УДК 623.467.56 https://doi.org/10.15407/itm2021.03.037

Е. Г. ГЛАДКИЙ[1], О. М. ЗАВОЛОКА[2]

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕАКТИВНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛПОВОГО ВОГНЮ

[1]Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне" імені М. К. Янгеля, вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна

Інститут технічної механіки
[2]Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: office.itm@nas.gov.ua

Сучасні реактивні системи залпового вогню (РСЗВ) перебувають на озброєнні багатьох країн світу і є ефективним засобом ураження розосереджених на площі групових цілей. У процесі створення та модернізації РСЗВ виникають задачі оцінювання ефективності їх застосування з метою вибору оптимального варіанту. Для РСЗВ основним показником ефективності ураження площинних цілей є відносна площа ураження цілі. Цей показник залежить від площі ураження самої системи залпового вогню (ступеня збитку, що завдається цілі під час залпу).

У статті запропоновано відносний критерій, який дозволяє оцінити і оптимізувати площу ураження залпу. Критерій пов’язує площу ураження залпу і неуражену площу по відношенню до максимальної площі ураження і площі накриття. В якості площі накриття розглядається площа охоплюючого опуклого багатокутника для всіх точок падіння реактивних снарядів (РС) під час залпу. Показано, що область зміни запропонованого критерію представляє інтервал [0, 1].

Із застосуванням запропонованого критерію для 4 точок падіння РС з площею ураження у вигляді кола, досліджено дві базові структури: ромб (двох правильних трикутників) і квадрат. Для них визначено оптимальні відстані для точок падіння РС, які дозволяють отримати максимальний рівень ураження. Показано, що отримане оптимальне розташування точок падіння РС дозволяє довести ступінь збитку для структури квадрата до більш оптимальної схеми ромба (являє собою частину гексагональної структури, найбільш ефективної з точки зору задачі пакування). Для залпу 16 РС отримано, що з точки зору запропонованого критерію існує оптимальне співвідношення площі (радіусу) ураження РС і параметрів технічного розсіювання. Максимальне значення критерію для залпа з урахуванням технічного розсіювання не перевищує рівня 0,33 і воно значно менше за ту величину, яку можливо отримати для оптимальних структур (ромб і квадрат).

Показано можливості використання критерію для вибору оптимальних точок падіння РС з урахуванням різних типових цілей в складі групової цілі та відмінних від кола конфігурацій площ ураження для окремого РС.

Ключові слова: *реактивна система залпового вогню, ефективність, площа ураження залпу, площа накриття.*

Up-to-date multiple launch rocket systems (MLRSs) are adopted by many countries of the world, and they are an effective weapon against dispersed multiple targets. Developing and upgrading MLRSs calls for estimating their efficiency with the aim to select an optimum alternative. For an MLRS, the basic measure of area target destruction efficiency is the relative damage area. This measure depends on the damage area of the MLRS itself (extent of damage by one salvo).

The paper suggests a relative criterion that allow one to estimate and optimize the salvo damage area. The criterion is based on the ratio of the salvo damage area to the maximum damage area and that of the undamaged area to the coverage area. The coverage area is defined as the area of the enveloping convex polygon for all points of missile impact in a salvo. It is shown that the domain of variation of the suggested criterion is the interval [0, 1].

Using the suggested criterion for 4 points of missile impact with a circular damage area, two basic structures are studied: a rhomb (two regular triangles) and a square. For them, optimum distances between the missile impact points that maximize the destruction level are determined. It is shown that the obtained optimum arrangement of missile impact points allows one to bring the extent of damage for the square structure to the more optimum rhomb layout (represents a part of the hexagonal structure, which is the most efficient from the standpoint of the packing problem). For a 16-missile salvo, it is shown that from the standpoint of the suggested criterion there exists an optimum relation between the missile damage area (radius) and the technical scattering parameters. The maximum value of the criterion for a missile salvo with account for the technical spread does not exceed 0.33 and is much lower than the value that can be obtained for the optimum structures (rhomb and square).

The paper shows possibilities of using the criterion in deciding on optimum missile impact points with account for various typical targets within a multiple target and missile damage area configurations other than a circle.

