

УДК 623.546:621.3

О.О. Журавльов, С.В. Герасимов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ ПОТРІБНИХ ТОЧНОСТІ ПУСКІВ ТА ПОТУЖНОСТІ БОЙОВОГО ЗАРЯДУ РАКЕТИ, ЩО ПРОЕКТУЄТЬСЯ

Обґрунтовані основні розрахункові показники ракети – вартості та ефективності нанесення ракетного удару по малорозмірній цілі, які дозволили отримати математичну залежність між змінними: потрібною точністю пусків та потужністю бойового заряду ракети. Оптимальне сполучення потрібних значень точності пусків та потужності бойового заряду ракети, що проектується, отримується на основі визначення мінімуму функції, яка описує залежність вартості ракети від тротилового еквіваленту, з невизначеними коефіцієнтами. Наведені рекомендації щодо застосування запропонованого методу.

**Ключові слова:** етап проектування ракети, вартість ракети, точність пусків, потужність бойового заряду, вірогідність ураження малорозмірної цілі.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На етапі проектування ракети однакові значення  $P$  показника ефективності ракетного удару можуть бути забезпечені при різних значеннях  $m_{бч}$  маси бойової частини шляхом підбора відповідного значення  $E$ , що характеризує точності стрільби, а також збільшенням витрати ракет. Тому, якщо при обґрунтуванні вимог до високоточної ракети виходити тільки з однієї вимоги забезпечити задане значення  $P \geq P^*$  проектного показника ефективності ракетного удару, то задача не одержує однозначного рішення.

**Мета статті** полягає в розробці методу визначення оптимального сполучення точності пусків і потужності бойового заряду моноблочної бойової частини (МБЧ) ракети при стрільбі по малорозмірній цілі.

### Основна частина

Для одержання однозначного рішення при визначенні оптимального сполучення точності пусків та потужності бойового заряду МБЧ ракети при стрільбі по малорозмірній цілі необхідно ще накласти додаткову умову по економічності, що може бути виражено обмеженням сумарних витрат на ураження типового об'єкта або вимогою мінімуму цих характеристик.

При вирішенні зазначеної проблеми у якості типового об'єкта ураження пропонується обрати малорозмірну цілі. В усіх випадках вимоги до точності пуску ракет, що оснащені МБЧ, по малорозмірним цілям будуть більш жорсткими, ніж при пусках ракет, оснащених касетними бойовими частинами, по площинним об'єктам. Тому вимоги до точності пусків ракет варто проводити на основі оцінки ефективності удару однією ракетою, що оснащена МБЧ, по малорозмірній цілі.

Для отримання співвідношення, яке сполучає потужність бойового заряду (масу бойової частини)  $m_{бч}$  і точність пусків (технічне розсіювання)  $E_{тр}$  МБЧ ракети при стрільбі по малорозмірній цілі, пропонується виразити вартість ракети  $C = C_1 + C_2$  через  $m_{бч}$  і  $E_{тр}$ .

Вартість ракети  $C$ , що залежить від великої кількості різних факторів, частина з яких на етапах ескізного та технічного проектування є невизначеними, представимо у вигляді суми двох основних доданків:

– вартості  $C_1$  бойової і ракетної частин (без бортових приладів системи управління), що залежить від заданої максимальної дальності стрільби  $L_{max}$  і маси МБЧ  $m_{бч}$ . Позначимо її як функцію:

$$C_1 = f_1(L_{max}, m_{бч});$$

– вартості  $C_2$  бортових приладів системи управління (СУ), що залежить від потрібної точності стрільби. Позначимо її як функцію:

$$C_2 = f_2(E_{тр}).$$

Тоді загальну (сумарну) вартість ракети представимо у виді:

$$C = C_1 + C_2 = f_1(L_{max}, m_{бч}) + f_2(E_{тр}).$$

Функції  $C_1 = f_1(L_{max}, m_{бч})$  та  $C_2 = f_2(E_{тр})$  в умовах невизначеності приблизно можуть бути представлені лінійними функціями з невизначеними коефіцієнтами. Наближена оцінка діапазонів значень цих невизначених коефіцієнтів може бути проведена на основі аналізу доступних економічних показників подібних комплексів.

