

*С.Н. ЕЛЬЦИН*

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
РАКЕТНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ**

**Книга 2**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

*С.Н. ЕЛЬЦИН*

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Учебное пособие

Книга 2

Санкт-Петербург  
2018

УДК 623.419.011(075.8)  
Е56

**Ельцин, С.Н.**  
**Е56** Эффективность ракетных комплексов: учебное пособие. Кн. 2 / С.Н. Ельцин; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2018. – 117 с.

Излагаются подходы к оценке эффективности ракетных комплексов различного назначения с учетом этапов их боевого функционирования. Анализируются комплексы баллистических, зенитных, крылатых ракет и приводятся алгоритмы расчета показателей эффективности их использования. Приводится пример оценки эффективности переносного зенитного ракетного комплекса (ПЗРК), основанной на использовании метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

Предназначено для студентов дневного и вечернего отделений, изучающих дисциплину «Методы оценки эффективности» на факультете «Ракетно-космической техники».

**УДК 623.419.011(075.8)**

*Рецензент д-р техн. наук, проф. В.И. Лазоркин*

*Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета*

© БГТУ, 2018  
© С.Н. Ельцин, 2018

## 10. МОДЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ БОЕВЫХ СРЕДСТВ

Модель применения боевых средств позволяет ответить на следующие вопросы: при каких условиях будет применено оружие, сколько потребуется времени для принятия решения о его применении, какое количество ракет будет использоваться, сколько времени будет затрачено на исполнение команды о пуске ракеты и какова вероятность успешности пуска назначенного количества ракет.

Конкретные условия, в которых принимаются решения о применении БС, могут быть самыми различными, и человеческий фактор будет играть в них одну из главных ролей. На основе информации о внешней обстановке, собираемой стратегической разведкой и передаваемой по каналам связи, разрабатываются те или иные сценарии военных действий, основанные на различных вариантах развития событий: кто первым нанес удар, какими силами, какой нанесён ущерб, сколько ракет находилось в полной боевой готовности и т.п.

В соответствии с этими планами моделируются различные рабочие процессы, необходимые для реализации того или иного сценария, предшествующего запуску ракет. Простейший пример такого процесса представлен на рис. 10.1.

Первой рабочей характеристикой, подлежащей количественному определению, является время  $(t_1+t_2)$ , затрачиваемое на проведение операций, предусмотренных принятием решения о запуске боевых средств. Интервалы  $t_1$ ,  $t_2$  могут оказаться не слишком критичными для БС стратегического назначения, стоящих на боевом дежурстве и применяемых в первом ударе, но весьма критичны для таких средств, как противовоздушная и противоракетная оборона, и им подобных. После возникновения боевых действий величины этих интервалов приобретают большое значение и для первых. Так, чем больше время, затрачиваемое на выполнение этих операций, тем больше средств может подвергнуться удару со стороны противника и тем выше вероятность их уничтожения.

Второй, подлежащей количественному определению рабочей характеристикой, является число уцелевших ракет на конкретной ракетной базе, которые могут быть запущены через тот или иной промежуток времени, начиная с момента получения команды о боевой готовности. Эта величина является функцией качества технического обслуживания БС, надежности ракет, времени, затрачиваемого на проверку ракет и ремонт тех, у которых обнаружены неисправности, а также темпа их запуска.