Keywords: *multiple launch rocket system, efficiency, salvo damage area, coverage area.*

Вступ. Реактивна система залпового вогню (РСЗВ) – один з досить ефективних засобів вогневого ураження супротивника. Такі системи перебувають на озброєнні багатьох сучасних армій світу. Вони дозволяють вирішувати широкий спектр бойових тактичних і оперативно-тактичних завдань і використовуються для нанесення вогневих ударів по живій силі, техніці, вогневих засобах супротивника, командним пунктам тощо. РСЗВ являють собою багатоствольні установки, що за короткий час забезпечують запуск по супротивникові від 4 до 50 реактивних снарядів (РС). Багатозарядність РСЗВ визначає їх високу вогневу продуктивність і можливість одночасного ураження цілей на значних площах. Власне основне завдання сучасних РСЗВ – боротьба з розосередженими бойовими підрозділами супротивника.

У процесі розробки й модернізації РСЗВ зазвичай виникають питання оцінювання ефективності їх застосування й порівняння різних модифікацій. Наприклад, зараз здійснюється модернізація наявних РСЗВ з некерованими РС шляхом використання більш досконалих твердих палив і вибухових речовин бойової частини. Це приводить до збільшення дальності стрільби й площі ураження окремого РС. Проте зі збільшенням дальності стрільби зростає технічне розсіювання, і як наслідок, необхідно оцінити ефективність модернізованого варіанта у порівнянні з базовим. Останнім часом для зниження впливу технічного розсіювання на ефективність ураження цілей некеровані РС обладнують системами керування. Відповідно до цього може розглядатися задача оптимального розподілу точок падіння РС з метою нанесення цілі максимального збитку.

В окремих випадках для оцінювання ефективності застосування РСЗВ розглядаються конкретні групові цілі (див., наприклад, [1]), які складаються з окремих типових об’єктів/елементів (жива сила, техніка, вогневі системи тощо). Виходячи з характеристик окремих об’єктів та їх розташування на площині цілі, визначаються ступінь їх ураження й ступінь ураження цілі в цілому. В якості показника ефективності використовується середня кількість уражених об’єктів або ймовірність ураження цілі, як імовірність ураження певних комбінацій об’єктів (комбінацій, що вражаються). Складність при застосуванні такого підходу до оцінювання ефективності полягає у тому, що необхідно задати розташування окремих об’єктів на площині цілі та комбінацій, що вражаються. При цьому зазначений вище критерій ефективності виявляється дуже чутливим до їхньої зміни.

У більшості випадків ефективність ураження площинних цілей під час залпу оцінюється як математичне очікування (середнє) відносної ураженої площі цілі [2]. Вона залежить від точності нанесення удару й технічного розсіювання РС. Розсіювання визначає площу ураження залпу, тобто ту ступінь збитку, яку можуть завдати у сукупності всі РС. Власне, площа ураження для залпу є однією з основних характеристик РСЗВ. Бажано, щоб ця величина була якнайбільшою.

Основна частина. Враховуючи вищесказане, побудуємо критерій, який характеризуватиме площу ураження під час залпу РС. Припустимо, що для певного типу елементарних цілей (об’єктів групової цілі) відомий радіус кола ураження одного РС, тобто кола, при влучанні в межі якого розглянута ціль уражається(знищується) з імовірністю близькою до одиниці. В процесі побудови критерію будемо вимагати, щоб площа ураження залпу РС (з N РС, розташованих на одній пусковій установці) була максимальною. Зрозуміло, що така площа буде не більшою за сумарну площу ураження всіх РС

$S_{yp}^{\max} = N \cdot S_1$ (де S_1 – площа, яку вражає один РС). Перетинання площ ураження окремих РС зменшує зазначену величину. На рисунку 1 площа ураження – це сумарна зафарбована частина, утворена всіма РС.

