

УДК 623.4

С.И. Бурковский, П.Ю. Седышев

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРУБЕЖНЫХ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ЗРК С-125М1 «ПЕЧОРА-М1» ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПВО ВАЖНЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УКРАИНЫ**

*Проведена сравнительная оценка эффективности зарубежных вариантов модернизации ЗРК С-125М1 при решении задач ПВО важных государственных объектов Украины. Определены ключевые направления модернизации ЗРК, дающие основной вклад в эффективность.*

*Ключевые слова:* ЗРК «Печора», тактико-технические характеристики, модернизация, эффективность.

### **Постановка проблемы**

По мнению многих отечественных и зарубежных специалистов, ЗРК «Печора» по своей надежности является одним из лучших образцов систем ПВО. До настоящего времени значительная их часть не исчерпала свой ресурс и может состоять на вооружении до 20–30-х гг. XXI века. Боевое применение ЗРК в локальных войнах и практические стрельбы модернизированных ЗРК показали высокую эксплуатационную надежность и ремонтпригодность ЗРК «Печора». Используя современные технологии, можно повысить боевые возможности комплексов при относительно небольших затратах в сравнении с закупкой новых средств ПВО, имеющих сопоставимые характеристики. В то же время, ограниченное финансирование Вооруженных Сил Украины и малое количество ЗРК подлежащих модернизации приводит к необходимости выбора для модернизации лишь тех характеристик ЗРК, которые внесут основной вклад в повышение функциональной эффективности ЗРК и одновременно обеспечат высокий показатель экономической эффективности модернизации ЗРК.

### **1. Понятие эффективности и основные ее составляющие**

Исследованию эффективности боевых систем и комплексов посвящена обширная литература [1–3], однако единого понимания сути эффективности пока нет. В данной статье под эффективностью ЗРК будем понимать характеристику поведения ЗРК, его свойство «превращать» затраты в эффект (решения целевой задачи) с качеством, зависящим от условий обстановки. Эффективность ЗРК устанавливает динамическую взаимосвязь между свойствами ЗРК (которые характеризуют его качество) с одной стороны и способами и условиями его применения с другой. Это значит, что эффективность ЗРК не может быть определена лишь его свойствами, она характеризует приспособленность процесса функционирования к достижению цели боевых действий и зависит от очень многих внешних факторов, оказы-

вающих противодействие или напротив способствующих достижению цели.

С учетом этого задача данной статьи состоит в том, чтобы показать взаимосвязь (отношения соответствия) между характеристиками ЗРК, затратами, целевой задачей и на этой основе выбрать для модернизации те характеристики ЗРК, которые вносят основной вклад в повышение эффективности. При этом затраты будем учитывать в двух основных формах: экономические затраты (включающие затраты на эксплуатацию ЗРК и затраты на стрельбу (стоимость ракет)), а также затраты на модернизацию характеристик ЗРК (в технической литературе чаще встречается термин достижение «технического уровня» ЗРК), обеспечивающие тактико-технические характеристики (ТТХ), необходимые для поражения современных целей.

Двум указанным формам затрат будут соответствовать две формы эффективности. Отношение соответствия характеристик ЗРК («техническим уровнем») целевой задачи, определяет функциональную эффективность, а соизмерение экономических затрат с целевой отдачей – экономическую эффективность. Рассмотрим подробнее эти обобщенные характеристики. Для их оценки используем сведенные в табл. 1 ТТХ различных вариантов модернизации ЗРК С-125 и в табл. 2 ТТХ ЗУР используемых в ЗРК С-125. Данные для таблиц взяты из рекламных проспектов.

### **2. Функциональная эффективность и ее основные составляющие**

Функциональная эффективность отражает функциональную связь между характеристиками ЗРК и результатом его функционирования, формально выражающееся отношением соответствия меры результата функционирования (целевой отдачи) характеристикам ЗРК, полученным в результате проектирования или модернизации. При решении задач ПВО одного из важных государственных объектов Украины ожидаемой целевой отдачей следует считать выживаемость обороняемого объекта, т.е. вероятность отражения авиационного удара (удара крылатыми ракетами) по прикрываемому объекту.

