

УДК 355.7

С.Н. Звиглянич, Н.П. Изюмский

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ЗАДАЧА НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАРЯДА РАКЕТ В РАКЕТНОМ УДАРЕ

Появление высокоточного оружия позволило решать задачи точечного поражения заданных элементов объектов поражения. В связи с этим возникает задача нахождения оптимального наряда ракет, обеспечивающего достижения требуемого ущерба. В статье дается вариант решения данной задачи методом динамического программирования с использованием имитационного моделирования процесса поражения объектов.

**Ключевые слова:** поражаемая комбинация, наряд ракет, функция ущерба/

### Введение

**Постановка проблемы.** Появление высокоточного оружия позволило говорить об избирательном поражении элементов объекта. Другими словами – для достижения цели операции вполне достаточно поражать не весь объект как таковой, а определенные его элементы. Вводится понятие «поражаемая комбинация», когда в составе группового объекта достаточно уничтожить одну или несколько элементарных целей, потеря которых приводит к утрате боеспособности объекта в целом. При этом возникает задача нахождения оптимального наряда ракет, который обеспечивает заданный уровень ущерба, соответствующий цели операции.

**Анализ литературы.** Появление высокоточного оружия внесло определенные изменения взглядов на процесс планирования поражения заданных объектов. В частности, в [1,2] рассмотрены особенности поражения объектов в войнах будущего. При этом суть поражения сводится к определению «поражаемых элементов цели» [3] и «выборочного поражения важных элементов объекта» [4]. Поражаемая комбинация как понятие рассматривается в [5]. Дается описательное представление процесса планирования поражения группового объекта. Отметим, что в настоящее время практически отсутствуют подходы к решению вопроса определения оптимального наряда ракет при поражении выбранной комбинации объектов на основе количественной оценки результатов удара.

**Целью статьи** является постановка задачи определения оптимального наряда ракет в ракетном ударе по выбранным объектам поражения, обеспечивая при этом заданный уровень ущерба.

### Основной материал

При планировании ракетного удара стоит задача достигнуть максимальной эффективности с учетом имеющихся сил и средств. Оценивание эффек-

тивности ракетного удара является многогранной задачей. Критерий эффективности ракетного удара, как операции, лежит в рамках рационального поведения системы и базируется на концепции пригодности, суть которой заключается в выборе стратегии  $U$ , при которой выбранный показатель эффективности принимает значения не ниже некоторого приемлемого уровня  $W^D$ :

$$W(u^n) \geq W^D, \quad (1)$$

где  $u^n \in U$ ;

$U$  – множество допустимых стратегий.

Применительно к целям в качестве численной характеристики ущерба принято использовать минимальное время, в течение которого поражаемая цель не может функционировать как боевая единица [6]. В соответствии со временем, на которое цель прекращает функционирование, вводится три основных типа поражения целей:

- тип А – решение задач операции;
- тип В – решение задач дня;
- тип С – решение задач боя.

После ракетного удара объекты поражения могут получить разные степени разрушения. Для каждой степени разрушения можно поставить в соответствие некоторое время восстановления, своего рода количественную меру трудозатрат на приведение поврежденного объекта в боеспособное состояние. Положим:

$T_{ss}$  – время восстановления при сильной степени разрушения;

$T_{sr}$  – время восстановления при средней степени разрушения;

$T_{sl}$  – время восстановления при слабой степени разрушения.

По своей природе требуемое время восстановления  $T_{tr}$  случайная величина, принимающая значения  $T_{ss}, T_{sr}, T_{sl}$ , с соответствующими вероятно-

стями  $P_{ss}, P_{sr}, P_{sl}$ . Тогда, в качестве ущерба, причиненного объекту в результате ракетного удара, определим математическое ожидание требуемого времени восстановления:

$$W = M [T_{mp}], \quad (2)$$

или

$$W = T_{ss} \cdot P_{ss} + T_{sr} \cdot P_{sr} + T_{sl} \cdot P_{sl}, \quad (3)$$

Исходя из выше сказанного, в качестве критерия оценки эффективности ракетного удара введем правило выбора такой стратегии  $u$ , при которой сумма математических ожиданий времен восстановления элементов объекта, входящих в поражаемую комбинацию, не меньше заданного времени восстановления боеспособности объекта в целом:

$$W_{\Sigma_{вос}}(u) \geq T_{вос}, \quad (4)$$

где  $T_{вос}$  – требуемое суммарное время восстановления объекта.