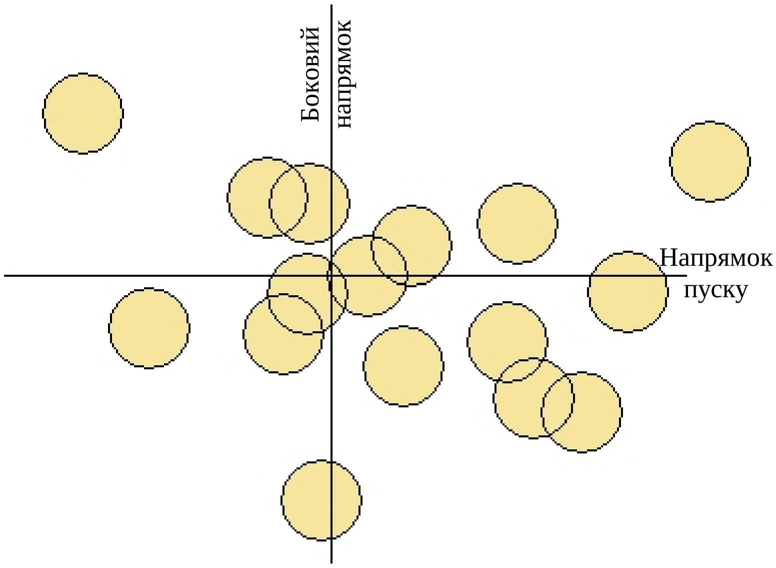


Рис. 1 – Формування області ураження при залпі РС

У той же час необхідно, щоб неуражена площа під час залпу РС була мінімальною. Для пояснення поняття неураженої площі додатково введемо поняття площі накриття. Під площею накриття будемо розуміти замкнену область, яка являє собою опуклий багатокутник із заокругленими вершинами, як показано на рисунку 2. Він є подібним до опуклого багатокутника, що є охопнюючим для центрів кіл ураження, і отриманий з урахуванням радіуса ураження (R).

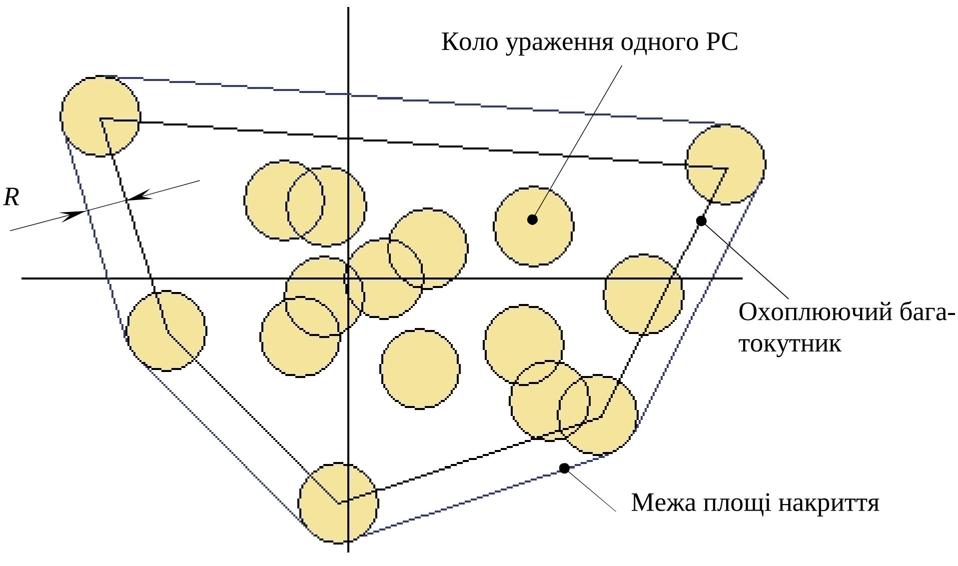


Рис. 2 – Формування площі накриття залпу РС

Таким чином, площа неураження – це частина площі накриття поза колами ураження.

З урахуванням висунутих вимог, критерій ефективності для залпу РС запишемо у такий спосіб

$$K = \frac{S_{ур}}{S_{ур}^{\max}} - \frac{S_{пор}}{S_{накр}}\,, \tag{1}$$

де $S_{ур}$ – площа ураження N РС (з урахуванням перетинань); $S_{ур}^{\max}$ – максимальна площа ураження ($S_{ур}^{\max} = N \cdot S_1 = N®R^2$, R – радіус ураження одного РС); $S_{накр}$ – площа накриття; $S_{пор}$ – неуражена площа (площа «порожнеч» у межах площі накриття).

Оскільки $S_{пор} = S_{накр} – S_{ур}$, вираз для критерію (1) може бути переписано наступним чином:

$$K = \frac{S_{ур}}{S_{ур}^{\max}} - \frac{S_{накр} - S_{ур}}{S_{накр}} = \frac{S_{ур}}{S_{ур}^{\max}} + \frac{S_{ур}}{S_{накр}} - 1 \tag{2}$$

або у вигляді

$$K = S_{ур}\left(\frac{1}{S_{ур}^{\max}} + \frac{1}{S_{накр}}\right) - 1\,. \tag{3}$$

За відомих і незмінних кількостях РС і площі ураження окремого РС, площі накриття й ураження під час залпу залежать від характеристик технічного розсіювання. В якості останніх будемо використовувати середні квадратичні відхилення ($\pm_X$, $\pm_Z$) у напрямку пуску й бічному/поперечному напрямках відповідно. При зменшенні технічного розсіювання ($\pm_X$, $\pm_Z \to 0$), усі центри кіл ураження прагнуть зійтись в одну точку, відповідно площі ураження й накриття вироджуються в одиничне коло ураження. Таким чином, $S_{ур} \to S_1$, $S_{накр} \to S_1$, звідки випливає $K \to \dfrac{1}{N}$ (для великого N маємо $K{\approx}0$).