Відомо, що при збільшенні значення  $m_{бч}$  стартова маса ракети, що проектується, також буде збі-

льшуватися, а тому, буде збільшуватися й її вартість  $C_1$ . Тому, на інтервалі припустимих значень  $m_{\text{бч}} \in [m_{\text{бч}0}; m_{\text{бч}1}]$  функцію  $f_1(L_{\text{max}}, m_{\text{бч}})$ , при  $L_{\text{max}} = \text{const}$ , задамо лінійно зростаючою функцією з невизначеними коефіцієнтами  $c_{10} > 0$ ,  $c_{11} > 0$ :

$$C_1 = f_1(L_{\text{max}}, m_{\text{бч}}) = c_{10} + c_{11} m_{\text{бч}}.$$

Значимо, що зменшення значення технічного розсіювання  $E_{\text{тр}}$  може бути досягнуте за рахунок вибору відповідного типу бортової навігаційної системи (НС). У рамках обраного типу НС, також, можливе використання більш точних засобів вимірювання. Очевидно, що складова  $C_1$  вартості ракети збільшується при зменшенні потрібного значення  $E_{\text{тр}}$ . Тому, на інтервалі значень  $E_{\text{тр}} \in [E_{\text{тр}0}; E_{\text{тр}1}]$  функцію  $f_2(E_{\text{тр}})$  задамо функцією, що лінійно зменшується, з невизначеними коефіцієнтами  $c_{20} > 0$ ,  $c_{21} > 0$ :

$$C_1 = f_2(E_{\text{тр}}) = c_{20} - c_{21} E_{\text{тр}}.$$

Тоді вартість високоточної ракети в заданих діапазонах зміни маси  $m_{\text{бч}}$  і розсіювання  $E_{\text{тр}}$  представляється наступною лінійною функцією з невизначеними коефіцієнтами:

$$C = c_0 + c_{11} m_{\text{бч}} - c_{21} E_{\text{тр}}, \quad (1)$$

де  $c_0 = c_{10} + c_{20}$ .

У праву частину рівняння (1) входять два невідомих конструктивних параметри ракети  $m_{\text{бч}}$  і  $E_{\text{тр}}$ , що у ході подальших перетворень виразимо через третій конструктивний параметр  $q$  – тротильовий еквівалент бойового заряду МБЧ.

Для цього, спочатку, технічне розсіювання  $E_{\text{тр}}$  виразимо через серединне відхилення координат точок падіння МБЧ від координат об'єкта ураження  $E$  і похибки підготовки даних на пуски ракет  $E_1$ :

$$E_{\text{тр}} = \sqrt{E^2 - E_1^2}. \quad (2)$$

Для визначення величини похибки  $E_1$  скористаємося величиною припустимого зниження ефективності ракетного удару. Будемо вважати, що похибки підготовки даних на пуски є припустимими, якщо вони не приводять до збільшення необхідної кількості ракет для ураження типового об'єкта з заданою імовірністю.

Установимо функціональний зв'язок між технічним розсіюванням  $E_{\text{тр}}$  і припустимими похибками підготовки даних на пуски  $E_{1\text{доп}}$ , при яких практично не знижується ефективність ракетного удару.

Показником ефективності ракетного удару по малорозмірній цілі оберемо імовірність її ураження

$P$ . Зменшення значення імовірності ураження малорозмірній цілі  $\Delta P$ , що викликане похибками підготовки даних на пуски  $E_1$ , запишемо виді наступного співвідношення:

$$\Delta P = P_0 - P, \quad (3)$$

де  $P_0$  і  $P$  – імовірності ураження малорозмірній цілі при відсутності та при наявності похибок підготовки даних на пуски відповідно.