Необходимое количество ракет для поражения выбранного объекта (группового) определяется конструктивными характеристиками элементов (отдельных объектов), входящих в поражаемую комбинацию, и боевой мощностью боевой части.

С учетом того, что наиболее важные объекты поражения представляются как высокозащищенные, и как правило, заглубленного (подземного) типа рассмотрим применение фугасной боевой части (ФБЧ).

При рассмотрении объектов, для которых поражающим фактором выступают осколки (используются осколочные боевые части), можно в каждом таком объекте выделить соответствующие области, попадание в которые приводит к сильному, среднему и слабому разрушению.

С учетом конструктивных особенностей защищенных объектов общим фугасным действием можно пренебречь и действие ударной волны не рассматривать.

При взрыве сосредоточенного заряда радиус зоны разрушения  $R_p$  (м) можно вычислить по эмпирической зависимости [7]

$$R_p = K_p \cdot \sqrt[3]{m_3}, \quad (5)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от свойств твердой среды,  $m/\text{кг}^{1/3}$ ;

$m_3$  – масса эквивалентного тротилового заряда ВВ.

Значения коэффициента  $K_p$  являются табличными.

При взрыве в грунте [7]:

$$\Delta p_m = \left( K \cdot \sqrt[3]{m_{ВВ}} / r \right)^\mu, \quad (6)$$

где  $\Delta p_m$  – создаваемое избыточное давление;

$m_{ВВ}$  – масса эквивалентного ВВ;

$r$  – расстояние от точки взрыва;

$K, \mu$  – константы, имеющие табличные значения.

Для определения требуемого наряда ракет на основе введенного выше критерия поражения необходимо определить вероятности получения объектами поражаемой комбинации сильной, средней и слабой степени разрушения.

Ввиду многих факторов, влияющих на процесс поражения, получить в аналитическом виде эти выражения затруднительно. Используем метод имитационного моделирования.

Предварительно рассмотрим процесс поражения одиночного малоразмерного защищенного объекта одной ФБЧ.

С достаточной точностью для проведения оценки применения ФБЧ по малоразмерным объектам в этом процессе будем рассматривать только сам объект и боевую часть, абстрагируясь от ряда факторов, например, таких как погодные условия (состояние атмосферы, скорость ветра и т.п.).

Модель объекта поражения должна отражать его прочностные характеристики и геометрические размеры.

Прочностные характеристики объекта определяются материалами его конструкции. Так при прямом попадании ФБЧ в объект ущерб оценивается по формуле (5).

Здесь в качестве характеристики защитного сооружения выступает коэффициент  $K_p$ .

На основе экспертных оценок (которые могут быть уточнены) приняты следующие степени разрушения:

- сильное – наступает при сквозном пробитии защитного сооружения;
- среднее – наступает при пробитии не менее 0.5 толщины защитного сооружения;
- слабое – наступает при пробитии не более 0.5 толщины защитного сооружения.

Материал боковых стенок заглубленных (подземных) сооружений опосредованно характеризуется избыточным давлением, приводящим к сильному, среднему и слабому разрушению объекта. Образующееся избыточное давление при промахе ФБЧ по защитному сооружению высчитывается по формуле (6). Геометрические размеры объекта учитываются приведенным радиусом

$$r_p = \sqrt{S_s / \pi}, \quad (7)$$

где  $S_s$  – суммарная площадь объекта.

При проведении оценки результатов воздействия ФБЧ на первое место выходит ее боевое могущество. Боевое могущество прежде всего зависит от веса взрывчатого вещества (ВВ) и точности самого удара. Вес ВВ выражается через вес ВВ в тротиловом эквиваленте.

На точность удара влияют две группы ошибок: одинаковые для всех выстрелов (пусков) ошибки целеуказания и ошибки индивидуального рассеивания [7].

Групповые ошибки подчиняются нормальному закону и характеризуются вероятными отклонениями  $E_{xг}$ ,  $E_{yг}$  (при нулевых математических ожиданиях).

Индивидуальные ошибки также подчиняются нормальному закону и имеют вероятные отклонения  $E_{xи}$ ,  $E_{yи}$  от точки прицеливания.