З іншого боку, при зростанні технічного розсіювання для залпу РС ($\pm_X$, $\pm_Z \to \infty$), отримаємо $S_{ур} \to S_{ур}^{\max}$, $S_{пор} \to S_{накр}$.

Відповідно $K \to 0$.

Максимальне значення K можливо отримати у випадку, коли нам вдається досягти $S_{ур} \to S_{ур}^{\max}$ і $S_{пор} \to 0$. Таким чином, область зміни критерію (1) складе $0 \le K \le 1$.

З метою дослідження поведінки запропонованого критерію розглянемо базові типові структури розташування кіл ураження. Вони можуть розглядатися як основа побудови більш складних схем. Розглянемо чотири кола ураження.

Розглянута задача є подібною до класичної задачі впакування [5] на площині кіл однакового радіуса в деяку фігуру (коло, прямокутник або інш.). У якості критерію оптимальності у цьому випадку використовується щільність упаковування – відношення суми площ упакованих кіл до площі області, яку заповнюють колами. У нашій постановці задача дещо відрізняється від класичної, оскільки, по-перше, із самого початку не передбачається область, яку потрібно заповнити колами, і, по-друге, у класичних задачах упакування не допускається перетинання кіл. Проте певні висновки, що отримані в теорії оптимального впакування, ми використаємо в подальшому. Наприклад, відомо, що на площині найбільш оптимальним є гексагональне розташування кіл, коли їх центри розташовуються у вершинах правильного шестикутника [3]. У цьому випадку досягається максимальна щільність упакування. Врахуємо це під час розгляду типових структур.

У якості базових типових структур будемо аналізувати дві:

1) центри кіл розташовуються у вершинах ромба, що складається із двох правильних трикутників (представляє частину гексагональної структури);

2) центри кіл розташовуються у вершинах правильного квадрата.

Оцінимо значення критерію (1) для випадку, коли для кожної структури «порожнечі» усередині між колами ураження відсутні й при цьому немає спільного перетинання трьох і більше кіл, тобто кожна область перетинання формується виключно двома колами (рисунок 3).

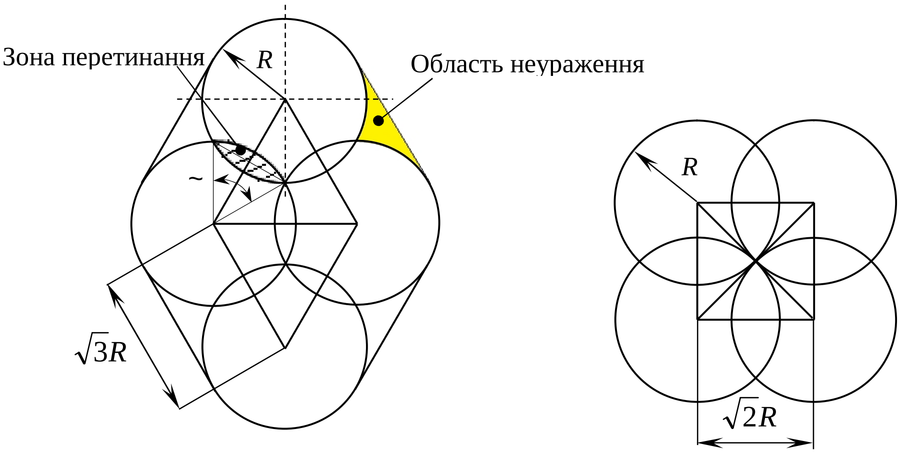


Рис. 3 – Типові структури

У першому випадку сторона ромба (правильного трикутника) дорівнює $R\sqrt{3}$. У випадку розміщення центрів кіл у вершинах квадрата, розмір його сторони складе $R\sqrt{2}$. Таким чином, у структурі ромба центри кіл розташовуються далі один від одного ніж у випадку квадрата, отже, площа перетинання двох кіл у першому випадку буде меншою (проте у структурі ромба таких перетинань буде п’ять, проти чотирьох у випадку квадрата).

Визначимо площу ураження для кожної зі структур, для чого визначимо площі зон перетинання кіл (рис. 3). Площа сегмента кола, що становить половину області перетинання двох кіл, визначається за відомою формулою

$$S_{сег} = \frac{1}{2}R^2\left(\frac{®\sim}{180^\circ} - \sin\sim\right),$$

де ~ – центральний кут, що спирається на хорду.