Значення ймовірностей  $P_0$  і  $P$  при круговому нормальному розсіюванні точок падіння МБЧ відносно цілі та круговому нормальному розподілі похибок підготовки та при координатному ступінчастому круговому законі ураження малорозмірній цілі визначаються по формулах:

$$P_0 = 1 - \exp\left[-\rho^2 \frac{R_{\text{зп}}^2}{E_{\text{тр}}^2}\right]; \quad (4)$$

$$P = 1 - \exp\left[-\rho^2 \frac{R_{\text{зп}}^2}{E_{\text{тр}}^2 + E_1^2}\right], \quad (5)$$

де  $E_{\text{тр}}$ ,  $E_1$  – серединні відхилення, що характеризують технічне розсіювання точок падіння МБЧ і похибки підготовки даних на пуски ракет відповідно;  $R_{\text{зп}}$  – приведений радіус зони ураження малорозмірній цілі.

З цих формул випливає:

$$E_{\text{тр}}^2 = -\frac{\rho^2 R_{\text{зп}}^2}{\ln[1 - P_0]}; \quad (6)$$

$$E_{\text{тр}}^2 + E_1^2 = -\frac{\rho^2 R_{\text{зп}}^2}{\ln[1 - P]}. \quad (7)$$

Визначимо припустиме співвідношення похибок підготовки і технічного розсіювання. Розділивши ліву і праву частини (7) на (6), та підставив отриманий вираз в формулу (3), отримаємо:

$$\frac{E_1}{E_{\text{тр}}} = \sqrt{\frac{\ln[1 - P - \Delta P]}{\ln[1 - P]} - 1}. \quad (8)$$

Таким чином, припустимо похибку підготовки даних на пуски високоточних ракет  $E_{1\text{доп}}$  виразимо через  $E_{\text{тр}}$  технічне розсіювання за допомогою наступної формули:

$$E_{1\text{доп}} = E_{\text{тр}} F_1, \quad F_1 = \sqrt{\frac{\ln[1 - P - \Delta P]}{\ln[1 - P]} - 1}. \quad (9)$$

Для високоточної ракети  $P^* \leq P \leq 1$ , де  $P^* = 0,5$ ,  $\Delta P = 0,1 \dots 0,2$ .

Підставимо (9) у (2) і після перетворень одержимо функціональний зв'язок необхідних значень розсіювання  $E_{\text{тр}}$  і серединного відхилення  $E$  у вигляді співвідношення:

$$E_{тр} = E \sqrt{\frac{\ln[1-P^*]}{\ln[1-P^* - \Delta P]}} \quad (10)$$

Тепер знайдемо функціональний зв'язок між необхідним серединним відхиленням  $E$  і тротиловим еквівалентом  $q$ . Для цього скористаємося формулою (5), але записаної в іншому виді. При координатному ступінчастому круговому законі ураження і при нормальному законі розподілу координат точок падіння МБЧ відносно об'єкта ураження, імовірність ураження малорозмірної цілі однією ракетою визначається формулою:

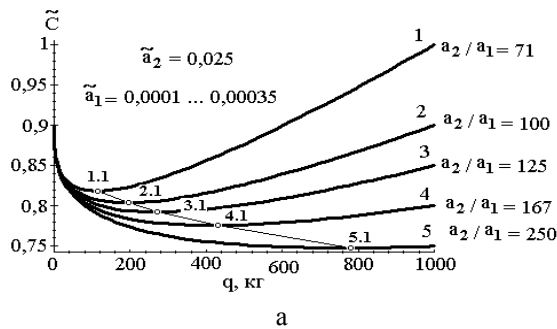
$$P = 1 - \exp\left[-\rho^2 K_u^2 \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{E}\right)^2\right],$$

де  $K_u$  – коефіцієнт, що характеризує уразливість типового об'єкта ураження до впливу вражаючих факторів фугасної бойової частини.

При заданому значенні необхідної імовірності ураження малорозмірної цілі (при  $P = P^*$ ) запишемо:

$$\rho^2 K_u^2 \left(\frac{\sqrt[3]{q}}{E}\right)^2 = \ln \frac{1}{1-P^*} \quad (11)$$

Вираз (11) дозволяє одержати функціональний зв'язок між необхідним серединним відхиленням  $E$  (при якій ракета буде вважатися високоточною) і тротиловим еквівалентом  $q$  фугасної бойової частини у виді:



$$E = K \sqrt[3]{q}, \quad (12)$$

де  $K = \frac{\rho K_u}{\sqrt{\ln \frac{1}{1-P^*}}}$ .