Суммарная ошибка характеризуется вероятными отклонениями

$$E_x = \sqrt{E_{xг}^2 + E_{xи}^2}, \quad E_y = \sqrt{E_{yг}^2 + E_{yи}^2}. \quad (8)$$

Процесс получения объектом некоторой степени разрушения по своей сути является случайным, так как в его основе лежит взрыв ФБЧ, координаты которого, исходя из сказанного выше, случайны.

Таким образом, события получения объектом сильной, средней, слабой степени разрушения случайные и характеризуются соответствующими вероятностями их наступления. Данные вероятности могут служить оценкой эффективности применения ФБЧ при поражении малоразмерных защищенных объектов.

Введем в рассмотрение три счетчика подсчета получения объектом поражения в каждой реализации имитационной модели соответствующей степени разрушения:

- (SS) – счетчик сильной степени разрушения;
- (SR) – счетчик средней степени разрушения;
- (SL) – счетчик слабой степени разрушения.

В каждой реализации имитируется точка взрыва (рис. 1). Координаты точки взрыва случайные величины, распределенные по нормальному закону с вероятными отклонениями согласно выражению (8).

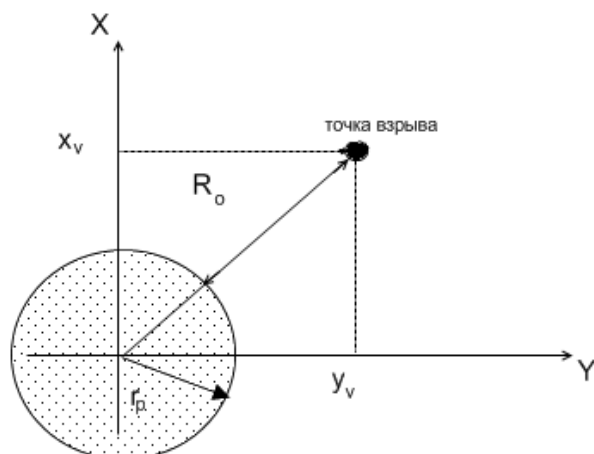


Рис. 1. Модель удара в реализации

Тогда расстояние от точки взрыва до объекта

$$R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - r_p, \quad (9)$$

где  $x_v$ ,  $y_v$  – координаты точки взрыва,

$r_p$  – приведенный радиус объекта поражения.

Если расстояние от точки взрыва  $R_0$  не превышает приведенный радиус объекта  $r_p$ , то есть, наблюдается прямое попадание, то, используя выражение (5), определяется радиус зоны разрушения  $R_p$ .

Если радиус зоны разрушения больше толщины защитного сооружения, то счетчик числа полученных сильных разрушений (SS) увеличивается на единицу.

Если радиус зоны разрушения не менее 0.5 толщины защитного сооружения, то счетчик числа полученных средних разрушений (SR) увеличивается на единицу.

Если радиус зоны разрушения не более 0.5 толщины защитного сооружения, то счетчик числа полученных слабых разрушений (SL) увеличивается на единицу.

В случае промаха, то есть, расстояние от точки взрыва превышает приведенный радиус объекта  $r_p$ , для определения степени разрушения используется выражение (6).

Значения избыточного давления, приводящего к получению объектом соответствующей степени разрушения, выступают как исходные данные модели.

При определении степени разрушения в рассматриваемой реализации увеличивается на единицу соответствующий счетчик – (SS), (SR) или (SL).

После проведения заданного числа реализаций производится обработка полученных статистических данных.

$$p_{SS}' = SS/N, \quad (10)$$

$$p_{SR}' = SR/N, \quad (11)$$

$$p_{SL}' = SL/N. \quad (12)$$

Выражения (10), (11), (12) представляются как оценки вероятностей получения объектом сильной, средней и слабой степени разрушения. Точность получения этих оценок напрямую зависит от числа реализаций имитационной модели  $N$ .

Пусть групповой объект включает в себя  $m$  объектов по которым планируется нанести ракетный удар.

Для каждого объекта заданы геометрические и прочностные характеристики, а также времена восстановления готовности после сильной, средней и слабой степени разрушения.

Заданы характеристики ФБЧ и количество ракет в ударе.

На основе работы имитационной модели строится табл. 1, отражающая соответствующие значения функции ущерба, в которой обозначены:

$k$  – количество ФБЧ в ракетном ударе;

$W_{ij}$  – математическое ожидание времени восстановления  $i$ -го объекта при нанесении по нему удара ФБЧ в количестве  $j$  единиц.