ТТХ различных вариантов ЗРК С-125

Характеристика	Варианты ЗРК С-125					
	Обычные			Модернизированные		
	С-125 Нева	С-125М Нева-М	С-125М1 Печора-М1	С-125 SCE NEVA SC	С-125-2А Печора-2А	С-125-2Т Печора-2Т
Год принятия на вооружение	1961	1970	1978	1999	2001	2003
Разработчик	НПО Алмаз	НПО Алмаз	НПО Алмаз	WZE Польша	НПО Алмаз	УП «Гепраэдр» МФПГ «Оборон системы»
Состав ЗРК	УНК-1 шт УНВ-1 шт ПУ -3 шт. ЗУР -6 шт.	УНК-1 шт УНВ-1 шт ПУ -3 шт. ЗУР -12 шт.	УНК-1 шт УНВ-1 шт ПУ -3 шт. ЗУР -9 шт.	УНК-1 шт УНВ-1 шт ПУ -3 шт. ЗУР -12 шт.	УНК-1 шт УНВ-1 шт ПУ -4 шт. ЗУР -9 шт.	УНК-1 шт УНВ-2 шт ПУ -8 шт. ЗУР -16 шт.
Кабина сопряжения и связи с АСУ	5Ф20 (5Ф24, 5Х56) Не нужна (аппаратура встроенная)					
Основной тип ЗУР	5В24	5В27	5В27Д	5В27	5В27Д	5В27Д (ДЕ)Е
Число каналов по цели/по ракете, шт	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	2/4
Система защиты от ПРР	нет	нет	дублер	нет	дублер	СРТЗ-125-2ТМ КРТЗ-125-2М
<b>Зона обнаружения</b>						
Дальность обнаружения РЛК цели с ЭПР=1 м <sup>2</sup> (СВ/МВ), км	40/					
Индикаторная дальность РЛК, км	80					
Ширина диаграммы направленности антенн, град	12° x 1,5° в диапазоне 8,9—9,46 ГГц					
Дальность взятия на устойчивое сопровождение, км	30					
Тип телевизионно-оптического визира (ТОВ)	9ПЗА «Карт-2»					
Дальность обнаружения оптическим/ИК каналом, км	25/-					
<b>Зоны поражения</b>						
Метод наведения ЗУР	ТТ, ПС	ТТ, ПС	ТТ, ПС	ТТ, ПС	ПрС	КДУ, МГТ ПрС
Наклонная дальность поражения, км	6-12	2,5-17,5	3,5-25	2,5-17,5	3,5-28	3,5-33,2 3,5-32
Максимальная дальность на высоте 0,02 км	-	11	11	11	11	11 11 (18)
Максимальная дальность на высоте 0,5 км	12	11	11	11	23	21 23
Максимальная дальность на высоте 6 км	12	17	17	17	27	23 28 (32)
Максимальная дальность на высоте 14-20 км	11	13	17	13	21	26,5 21 (28)
Диапазон высот, км	0,2-10	0,02-14	0,02-18	0,02-18	0,02-20	0,02-25 0,02-20
Максимальный курсовой параметр, км	10	14	16,5	16	24	25 24
Максимальная скорость целей навстречу/вдогон, м/с	560/-	560/-	700/300	700/-	700/300	900/300 1000/450
<b>Вероятность поражения цели одной ракетой</b>						
тактический истребитель	0,8-0,9	0,4-0,7	0,45 - 0,87	0,4-0,7	0,45...0,92	0,85 - 0,96 0,75...0,97
вертолет	-	0,1-0,2	0,17 - 0,67	0,1-0,2	0,16...0,28	0,40 - 0,80 0,65...0,95
крылатая ракета	-	0,04 - 0,3	0,04 - 0,48	0,04 - 0,3	0,04...0,48	0,30 - 0,85 0,35...0,95
маневрирующая цель	0,2-0,4	0,2-0,4	0,20 - 0,50	0,2-0,4	0,20...0,50	0,70 - 0,85 0,45...0,97
* на дальности 25км	-	-	0,5	-	0,72-0,99	0,72-0,99
* на дальности 25-28км	-	-	---	-	0,51-0,99	0,51-0,99

Характеристика	Варианты ЗРК С-125					
	Обычные			Модернизированные		
	С-125 Нева	С-125М Нева-М	С-125М1 Печора-М1	С-125 SCE NEVA SC	С-125-2А Печора-2А	С-125-2Т Печора-2Т
<b>Характеристики помехозащитности</b>						
Угловые ошибки сопровождения в условиях помех, уводящих по углу с ГШН / без ГШН			2-3/5'-10'			1-1,5' / 1-1,5'
Параметры аппаратуры селекция движущихся целей						
угловые ошибки сопровождения целей на фоне отражений от местных предметов и в пассивных помехах			3-5'			1-2'
угловые ошибки сопровождения целей в "МВ"			до 10'			3-4'
пролонгация сопровождения целей на фоне отражений от местных предметов	нет	нет	нет	нет	нет	нет
работа в АПП по фону ДНА (R <sub>п</sub> =100км), Вт/МГц	24	24	100	2000	2700	2000
Дальность обнаружения цели с ЭПР=1 м <sup>2</sup> работа в АПП (СВ/МВ), км						29,5/29,5
Защита от ответно-импульсных помех с вообуляцией периода повторения по псевдослучайному закону	нет	нет	нет	нет	нет	нет
<b>Временные параметры</b>						
Время автозахвата цели на АС, с	8	8	8	н.д.	2,5-3	2,5-3
Время приведения в готовность №1 от сети/от ДЭС, с	4/5-6	4/5-6	4/5-6			
<b>Прибор пуска</b>						
режим работы		полуавтомат				автомат
время выработки данных, с	7	5	5	н.д.	2	2
точность оценки координат точки встречи, км			1,5-3,0			0,3
индикация гарантированной зоны поражения /индикация формуляра цели (азимут, угол места, дальность, высота, скорость, параметр, текущий промах)		нет/ нет				есть/ есть
<b>Параметры живучести ЗРК</b>						
Расстояние между кабиной управления и центром позиции, м		до 20				до 200
Расстояние от ПУ до кабины управления, км		до 0,07				до 10
<b>Эксплуатационные характеристики</b>						
Боевой расчет, чел	5	5	5	3	3	3
Потребляемая мощность, кВт		200		100		
Количество контролируемых параметров при регламентных работах при недельном/ 5-недельном/ сезонном регламенте			188/ 391/ 454			86/210/241
Время регламентных работ						сокращается в 2-2,5 раза
Продление сроков эксплуатации не модернизированных средств, лет				5-10 (нет гарантии на ЗУР)		15
тренажер			Аккорд-75/125			Цифровой встроенный
аппаратура документирования / аппаратура АФК		нет / нет				есть / есть
Номенклатура ЗИП-1 и ЗИП-2, ед. / гарантия поставки ЗИП в течении, лет	>3000/ ЗИП снят с производства					300 / 15
Наработка на отказ, часов	30	40	50			30% вновь вводимой аппаратуры имеет наработку на отказ 20000 часов, остальные – 2000 – 10000 часов
Время свертывания/развертывания ЗРК, мин	180	180	90	20	20	20-30