Підставимо (12) у (10), а потім, після перетворень у (1), одержимо залежність вартості ракети  $C$ , як нелінійну функцію одного конструктивного параметра – тротилового еквівалента  $q$  фугасної бойової частини із невизначеними коефіцієнтами:

$$C = a_0 + a_1 q - a_2 q^{1/3}, \quad (13)$$

де  $a_0 = c_0 + c_{11} m_{кн0}$ ;

$$a_1 = c_{11} (1 + k_{кн}) k_{вв};$$

$$a_2 = c_{21} \frac{\rho K_u}{\sqrt{\ln \frac{1}{1-P^*}} \ln \frac{1-P^* - \Delta P}{1-P^*}}$$

$m_{кн0}$  – маси конструкції МБЧ без вибухової речовини;  $k_{кн}$ ,  $k_{вв}$  – коефіцієнти, які враховують частку вибухової речовини в масі конструкції МБЧ і тротиловому еквіваленті відповідно.

Залежності відносної вартості ракети від тротилового еквівалента  $q$  фугасної БЧ при різних значеннях співвідношень невизначених коефіцієнтів  $a_1$  і  $a_2$  представлені на рис. 1, а, б.

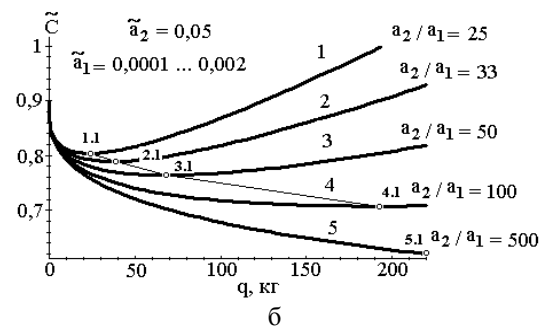


Рис. 1. Залежність відносної вартості ракети від тротилового еквівалента  $q$  фугасної бойової частини при різних значеннях відносин коефіцієнтів  $a_2$  і  $a_1$

Аналіз отриманих графіків дозволяє укласти, що при  $a_2 \gg 0$  функція (19) у діапазоні значень аргументу  $q \in [q_0; q_1]$  має мінімум. Цей факт дозволяє визначити значення  $q^*$ , що відповідає мінімуму функції (19) (точки 1.1, 2.1, 3.1, 4.1, 5.1 на рисунку 1, а, б). Знайдемо оптимальне значення тротилового еквівалента  $q^*$ , виходячи з умови мінімальної вартості ракети. На підставі умови екстремуму функції (13) і вирішення рівняння відносно  $q$ , одержимо формулу для оцінки оптимального значення  $q^*$ :

$$q^* = \left(\frac{a_2}{3a_1}\right)^{3/2} \quad (14)$$

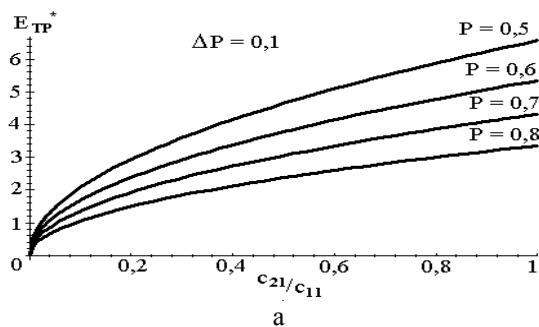
Підставимо формулу (14) у (12) і одержимо формулу для оцінки оптимального значення  $E^*$ :

$$E^* = \sqrt{\frac{c_{21} K^3}{3c_{11} (1 + k_{кн}) k_{вв}}} \sqrt{\frac{\ln[1-P^*]}{\ln[1-P^* - \Delta P]}} \quad (15)$$

Підставимо формулу (15) у (10) і одержимо формулу для оцінки оптимального значення  $E_{тр}^*$ :

$$E_{\text{тр}}^* = \sqrt{\frac{c_{21}}{3c_{11}} \frac{K^3}{(1+k_{\text{кн}})k_{\text{вв}}} \frac{\ln[1-P^*]}{\ln[1-P^* - \Delta P]}}. \quad (16)$$

Залежності оптимального значення технічного



розсіювання  $E_{\text{тр}}^*$  від відношення невизначених коефіцієнтів  $c_{21}/c_{11}$  для різних значень  $P$  і  $\Delta P$  представлені на рисунках 2 а, б.