Довжина хорди, що з’єднує точки перетину двох кіл, у структурі ромба (правильного трикутника) буде дорівнювати R, а у випадку квадрата – $R\sqrt{2}$.

Кут, що відповідає хорді, у першому випадку дорівнює ~ = 60°, у другому – ~ = 90°. Таким чином, площі сегментів

– для ромба (правильного трикутника)

$$S_{сег} = \frac{1}{2}R^2\left(\frac{®}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \approx 0{,}091R^2\,;$$

– для квадрата –

$$S_{сег} = \frac{1}{2}R^2\left(\frac{®}{2} - 1\right) \approx 0{,}285R^2\,.$$

У підсумку площі ураження визначатимуться в такий спосіб:

– для ромба (правильного трикутника)

$$S_{ур} = 4S_1 - 10S_{сег} = 4®R^2 - 5R^2\left(\frac{®}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = R^2\left(\frac{7®}{3} + \frac{5\sqrt{3}}{2}\right) = 11{,}661R^2\,;$$

– для квадрата

$$S_{ур} = 4S_1 - 8S_{сег} = 4®R^2 - 4R^2\left(\frac{®}{2} - 1\right) = R^2(2® + 4) = 10{,}283R^2$$

(максимальна площа ураження $S_{ур}^{\max} = 4®R^2 = 12{,}566R^2$).

Площа накриття в загальному випадку буде визначатися як площа багатокутника із заокругленими вершинами за формулою

$$S_{накр} = S_{бк} + P_{бк}R + ®R^2\,, \tag{4}$$

де $S_{бк}$, $P_{бк}$ – відповідно площа і периметр охоплюючого багатокутника для центрів кіл ураження (див. рисунок 2).

Таким чином, площі накриття складуть:

– для ромба (правильного трикутника)

$$S_{накр} = 2\frac{3\sqrt{3}}{4}R^2 + 4R^2\sqrt{3} + ®R^2 = R^2\left(\frac{11\sqrt{3}}{2} + ®\right) = 12{,}668R^2\,;$$

– для квадрата

$$S_{накр} = 2R^2 + 4R^2\sqrt{2} + ®R^2 = R^2\left(2 + 4\sqrt{2} + ®\right) = 10{,}798R^2\,.$$

Треба зауважити, що області неураження в обох випадках формуються винятково «зовнішніми» до кіл ділянками (зафарбована ділянка на схемі ромба, рисунок 3).

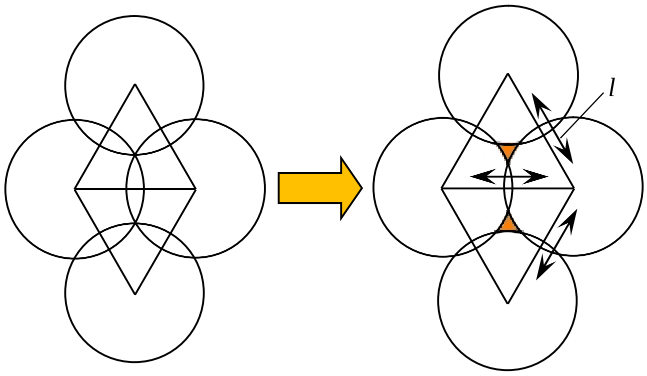
Результати оцінювання складових і критерію *K* у цілому для розглянутих типових структур наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Критерій *K* для типових структур (4 РС)

Типова структура	$S_{ур}/S_{ур}^{\max}$	$S_{ур}/S_{накр}$	K
Ромб	0,928	0,920	0,848
Квадрат	0,818	0,952	0,770

Таким чином, результати таблиці 1 підтверджують те, що для структури ромба (правильного трикутника) маємо кращий ступінь ураження з погляду запропонованого критерію.

Збережемо розглянуті структури розташування точок падіння РС у вигляді ромба й квадрата, і будемо збільшувати відстань між центрами кіл (як приклад на рисунку 4 показано подібну операцію для ромба). Таким чином, усередині кожної зі структур з'являться «порожнечі».



