0 – атмосферное давление.

Выражение для реактивного ускорения определяется по формуле

$$a(t) = \frac{P(t)}{m(t)} = \frac{P(t) \cdot g}{q(t)}, \quad (9)$$

$$\text{где } q(t) = q_0 - \frac{\omega(t - t_H)}{\tau_a + \frac{d\tau_a}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр}}; \Delta T_{зр} = T_{зр} - 15$$

$^\circ\text{C}$ – отклонение температуры реактивного заряда от табличного значения; I_{1N} – значение единичного импульса тяги при табличном значении температуры реактивного заряда $T_{зр} = 15^\circ\text{C}$; τ_{aN} – значение времени работы двигателя при табличном значении температуры реактивного заряда $T_{зр} = 15^\circ\text{C}$.

С учетом (4) и (5) выражение для $a(t)$ окончательно примет вид:

$$a(t) = \frac{\left[\dot{\omega} \left(I_{1N} + \frac{dI_1}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр} \right) - F_a \pi(\gamma) \cdot h_0 \cdot 13,6 \right] \cdot g}{q_H - \frac{\omega(t - t_H)}{\tau_{aN} + \frac{d\tau_a}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр}}}, \quad (10)$$

где

$$\dot{\omega} = \frac{\omega}{\tau_{aN} + \frac{d\tau_a}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр}} \times \left[i_p - \frac{2(i_p - 1)}{\tau_{aN} + \frac{d\tau_a}{dT_{зр}} \cdot \Delta T_{зр}} (t - t_H) \right]$$

Система дифференциальных уравнений движения центра масс реактивного снаряда [7, 8], с учетом (10) может быть представлена в виде

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi; \\ \dot{y} = V \cdot \sin \theta; \\ \dot{z} = V \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi; \\ \dot{V} = a(t) - a_x - g \cdot \sin \theta; \\ \dot{\theta} = -\frac{\cos \theta \cdot g}{V} - \frac{a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_x \cdot \sin \theta}{V}; \\ \dot{\psi} = a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_z / V; \\ \pi(y) = -\frac{\pi(y) \cdot \dot{y}}{R [\tau(y) + \Delta \tau]}, \end{cases} \quad (11)$$

где $a(t)$ – определяется по зависимости (10);

$$a_x = \frac{i \cdot d^2}{q_H} \cdot 10^3 \pi(y) \frac{\tau_{ON} F_{58}(V_{гт}) \cdot \cos \gamma}{\tau_y (1 - \mu_y)}$$

$$\cos \gamma = \frac{V - W_x \cdot \cos \theta}{V_r}; \mu_y = \frac{\omega \cdot t}{g \cdot \tau_a \cdot m_H}$$

часть порохового заряда сгоревшего к моменту времени t ; $m_H = q_H / g$ – начальная масса снаряда; i – коэффициент формы снаряда; d – калибр снаряда; $\pi(y)$ – изменение давления атмосферы с высотой; $F_{58}(V_{гт})$ – функция сопротивления воздуха, определяется опытным путем (закон сопротивления 58 г.); $\tau_{ON} = 288,9^\circ\text{K}$ – табличное наземное значение виртуальной температуры воздуха; τ_y – изменение виртуальной температуры с изменением высоты; $R = 29,27$ – газовая постоянная 1 кг сухого воздуха;

$$V_r = V \sqrt{1 - \frac{2(W_x \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + W_z \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta)}{V} + \frac{W^2}{V^2}}$$

$$W^2 = W_x^2 + W_z^2; V_{гг} = V_{г} \sqrt{\frac{\tau_{ON}}{\tau(y) + \Delta\tau}},$$

где $V_{г}$ – относительная скорость реактивного снаряда с учетом ветра; $V_{гг}$ – приведена скорость реактивного снаряда, с учетом изменения температуры воздуха; W_x, W_z – продольная и боковая слагающая баллистического ветра; g – ускорение силы тяжести; $\Delta\tau$ – отклонение наземной виртуальной температуры от табличной.

Система дифференциальных уравнений движения центра масс летательных аппаратов на твердом топливе (11) позволяет учитывать параметры порохового заряда через коэффициент дегрессивности горения i_p , конструктивные параметры сопла через площадь выходного сечения сопла F_a . С ее помощью представляется возможность получить законы изменения единичного импульса тяги $I_1 = f_1(T_{зр})$ и времени работы двигателя $\tau_a = f_2(T_{зр})$ от температуры реактивного заряда $T_{зр}$.