Таблица 2

ТТХ ЗУР, которые используются в различных вариантах ЗРК С-125

Характеристика	Тип ЗУР		
	5В24 (В-600П) 1961	5В27 (В-601П) 1964-1970	5В27Д 1978
Год принятия на вооружение	1961	1964-1970	1978
Модификации ЗУР		5В27Г – герметичная (унификация с флотом), 5В27ГП – герметичная с приближенной до 2,7 км ближней границей ЗП, 5В27ГПС - ракета 5В27ГП, с селектирующим блоком для снижения вероятности преждевременного срабатывания РВ при стрельбе по низколетящим целям, 5В27ГПУ - ракета 5В27ГП с ускоренной предстартовой подготовкой	
Максимальная скорость ЗУР, м/с	до 600	до 600	до 730
Время предстартовой подготовки, с	120	120	120
Время ускоренной предстартовой подготовки, с	-	30	30
Минимальный интервал пуска, с	5	5	5
Располагаемая перегрузка, ед	6	6	5
Масса ЗУР, кг	912	953	980
		<b>Боевая часть</b>	
Масса БЧ, кг	60 (4Г90)	72 (5Б18)	72 (5Б18)
Количество ГПЭ, шт	3560-3570 (22 кг)	до 4500	до 4500
Масса ГПЭ, г	5,5	4,72-4,79	4,72-4,79
Масса ВВ, кг	32...33	33,5	33,5
Тип ВВ	ТГ-20	ТГ-20	ТГ-20
Скорость разлета осколков, м/с			+10-15%
Радиус поражения, м	12,5	13,7	13,7
Вероятность поражения 0,9 при промахе, м	18	20	20
Вероятность поражения 0,6 при промахе, м	22	25	25
Вероятность поражения 0,4 при промахе, м	43	47	47
		<b>Предохранительно – исполнительный механизм</b>	
Время самоликвидации, с	26	49 (для ПИМ 5Б79)	49
		<b>Радиовзрыватель</b>	
Тип радиовзрывателя (РВ)	5Е15	5Е18	
Максимальный радиус срабатывания, м	58		
Наличие задержки для стрельбы влогон	нет	нет	есть
Наличие блока селекции для МВЦ	нет	есть на 5В27ГПС	есть
Минимальная высота устойчивого срабатывания РВ, м	250	50* для 5В27ГПС	50*
		<b>Стартовый ускоритель</b>	
Тип стартового ускорителя (СУ)	ПРД-36		
Масса СУ, кг	280	280	407
Время работы СУ, с	2,6	2,6 (2)	4
Тяга СУ, т		30	
		<b>Маршевый двигатель</b>	
Тип маршевого двигателя (МД)		МД с вкладным зарядом из смесового топлива 301-К	
Масса МД, кг	125	151	
Время работы МД, с	до 18,7 с	до 20 с	
Тяга МД, т		3	

В свою очередь вероятность отражения авиационного удара однозначно связана с поражением заданного процента самолетов (при котором противник отказывается от выполнения боевой задачи). Отражение удара крылатыми ракетами (или самолетов захваченных террористами) предполагает уничтожение всех летательных аппаратов. Таким образом, мера результата функционирования (целевой отдачи) может быть сведена к математическому ожиданию числа уничтоженных целей. В свою очередь математическое ожидание числа уничтоженных целей (МОЧ) однозначно характеризуется неслучайным временем цикла стрельбы и случайной величиной вероятности поражения цели. Как видно из табл. 1, период цикла стрельбы уменьшается на 8 с за счет уменьшения времени захвата на автоматическое сопровождение на 5 с, а также уменьшения времени выработки данных прибором пуска на 3 с практически для всех вариантов модернизации. Кроме того, МФПГ «Оборонительные системы» проводит модернизацию ЗУР 5В27Д до уровня 5В27ДЕ в результате которой производится замена двигательной установки, что позволяет ракете развивать большую скорость и уменьша-