а – структура ромба; **б** – структура квадрата

Рис. 4 – Схема «розширення» ромба

Для структури ромба (правильного трикутника) розглянемо відстань між центрами кіл у межах $\sqrt{3}R < l < 2R$; для квадрата – у межах $\sqrt{2}R < l < 2R$ (l – відстань між центрами кіл). Праві межі зазначених інтервалів зміни величини l відповідають дотику кіл в одній точці й відсутності їх перетинання. Тепер критерій (3) запишемо через відносну величину $u = \dfrac{l}{R}$. Відповідно для структур ромба й квадрата одержимо наступні вирази:

$$K_1(u) = \left[4\circledR - 5\left(\arcsin\left(u\sqrt{1-\frac{u^2}{4}}\right) - u\sqrt{1-\frac{u^2}{4}}\right)\right]\left[\frac{1}{4\circledR} + \frac{1}{\frac{\sqrt{3}}{2}u^2 + 4u + \circledR}\right] - 1;$$

$$K_2(u) = \left[\circledR - \left(\arcsin\left(u\sqrt{1-\frac{u^2}{4}}\right) - u\sqrt{1-\frac{u^2}{4}}\right)\right]\left[\frac{1}{\circledR} + \frac{4}{u^2 + 4u + \circledR}\right] - 1.$$

На рисунку 5 показано відповідні графіки зміни зазначених функцій.

Таким чином, для кожної з функцій у межах розглянутих інтервалів зміни u отримано максимум. Для структури ромба (правильного трикутника) максимум критерію K виходить для $u_* = 1{,}902$ і він становить $K(u_*) = 0{,}874$. Для структури квадрата відповідно маємо $u_* = 1{,}831$ і $K(u_*) = 0{,}854$. З отриманих значень можна зробити наступні висновки:

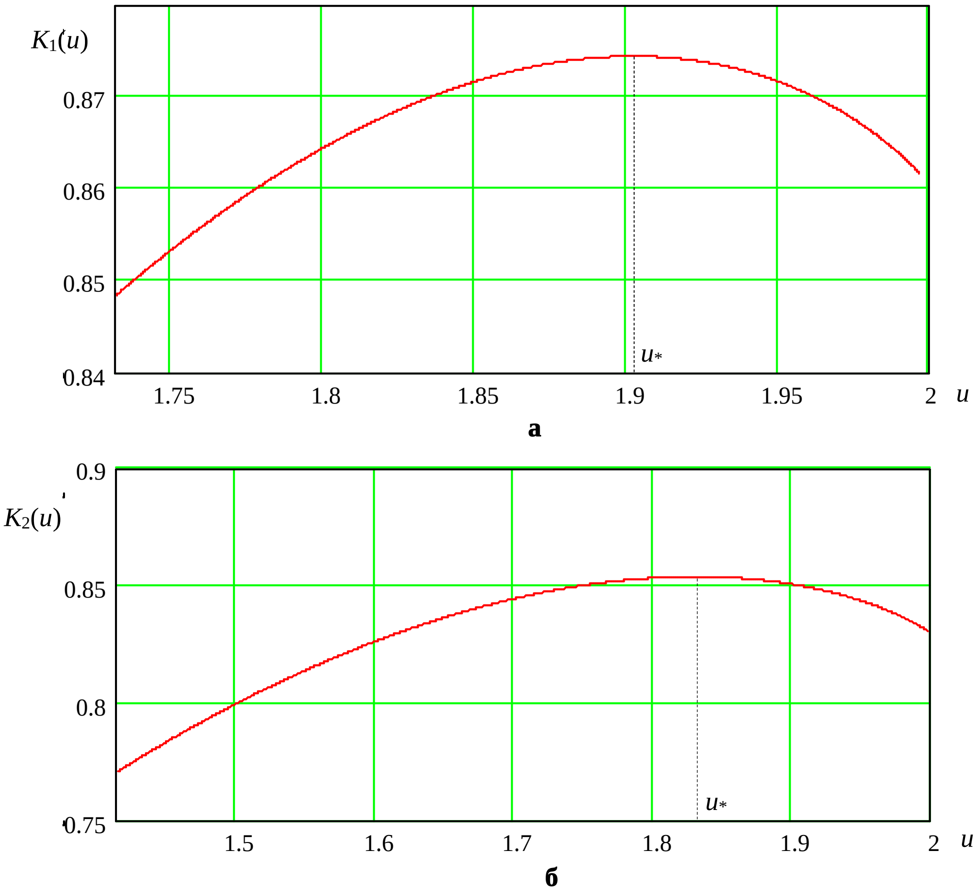


Рис. 5 – Графік зміни K у залежності від відносної відстані u

– оптимальна відстань для структури квадрата значно підвищує для нього рівень критерію K (у порівнянні зі значенням, що наведено в таблиці 1) і практично наближає його до структури ромба. Різниця K для оптимальної відстані між центрами кіл для структури ромба й квадрата не перевищує 2,3 %; згідно з таблицею 1 така різниця становила – 9,2 %;
– з точку зору запропонованого критерію очевидне розташування кіл, що виключає внутрішні області неураження («порожнечі»), є не самим оптимальним.