Функция $\tau_{(y)}$ определяется в зависимости от высоты траектории:

$$\begin{cases} \tau_y = (288,9^0 - 6,328 \cdot 10^{-3}y) \text{ при } y \leq 9300; \\ \tau_y = 230^0 - 6,328 \cdot 10^{-3}y \cdot (y - 9300) + 1,172 \cdot 10^{-6} \times \\ \times (y - 9300)^2 \text{ при } 9300 < y \leq 12000; \\ \tau_y = 221^0 \text{ при } y > 12000. \end{cases}$$

Выводы

В статье проведены исследования влияния параметров работы реактивного двигателя реактивных снарядов на дальность и кучность стрельбы.

Приведены зависимости учитывающие влияние температуры реактивного заряда на единичный импульс тяги и время работы реактивного двигателя. Предложена математическая модель движения реактивных снарядов позволяющая учитывать влияние

изменения единичного импульса тяги и времени работы двигателя от температуры реактивного заряда. С помощью системы дифференциальных уравнений движения центра масс реактивных снарядов можно решать практические вопросы составления Таблиц стрельбы, а также выбирать оптимальные параметры работы реактивного двигателя реактивного снаряда, время включения и время работы двигателя с целью увеличения дальности стрельбы и улучшения кучности огня для существующих и перспективных образцов реактивных снарядов.

Список литературы

1. Нуруллин Р.Ш. Еволюція воєнного мистецтва та її вплив на розвиток ОВТ СВ // Перша Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективи розвитку озброєння і військової техніки в Збройних Силах України" 04-05 березня 2008 р. – Львів: ЛІСВ. – 2008. – С. 27-34.
2. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н., Богодистов С.С. Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.
3. Гантмахер Ф.Р., Левин Л.М. Теория полета неуправляемых ракет. – М.: Издательство физико-математической литературы, 1959. – 356 с.
4. Равдин И.Ф. Внешняя баллистика неуправляемых реактивных снарядов. – Л.: ВАА, 1972. – 184 с.
5. Костенко Н.Ф. Ракетные двигатели твердого топлива: Учебное пособие. – Пенза: ПВАИУ, 1954. – 264 с.
6. Makeev V.I. Пути повышения эффективности стрельбы АРС (АРМ) совершенствованием методов и средств баллистической подготовки: Дисс. ...канд. техн. наук. – Л.: ВАА, 1982. – 327 с.
7. Внешняя баллистика. Кн. 1. – М.: ВАИА им. Дзержинского, 1954. – 463 с.
8. Внешняя баллистика. Кн. 2. – М.: ВАИА им. Дзержинского, 1954. – 496 с.

Поступила в редколлегию 15.08.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Д. Костерной, Сумской государственный университет, Сумы.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА НА ДАЛЬНІСТЬ І КУЧНІСТЬ СТРІЛЬБИ РЕАКТИВНИХ СНАРЯДІВ

V.I. Makeyev, V.I. Grabchak, P.E. Trophimenko, Y.I. Pushkaryov

В статті проводяться дослідження впливу параметрів роботи реактивного двигуна реактивних снарядів на дальність і кучність стрільби. Досліджується вплив температури реактивного заряду на одиничний імпульс тяги і час роботи реактивного двигуна. Розглядається порядок визначення поправок до дальності стрільби з урахуванням зміни температури реактивного заряду. Пропонується математична модель руху літальних апаратів на твердом паливі, яка дозволяє отримати закони зміни одиничного імпульсу тяги і часу роботи двигуна від температури реактивного заряду.

Ключові слова: реактивні снаряди, реактивний двигун, дальність і кучність вогню, температура порохового заряду, одиничний імпульс тяги, коефіцієнт дегрессивності горіння.

THE RESEARCH OF THE WORKS PARAMETERS INFLUENCE OF RAMJET ON DISTANCE AND PRECISIONS OF JET-PROJECTILES

V.I. Makeyev, V.I. Grabchak, P.E. Trophimenko, Y.I. Pushkaryov

The research of the works parameters influence of ramjet on distance and precisions of jet-projectiles is conducted. The influence of temperature of reactive charge on a single thrust impulse and burn time ramjet is investigated. Determination order of amendments on distance taking into account the change of temperature of reactive charge is examined. The mathematical model of aircrafts motion on a hard fuel allowing to get the laws of charge on a single impulse of thrust and burn time engine from temperature of reactive charge is offered.

Keywords: jet-projectiles, ramjet, distance and precisions of fire, temperature powder charge, single thrust impulse, degressive burning factor.