ет время полета, входящее составной частью в цикл стрельбы. Это значит, что ЗРК С-125-2М с ЗУР 5В27ДЕ обладает минимальным циклом стрельбы. Кроме того, в табл. 1 указано, что в ЗРК С-125-2М и С-125-2Т предусмотрена возможность использования двух УНВ что обеспечивает двухканальность ЗРК по цели и увеличит МОЧ в два раза. МОЧ не может превышать числа стрельб, которое можно произвести исходя из запаса ЗУР на пусковых установках (ПУ). В связи с этим следует отметить тот факт, что на четырехбалочную ПУ вместо четырех устаревших ЗУР 5В27, можно зарядить только три более тяжелых ЗУР 5В27Д, а для ЗУР 5В27ДЕ разработаны только двухбалочные ПУ (общий запас ЗУР в ЗРК см в табл. 1).

Часто для упрощения расчетов МОЧ используется понятие зоны поражения как области пространства, в пределах которой вероятность поражения не ниже заданной величины.

На рис. 1 приведены вертикальные сечения зоны поражения при обстреле целей летящих с нулевым параметром. Данные сечения указаны в рекламных проспектах фирм и оценены математическим моделированием.

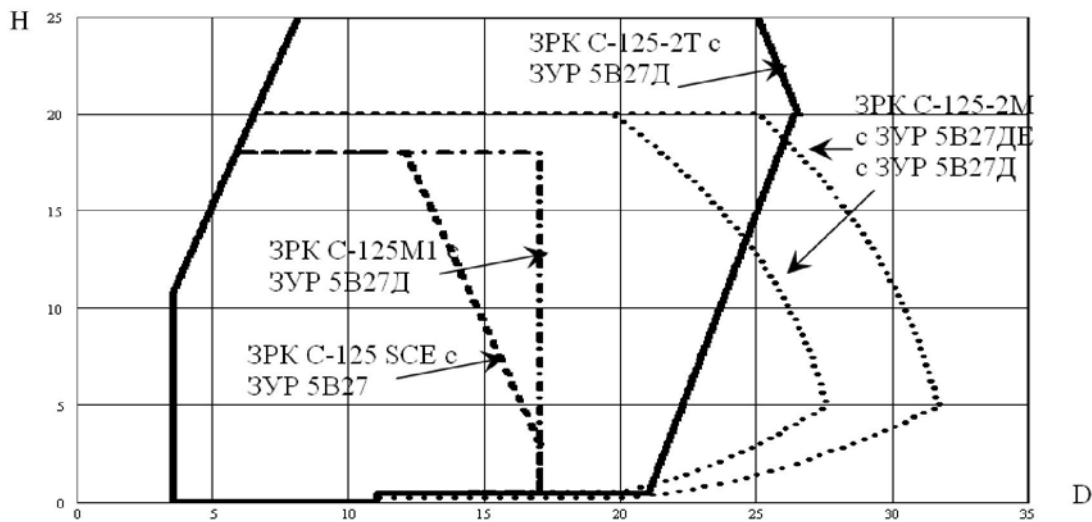


Рис. 1. Зоны поражения для различных вариантов модернизации ЗРК

Следует отметить, что сниженная нижняя граница для ЗУР 5В27ДЕ достигается модернизацией боевой части и радиовзрывателя. Для остальных ЗУР независимо от варианта модернизации для целей, высота которых менее 500 м, дальняя граница составляет всего 11 км.

Вероятность поражения одиночной цели при пуске по ней одной ракеты в рекламных проспектах, как правило, приводится в виде диапазона, например 0,35...0,95. При этом подразумевается, что 0,35 обеспечивается на границах зоны поражения, а 0,95 лишь в центре в так называемой гарантированной зоне поражения. В зависимости от учитываемых системных факторов вероятность поражения цели может определяться по-разному. Однако, поскольку эта вероятность является основной составляющей функциональной эффективности, кратко рассмот-

рим основные (определяющие) параметры, которые ее определяют.

### 3. Влияние направлений модернизации на основные составляющие вероятности поражения цели одной ЗУР

Как известно [4] поражение цели одной ЗУР можно представить в виде сложного случайного события, состоящего из двух других случайных событий, происходящих последовательно во времени. Первое случайное событие заключается в том, что подрыв боевой части ракеты произошел именно в данной точке пространства при промахе  $h$ . Вероятность этого события определяется законом ошибок наведения и управления  $\varphi(h)$ , сопутствующих стрельбе. Эти ошибки, как показывает опыт, распределяются по закону, близкому к круговому

( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ), с центром рассеивания, не совпадающим с целью (из-за наличия систематической (динамической) ошибки), а плотность вероятности распределения промаха описывается функцией вида:

$$\varphi(h) = \frac{h}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{h^2 + h_0^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{h \cdot h_0}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где  $h_0$  – математическое ожидание систематической (динамической) ошибки;  $I_0\left(\frac{h \cdot h_0}{\sigma^2}\right)$  – функция Бесселя нулевого порядка;  $\sigma$  – среднее квадратическое значение промаха.