Тепер розглянемо варіант залпу з N = 16 некерованих РС. Кожний РС під час падіння вражає певну область, що представляє коло радіуса R (відповідає, наприклад, РС із фугасною бойовою частиною) Технічне розсіювання РС, як і раніше, характеризується середніми квадратичними відхиленнями такими, що $\pm_X = \pm_Z = \pm$. Проаналізуємо вплив на критерій K радіуса ураження й характеристик технічного розсіювання. Дослідження проводилося в такий спосіб:

1. Для заданого технічного розсіювання моделювалися координати (x, z) точок падіння N РС;
2. Визначалася площа накриття як площа опуклого багатокутника із закругленими вершинами (згідно (4));

3. Визначалася площа ураження (враховуючи складний характер перетинання кіл, для визначення площі ураження використовувався метод Монте-Карло);
4. Пункти 1 – 3 повторювалися достатньо велику кількість раз;
5. По отриманих реалізаціях визначалися середні значення площі накриття й площі ураження;
6. З використанням середніх значень площі накриття й площі ураження визначалося значення критерію (2) для розглянутих значень R і ±.

Результати оцінювання критерію K для R =20, 30, 40 м залежно від значень ± показано на рисунку 6.

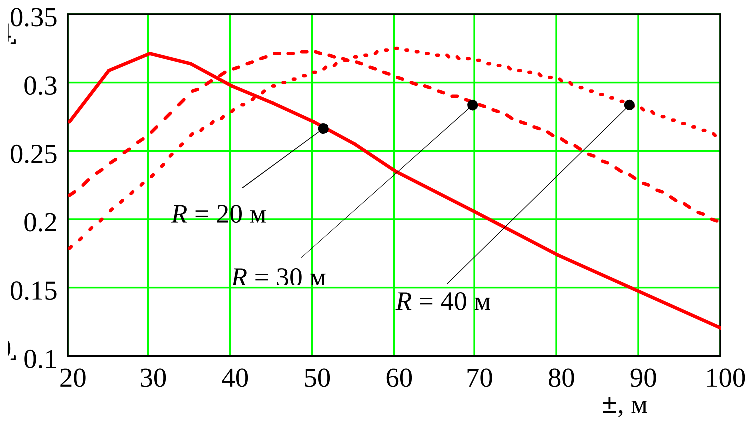


Рис. 6 – Значення критерію K для залпу РС

Таким чином, при заданій кількості РС для кожного значення R існують оптимальні параметри технічного розсіювання, для яких досягається максимальна ефективність вогневого ураження (у вигляді площі ураження залпу). З наведених графіків випливає, що зі збільшенням радіуса ураження для завдання більших збитків при залпі й збільшення K потрібно збільшувати технічне розсіювання, що є природнім.

Необхідно відзначити, що для розглянутих випадків максимальне значення критерію K не перевершує величини 0,33.

У цьому зв’язку цікаво оцінити наскільки сильно отримані значення критерію K для залпу $N = 16$ РС відрізняються від найбільш оптимальних значень, коли структура має вигляд ромба або квадрата (рисунок 7).

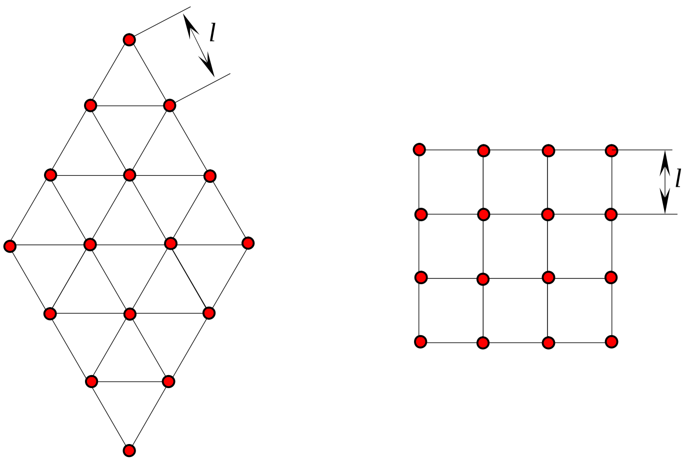


Рис. 7 – Типові структури для залпу 16 РС

Результати оцінювання критерію *K* для зазначених типових структур наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення критерію *K* для типових структур (16 РС)

Типова структура	l	$S_{ур}/S_{ур}^{\max}$	$S_{ур}/S_{накр}$	K
Ромб	$R\sqrt{3}$	0,936	0,881	0,817
	$u{*}R$	0,973	0,903	0,876
Квадрат	$R\sqrt{2}$	0,959	0,727	0,686
	$u{*}R$	0,956	0,870	0,826

Таким чином, значення критерію *K*, отримані для 16 РС із урахуванням технічного розсіювання, виявилися більш ніж у 2,5 рази меншими за найбільш оптимальний варіант (для $l = u{*}R$).