Таблица 1  
Значения функции ущерба

$x$	$\varphi_1(x)$	$\varphi_2(x)$	...	$\varphi_m(x)$
1	$W_{11}$	$W_{21}$	...	$W_{m1}$
2	$W_{12}$	$W_{22}$	...	$W_{m2}$
...	...	...	...	...
$k$	$W_{1k}$	$W_{2k}$	...	$W_{mk}$

Сведем задачу к задаче распределения ресурса, решаемой методом динамического программирования [8]. Количество рассматриваемых этапов приведем к количеству объектов –  $m$ . Управляемая система  $S$ , в данном случае ФБЧ, которые распределяются по объектам поражения. В этой задаче «шаговыми управлениями» являются количество ФБЧ  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , назначаемые по объектам поражения. Требуется найти оптимальное управление, то есть такое количество ФБЧ  $x_1, x_2, \dots, x_m$ , при котором суммарное время восстановления объектов максимально:

$$W = \sum_{i=1}^m \varphi_i(x_i) \Rightarrow \max, \quad (13)$$

где  $x_i$  – планируемое количество БЧ по  $i$ -му объекту;

$\varphi_i(x_i)$  – функция ущерба, выражаемая через время восстановления после нанесения удара  $x_i$  ФБЧ по  $i$ -му объекту.

Полученный результат соответствует оптимальному распределению ФБЧ по объектам поражения, обеспечивая при этом максимальный ущерб. Если уровень прогнозируемого ущерба больше требуемого, то путем итерационных изменений можно подобрать такое количество ФБЧ, которое удовлетворяет цели операции (ракетного удара).

Если уровень прогнозируемого ущерба меньше заданного, то необходимо задействовать более мощные боевые части. При отсутствии таковых следует понижение качества принятого решения за счет снижения задаваемого ущерба.

## Выводы

Приведение задачи выбора поражаемой комбинации к распределительным задачам позволяет при планировании ракетного удара находить оптимальный наряд ФБЧ по объектам поражения с использованием стандартных методов математического программирования, обеспечивая заданный уровень ущерба.

## Список литературы

1. Супряга А.В. О войнах XXI века / А.В. Супряга // Военная мысль. – М.: Воениздат, 2002. – С 10–15..
2. Воробьев И.Н. Прогноз характера и содержания операций (боевых действий) в войнах будущего / И.Н. Воробьев // Военная мысль – М.: Воениздат, 2005. – С 2 – 12.
3. Александров В. ВТО: роль и место в вооруженных конфликтах, основные тенденции развития / В. Александров, А. Рахманов // Военный парад. – М.: Воениздат, 2003. – № 4. – С. 16 – 18.
4. Бурунов В. Система наведения ВТО – один из основных объектов интеллектуализации вооружения / В. Бурунов, В. Солунин // Военный парад.–М.: Воениздат, 2003. – № 1. – С. 40 – 41.
5. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
6. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник / И.А. Балаганский, Л.А. Мерзжневский. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 408 с.
7. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / 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.
8. Венцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Венцель. – М.: Сов. радио, 1972. – 270 с.

Поступила в редколлегию 25. 02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## ЗАДАЧА ЗНАХОДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАРЯДУ РАКЕТ В РАКЕТНОМУ УДАРИ

С.М. Звигляннич, М.П. Изюмський

Поява високоточної зброї дозволила вирішувати завдання точкового ураження заданих елементів об'єктів ураження. У зв'язку з цим виникає завдання знаходження оптимального наряду ракет, що забезпечує досягнення необхідного збитку. У статті дається варіант рішення цієї задачі методом динамічного програмування з використанням імітаційного моделювання процесу ураження об'єктів.

**Ключові слова:** комбінація, що вражається, наряд ракет, функція збитку.

## THE PROBLEM OF FINDING OPTIMAL MISSILES OUTFIT IN MISSILE ATTACK

S.M. Zvigljanich, M.P. Izyumsky

The development of high-precision weapons allowed to solve the problems of defeat the specified targets. Due to this fact there is the problem of finding the optimal outfit of rockets that achieve the required damage. The article presents a solution to this problem by dynamic programming using a simulation process of destruction of objects.

**Keywords:** affected combination, outfit missiles, damage function.