Второе случайное событие заключается в том, что поражающие элементы боевой части ракеты, разорвавшейся при промахе  $h$ , поразят цель. Вероятность этого события определяется условным законом поражения цели  $p(h)$ . Закон  $p(h)$  является функцией:

- типа и характеристик боевой части ракеты;
- параметров радиовзрывателя;
- условий встречи ракеты с целью (модуля и направления вектора скорости ракеты и цели, высоты точки встречи и др.);
- уязвимости цели.

При круговом распределении ошибок наведения и управления условный закон поражения цели приближенно описывается зависимостью

$$p(h) = \exp\left(-\frac{h^2}{2 \cdot R_0^2}\right), \quad (2)$$

где  $R_0$  – параметр условного закона, численно равный величине промаха, при которой условная вероятность поражения цели составляет

$$p(h = R_0) = \exp(-0,5) = 0,606.$$

Полная вероятность сложного события, т.е. вероятность поражения цели одной ракетой, будет

$$W_1 = \int_0^{\infty} \varphi(h) \cdot p(h) \cdot dh = \int_0^{\infty} \frac{h}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{h^2 + h_0^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{h \cdot h_0}{\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{2 \cdot R_0^2}\right) \cdot dh. \quad (3)$$

После приведения интеграла (3) к табличному [5] и выполнения необходимых преобразований получим

$$W_1 = \frac{1}{1 + \bar{\sigma}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\bar{h}_0}{2 \cdot (1 + \bar{\sigma}^2)}\right), \quad (4)$$

где  $\bar{h}_0 = h_0/R_0$  – нормированное математическое ожидание систематической ошибки;  $\bar{\sigma} = \sigma/R_0$  – среднее квадратическое значение нормированной флюктуационной ошибки наведения.

Как следует из (4), вероятность поражения одиночной цели при пуске по ней одной ракеты определяется тремя параметрами:  $h_0$ ,  $\sigma$ ,  $R_0$ .

Первые два параметра связаны в основном с системой управления и маневренными свойствами ракеты. Их значения определяются на основе реше-

ния системы уравнений, описывающих движение и управление ракетой, или путем моделирования полета на компьютерах с использованием натуральных элементов системы управления.

Систематическими ошибками  $h_0$  принято считать такие ошибки, которые при стрельбе остаются постоянными или изменяются по определенному закону. Систематическая ошибка может быть выявлена и устранена путем ввода соответствующих поправок. Если величина систематической ошибки зависит от параметров движения цели, что свойственно целому ряду методов наведения, то компенсация такой ошибки в ряде случаев затруднена. Основными составляющими динамической ошибки и причинами их возникновения могут быть: ошибки, обусловленные ограниченными возможностями ракет по перегрузке; ошибки, вызванные погрешностями ввода в команды управления компенсационных поправок на систематическую составляющую динамической ошибки; ошибки переходных процессов.

Линейное расстояние между равноудаленными от пункта наведения точками кинематической и динамической траектории называется систематической динамической ошибкой метода наведения.

Рассмотрим динамические ошибки различных методов наведения ЗУР, которые нашли применения в различных вариантах модернизации ЗРК С-125. Как известно, в ЗРК С-125 не проходивших модернизацию и в варианте модернизации WZE Польша используются два устаревших метода наведения: метод трех точек (ТТ) и метод половинного спрямления (ПС). Российское НПО «Алмаз» и Российско-Белорусское МФПГ «Оборонительные системы» имея, в отличие от поляков, с своим распоряжении исчерпывающие данные о контуре наведения, перешли к хорошо зарекомендовавшему себя методу пропорционального сближения. Белорусское УП «Тетраэдр», вероятно также имея данные по контуру наведения, применило новые методы: метод кинематического дифференциального управления (КДУ) и модернизированный метод трех точек (МТТ). Рассмотрим, как это повлияло на динамические ошибки.

Как известно [6], для метода трех точек проекций нормального ускорения ракеты в точке встречи

$$\begin{cases} W_{к ny} = W_{ц ny} + (\chi - 2 \cdot \dot{\tau}_{ц}) \cdot \dot{\epsilon}_{ц}; \\ W_{к nz} = W_{ц nz} - (\chi - 2 \cdot \dot{\tau}_{ц}) \cdot \dot{\beta}_{ц} \cdot \cos(\dot{\epsilon}_{ц}), \end{cases} \quad (5)$$

где  $\chi = 2 \cdot \dot{\tau}_{\delta} - \tau_{\delta} \cdot (\dot{V}_{\delta} / V_{\delta})$ ;  $W_{ц ny}$ ,  $W_{ц nz}$  – проекции нормального ускорения цели;  $\dot{\tau}_{ц}$  – скорость изменения дальности до цели;  $\dot{\epsilon}_{ц}$  – скорость изменения угла места цели;  $\dot{\beta}_{ц}$  – скорость изменения азимута цели.