Для усунення недоліку, пов’язаного зі зростанням технічного розсіювання внаслідок збільшення дальності польоту, РС, як зазначено вище, можуть обладнуватися системами керування, що коректують траєкторії польоту. У цьому випадку, якщо стрільба відбувається по нерозвіданій цілі, тобто невідомі місця розташування окремих її об’єктів, можна ставити завдання про оптимальний розподіл точок падіння РС, що отримані з використанням запропонованого критерію. Так у [4] зазначається, що для РСЗВ під час ураження площинних цілей, окремі об’єкти яких розосереджені на значних площах, необхідним є розподіл вражаючих факторів на площі розосередження цілі з метою ефективного їхнього використання й компенсації помилок стрільби.

Необхідно також відзначити, що розглянутий у статті критерій може бути використаний також і у випадку, коли область ураження РС відмінна від кола (представляє його частину). Наприклад, для РС, обладнаних осколково-фугасною головною частиною, у випадку, коли кут його підходу до поверхні Землі суттєво відрізняється від 90°, область ураження буде представляти сектор або два сектори, як показано на рисунку 8.

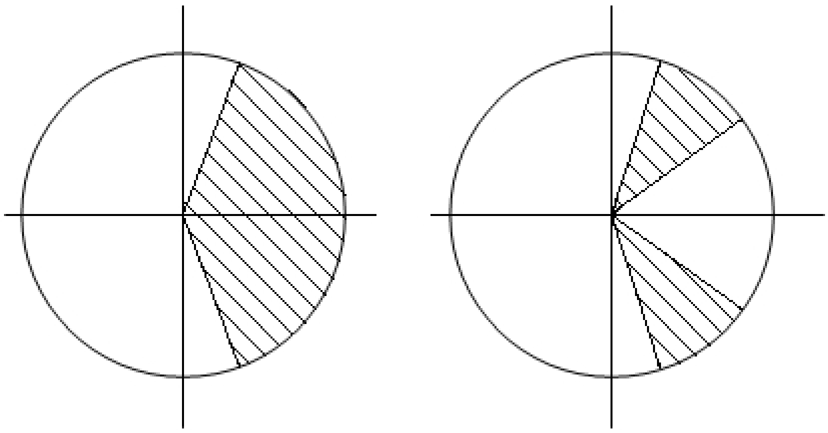


Рис. 8 – Області ураження для осколково-фугасних головних частин РС

У реальності РСЗВ вражає групові цілі, що мають у своєму складі різні типи об’єктів. Усі їх можна умовно звести до деяких типових елементарних цілей. Традиційно, це жива сила, неброньована техніка й легкоброньована техніка з відомими характеристиками в частині ураження [5]. Для кожної такої типової цілі маємо власні радіуси ураження РС. У цьому випадку в процесі вибору/дослідження ефективності залпу РС можна розглянути узагальнений критерій

$$K_\Sigma = \sum_i K_i \ ,$$

де K_i – значення критерію для i-тої типової цілі (у складі групової цілі). Для отримання найбільш оптимального варіанта схеми ураження слід забезпечити

$$K_\text{р} \to \max.$$

Висновки. У статті запропоновано критерій для оцінювання ступеня ураження, який завдається під час залпу РСЗВ, що заснований на площі ураження залпу РС. З використанням запропонованого критерію досліджено типові структури з чотирьох РС і видано рекомендації з найбільш оптимального їхнього розташування. Показано, що для залпу РС із урахуванням технічного розсіювання існує оптимальне співвідношення між характеристиками розсіювання й площею ураження окремого РС. Отримано рекомендації для більш ефективного нанесення ударів залпами РС.

1. *Меликов А. В.* Имитационная модель оценки эффективности стрельбы подразделениями РСЗО. Кибернетика и программирование. 2014. №3. С. 91–102.
2. *Фендриков Н. М., Яковлев В. И.* Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат. 1971. 224 с.
3. Упаковка кругов. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/ Упаковка кругов (дата звернення 15.04.2021).
4. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии. Под общ. ред. А. А. Бобрикова. СПб.: «Галея Принт», 2006. 424 с.
5. *Балаганский И. А., Мержиевский Л. А.* Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2004. 408 с.

Отримано 31.05.2021,
в остаточному варіанті 01.10.2021