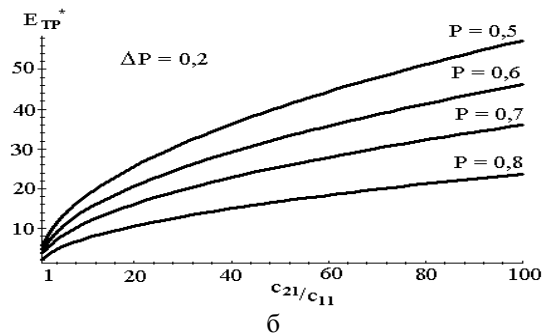


Рис. 2. Залежність оптимального значення  $E_{\text{тр}}^*$  технічного розсіювання від  $c_{21}/c_{11}$  для різних значень  $P$  і  $\Delta P$

Отримані формули (14) – (16) дозволяють на етапі формування тактико-технічних вимог до перспективного ракетного комплексу на основі аналізу вартості складових частин ракети висувати вимоги до точності пусків і масі бойової частини ракети для забезпечення необхідного значення ефективності нанесення ракетного удару по малорозмірній цілі.

### Висновок

Розроблений метод дозволяє на етапі проектування ракети на основі попереднього аналізу вартості її складових в умовах невизначеності отримати оптимальне сполучення точності пусків і потужності бойового заряду моноблочної бойової частини ракети при стрільбі по малорозмірній цілі.

### Список літератури

1. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / Б.А. Авотынь, Е.Г. Анисимов, А.Ф. Барковский и др.; под общ. ред. А.А. Бобринкова. – СПб.: "Галлея Принт", 2006. – 424 с.
2. Средства поражения и боеприпасы / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.
3. Фендриков Н.М. Методы расчетов боевой эффективности вооружения / Н.М. Фендриков, В.И. Яковлев. – М.: Воениздат. – 1971. – 224 с.
4. Месаревич М.И. Общая теория систем: математические основы / М.И. Месаревич, Я. Такахаха. – М.: Мир. – 1978. – 312 с.

Надійшла до редколегії 26.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СООТВЕТСТВИЯ НЕОБХОДИМОЙ ТОЧНОСТИ ПУСКОВ И МОЩНОСТИ БОЕВОГО ЗАРЯДА ПРОЕКТИРУЕМОЙ РАКЕТЫ

А.А. Журавлев, С.В. Герасимов

Обоснованы основные расчетные показатели ракеты – стоимость и эффективность нанесения ракетного удара по малоразмерной цели, которые позволили получить математическую зависимость между переменными: необходимой точностью пусков и мощностью боевого заряда ракеты. Оптимальное соответствие необходимых значений точности пусков и мощности боевого заряда проектируемой ракеты рассчитывается на основе определения минимума функции, которая описывает зависимость стоимости ракеты от тротилового эквивалента, с неопределенными коэффициентами. Приводятся рекомендации по использованию предложенного метода.

**Ключевые слова:** этап проектирования ракеты, стоимость пусков ракеты, точность пусков, мощность боевого заряда, вероятность поражения малоразмерной цели

### METHOD OF DETERMINATION OF OPTIMAL ACCORDANCE OF NECESSARY EXACTNESS OF STARTING AND POWER OF BATTLE CHARGE OF THE DESIGNED ROCKET

A.A. Zhuravlev, S.V. Gerasimov

The basic calculation indexes of rocket are reasonable is a cost and efficiency of causing of rocket blow to the little size aim, that allowed to get mathematical dependence between variables: by necessary exactness of starting and power of battle charge of rocket. Optimal accordance of necessary values to exactness of starting and power of battle charge of the designed rocket settles accounts on the basis of determination of a minimum of function that describes dependence of cost of rocket on a trotyl equivalent, with indefinite coefficients. Recommendations over are brought on the use of the offered method.

**Keywords:** stage of planning of rocket, cost of starting of rocket, exactness of starting, power of battle charge, hit of little size aim probability