Для того чтобы совместить динамическую траекторию с кинематической, т.е. устранить ошибку, необходимо в состав команды управления ракетой ввести компенсационную поправку, равную динамической ошибке наведения, но с обратным знаком.

$$h_{\dot{\alpha}} \approx W_{\dot{\epsilon}_n} / K_0,$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления разомкнутого контура управления.

Формулы (4) показывают большую зависимость потребных нормальных ускорений ракеты, а, следовательно, и динамических ошибок наведения, от ускорений воздушной цели. Наличие в формуле проекций нормального ускорения воздушной цели затрудняет определение компенсационной поправки.

Как известно [6], для метода половинного спрямления проекций нормального ускорения ракеты в точке встречи

$$\begin{cases} W_{\dot{\epsilon}_{ny}} = \chi \cdot 0,5 \cdot \dot{\epsilon}_{\delta} + r_{\delta} \times \\ \times (0,5 \cdot (\ddot{i}_{\delta} / \dot{i}_{\delta}) \cdot \dot{\epsilon}_{\delta} + 0,25 \cdot \beta_{\delta}^2 \cdot \cos(\epsilon_{\delta}) \cdot \sin(\epsilon_{\delta})); \\ W_{\dot{\epsilon}_{nz}} = \chi \cdot 0,5 \cdot \dot{\beta}_{\delta} \cdot \cos(\epsilon_{\delta}) - r_{\delta} \times \\ \times (0,5 \cdot (\ddot{i}_{\delta} / \dot{i}_{\delta}) \cdot \beta_{\delta} \cdot \cos(\epsilon_{\delta}) - 0,5 \cdot \dot{\epsilon}_{\delta} \cdot \dot{\beta}_{\delta} \cdot \sin(\epsilon_{\delta})). \end{cases} \quad (6)$$

Для введения в команды управления компенсационной поправки на систематическую составляющую динамической ошибки в немодернизированных ЗРК не определяли вторые производные угловых координат цели, поскольку определение этих производных, как правило, приводило к возрастанию случайных составляющих, т.е. меры, направленные на уменьшение динамических ошибок, влекли за собой увеличение флюктуационных ошибок.

Усредненные значения коэффициента  $k_R$  для некоторых целей

Тип цели	A-10	F-15	F-105	B-52	F-117	B-1A	Cy-7B	Ty-16M	МиГ-15М
$k_R$	1,10	1,22	3,8	2,20	4,1	2,20	3,20	3,0	4,0

Так боевая часть (БЧ) 4Г90 первой ЗУР 5В24 (В-600П) ЗРК С-125 массой 60 кг была снаряжена 3560-3570 стальными готовыми поражающими элементами (ГПЭ) кубической формы весом по 5,5 г. и имела 32...33 кг взрывчатого вещества типа ТГ-20. В период испытаний комплекса по самолетам-мишеням МиГ-15М, летевшим на высоте от 0,6 до 10 км, на дальностях 6 – 10 км промахи ракет составляли от 9 до 48 метров.

По мнению комиссии, вероятность поражения самолета на промахе 18 м составляет 0,9, при промахе 22 м – 0,6, а при промахе 43 метра – 0,4. Новая БЧ 5Б18, устанавливаемая на ЗУР 5В27 (В-601П), а позднее на ЗУР 5В27Д весила 72 кг, снаряжалась около 4500 стальными ГПЭ кубической формы весом по 4,72 – 4,79 г. и имела 33,5 кг взрывчатого вещества типа ТГ-20. БЧ обеспечивала поражение целей с вероятностью 0,9 на промахе 20 м и вероятностью 0,6 при промахе 25 м и вероятностью 0,4 при промахе 47 м.

МФПГ «Оборонительные системы» при модернизации ЗУР 5В27 и 5В27Д до уровня ЗУР 5В27ДЕ заменяет БЧ и радиовзрыватель. Данных о новой БЧ крайне мало, известно только, что количество ГПЭ увеличилось в 3,7 раза, масса каждого ГПЭ увеличи-

лась в 1,6 раза, а начальная скорость разлета осколков на 10 – 15%. Однако и эти данные позволяют сделать оценочные расчеты на основе закона экспоненциального затухания скорости ГПЭ [7]. Нетрудно показать, что  $R_0$  новой БЧ можно оценить на основе характеристик БЧ 5Б18 ( $R_0^*$ ,  $V_0^*$ ,  $A^*$ ) с помощью выражения

$$R_0 = R_0^* \cdot \sqrt{M_{БЧ} / M_{БЧ}^*}, \quad (7)$$

где звездочкой отмечены параметры прототипа. При отсутствии прототипа приближенно полагали, что

$$R_0 = k_R \cdot \sqrt{M_{БЧ}}, \quad (8)$$

где  $k_R$  – коэффициент, обобщенно учитывающий тип БЧ, условия встречи с целью и уязвимость цели. Усредненные значения коэффициента  $k_R$  для некоторых целей приводятся в табл. 3.

Таблица 3

лась в 1,6 раза, а начальная скорость разлета осколков на 10 – 15%. Однако и эти данные позволяют сделать оценочные расчеты на основе закона экспоненциального затухания скорости ГПЭ [7]. Нетрудно показать, что  $R_0$  новой БЧ можно оценить на основе характеристик БЧ 5Б18 ( $R_0^*$ ,  $V_0^*$ ,  $A^*$ ) с помощью выражения

$$R_0 = A^{-1} \cdot \ln(V_0 / V_0^*) + (A / A^*) \cdot R_0^*, \quad (9)$$

где  $V_0$  – начальная скорость разлета ГПЭ, м/с;

$$A = \frac{\rho_B \cdot C_X \cdot \hat{\Phi}}{2 \cdot \gamma^{2/3} \cdot m^{1/3}} -$$

баллистический коэффициент ГПЭ, 1/м;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  – параметр формы ГПЭ (для ГПЭ кубической формы равен 1,5);  $m$  – масса одного ГПЭ, кг;  $\gamma$  – плотность материала ГПЭ, кг/м<sup>3</sup>;  $C_X(V) = 0,855 \cdot (1 + 50 / V)$  – коэффициент лобового сопротивления ГПЭ (при  $V \geq 550$  м/с). Для расчетов примем среднее значение 1,9.

Как правило, для существенного увеличения  $R_0$  конструкторы уменьшают баллистический коэффициент  $A$  за счет замены стальных ГПЭ на ГПЭ из

вольфрамового сплава, т.е. увеличивают плотность и массу ГПЭ. Например, БЧ ракеты AGM-88C HARM обладает в два раза большим радиусом поражения по сравнению с БЧ AGM-88. Она снаряжается 12845 поражающими элементами кубической формы из вольфрамового сплава размером около 5 мм. Осколки могут пробивать лист из мягкой стали толщиной 12,7 мм и броневую плиту толщиной 6,35 мм.

Плотность вольфрама  $19,3 \text{ г/см}^3$ , а плотность стали  $7,7 \text{ г/см}^3$ , т.е. при том же объеме ГПЭ должен быть в 2,5 раза тяжелее. Такое увеличение плотности и массы ГПЭ в соответствии с (8) приведет к увеличению  $R_0$  в 2,5 раза при условии неизменной  $V_0$ . Так как увеличение массы ГПЭ заявлено только в 1,6 раза, то вероятно уменьшен объем ГПЭ за счет которого произошло увеличение числа ГПЭ. Учитывая, что  $V_0/V_0^* = 1,1 \dots 1,15$  (начальная скорость разлета осколков возросла на 10 – 15%)  $R_0$  новой БЧ ЗУР 5B27ДЕ может быть увеличена в 1,8...2 раза по сравнению с БЧ ЗУР 5B27Д.

#### 4. Экономическая эффективность и ее основные составляющие

В соответствии с определением экономическая эффективность является стоимостной оценкой эффекта. Для анализа стоимость целесообразно разделить на три составляющие: стоимость работ по модернизации ЗРК; суммарная стоимость всех затрат на содержание и функционирования ЗРК на боевом дежурстве по ПВО важных государственных объектов; средняя стоимость ракет необходимых на поражение одной цели. На практике оценку экономической эффективности часто представляют в виде отношения

$$W_y = (\tilde{N}_M + \tilde{N}_\Sigma + \tilde{N}_P) / W_1 = \tilde{N}_M / W_1 + \tilde{N}_\Sigma / W_1 + \tilde{N}_P / W_1. \quad (10)$$

Рассмотрим смысловое содержание экономической эффективности  $W_y$ . Вероятность какого-либо события есть не что иное, как средняя относительная частота его появления. Если  $W_1$  есть вероятность поражения цели одной ракетой, то при общем числе  $N$  боевых пусков в среднем будет поражено  $N \cdot W_1$  целей. При этом общие затраты –  $N \cdot (C_M + C_\Sigma + C_P)$ , а средние затраты на одну пораженную цель –  $(C_M + C_\Sigma + C_P) / W_1$ . Следовательно, показатель (6) представляет собой среднюю величину (математическое ожидание) затрат на поражение одной цели. Чем меньше эта величина, тем больше целей можно поразить при одних и тех же затратах на всю систему ПВО. Рассмотрим вклад частных слагаемых (6), в различных сценариях дальнейшего продолжения жизненного цикла ЗРК. Сценарий №1: образец после модернизации находится в боевом составе и несет боевое дежурство в мирное время. При таком сценарии возможны лишь единичные пуски по гражданским самолетам захваченным террористами и третьим слагаемым в выражении (6)  $C_P / W_1$  можно пренебречь по сравне-

нию с двумя первыми. В этом случае основные затраты при модернизации  $C_M$  целесообразно направить не на достижение высоких боевых возможностей, а на снижение эксплуатационных расходов и количества обслуживающего персонала. Сценарий №2: образец после модернизации консервируется и используется только в случае начала боевых действий. В этом случае основные затраты при модернизации  $C_M$  целесообразно сосредоточить на достижение высоких боевых возможностей и живучести ЗРК. Для удобства сравнения технические и эксплуатационные параметры различных вариантов модернизации приведены в табл. 1.

Стоимость модернизации  $C_M$  одного ЗРК включает собственно стоимость работ по модернизации и часть расходов на разработку. Эта часть тем меньше, чем больше ЗРК модернизируется. Поэтому все фирмы стараются модернизировать как можно больше ЗРК в разных странах. Лидерство на мировом рынке захватило МФПГ «Оборонительные системы» в первую очередь потому, что только оно обеспечивает модернизацию ЗУР с продлением ресурса на 15 лет. Модернизация включает замену БЧ, радиовзрывателя, автопилота, аппаратуры радиоуправления и двигателя ЗУР. Кроме того, ЗРК С-125-2М «Печора-2М» имеет наилучшие из всех вариантов модернизации боевые возможности и живучесть. ЗРК С-125-2М имеет в своем активе наибольший объем полигонных испытаний. Сегмент мирового рынка более дешевых вариантов модернизаций захвачен УП «Тетраэдр» и НПО «Алмаз». Кроме того, на всех тендерах принимает участие вариант модернизации WZE Польша.

#### Выводы

Ограниченное финансирование Вооруженных Сил Украины и малое количество ЗРК, подлежащих модернизации, приводит к необходимости выставить следующие приоритеты при модернизации ЗРК:

1. Сокращение эксплуатационных расходов и обслуживающего персонала.
2. Сокращение рабочего времени ЗРК и обеспечение двухканальности по цели за счет использования двух антенных постов.
3. Уменьшение систематических и флюктуационных ошибок наведения.
4. Доработку оптического канала (ТОВ «Карат-2»), создание инфракрасного канала и обеспечение автоматического сопровождения цели в этих каналах.
5. Повышение помехозащищенности и живучести ЗРК (введение пассивных методов наведения ЗУР на цель, пространственное разнесение пусковых, отвлекающие передатчики).

#### Список литературы

1. Советская военная энциклопедия в 8 т. – Т. 8. – 616 с.
2. Основы проектирования ракет класса «воздух-воздух» и авиационных катапультных установок для них:



учебник / В.А. Нестеров, Э.Е. Пейсах, Ф.Л. Рейдель и др.; под общ. ред. В.А. Нестерова. – М.: Изд-во МАИ, 1999.

3. Проектирование зенитных управляемых ракет: учебник / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Болотов, И.С. Голубев, А.М. Матвеев, В.Я. Мизрохи, В.Н. Новиков, В.Г. Светлов; под. ред. И.С. Голубева и В.Г. Светлова. – М.: Изд-во МАИ, 1999.

4. Справочник офицера противовоздушной обороны / Г.В. Зимин, С.К. Бурмистров, Б.М. Буркин и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1978.

5. Янке Е. Специальные функции: Пер. с нем. / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш. – М.: Наука, 1968.

6. Неупокоев Ф.К. Стрельба зенитными ракетами / Ф.К. Неупокоев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1991.

7. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов: учебник / И.А. Балаганский, Л.А. Мерзиевский. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2004.

Поступила в редколлегию 1.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.Н. Седышев Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### **ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРУБІЖНИХ ВАРІАНТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗРК С-125М1 «ПЕЧОРА-М1» ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ ППО ВАЖЛИВИХ ДЕРЖАВНИХ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ**

П.Ю. Седишев, С.І. Бурковський

Проведена порівняльна оцінка ефективності зарубіжних варіантів модернізації ЗРК С-125М1 при вирішенні задач ППО важливих державних об'єктів України. Визначені ключові напрями модернізації ЗРК, що дають основний внесок в ефективність.

**Ключові слова:** ЗРК «Печора», тактико-технічні характеристики, модернізація, ефективність.

### **COMPARATIVE ESTIMATION OF EFFICIENCY OF FOREIGN VARIANTS OF MODERNIZATION OF ANTI-AIRCRAFT ROCKET COMPLEX C-125M1 «PECHORA-M1» AT THE DECISION OF TASKS ANTI-AIRCRAFT DEFENCE OF IMPORTANT STATE OBJECTS OF UKRAINE**

P.Yu. Sedyshev, S.I. Burkovskiy

The comparative estimation of efficiency of foreign variants of modernization of anti-aircraft rocket complex C-125M1 is conducted at the decision of tasks anti-aircraft defence of important state objects of Ukraine. Key trends are certain modernizations of anti-aircraft rocket complex, givings a basic contribution to efficiency.

**Keywords:** anti-aircraft rocket complex «Pechora», performance characteristics, modernization, efficiency.