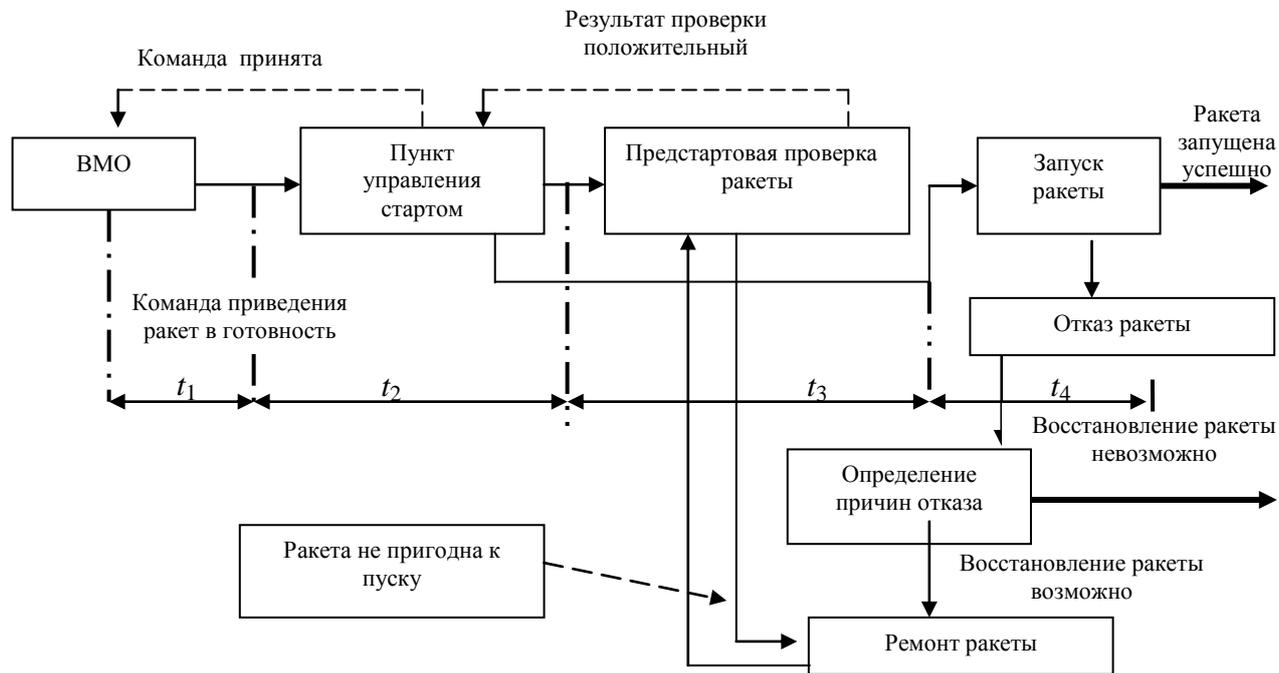


Рис. 10.1. Модель применения БС

К моменту получения команды на пуск ракет предстартовую проверку смогут проходить те  $N_1$  ракет, которые стоят на боевом дежурстве в полной боевой готовности (рис. 10.2).

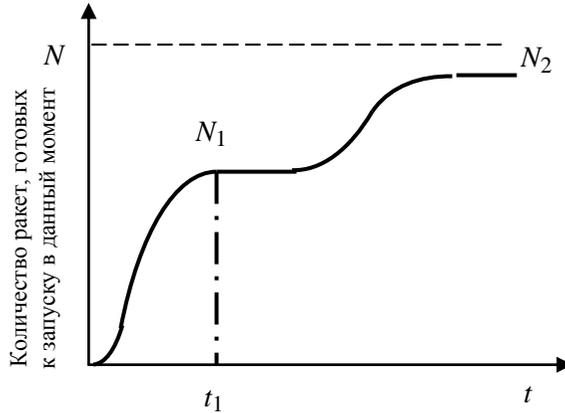


Рис. 10.2. Готовность ракет к использованию

Остальные  $N_2$  из общего их числа будут находиться в какой-либо стадии эксплуатационного или технического обслуживания (учеба обслуживающего персонала, плановое техническое обслуживание, ремонт и т.п.). После передачи команды на приведение ракет в боевую готовность количество боеготовых ракет будет увеличиваться в течение какого-то времени. В зависимости от темпа стрельбы определенное количество может отказать во время пуска, которые вместе с ракетами  $N_2 - N_1$  через какое-то время  $t$ , большее чем  $t_1$ , в последующем могут быть использованы в боевых действиях. Причем не все  $N_2$  ракеты могут стартовать, а только те из них, которые оказались пригодными к пуску после восстановления.

Коэффициент боеготовности  $P_6$  существующей боевой ракетной системы можно оценить, используя один из следующих способов: на основе данных учений или на основе имеющихся статистических данных о состоянии БС в течение длительного времени. Результатами периодических проверок установлены графики готовности БС к практическому использованию (рис. 10.3).

Вероятность  $P_6$  реально равна средней относительной продолжительности времени нахождения комплекса в исправном состоянии:  $P_6 = \text{СВМО} / (\text{СВМО} + \text{СВВ})$ .

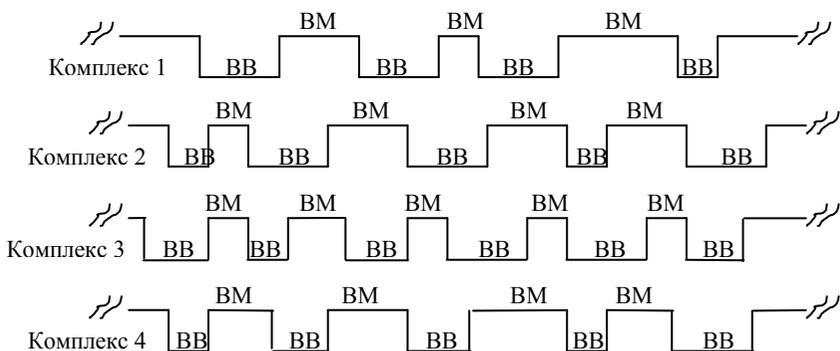


Рис. 10.3. Графики готовности БС к практическому использованию

Очевидно, что вероятность готовности  $D_a$  (рис. 10.4) является функцией количества и качества наземного испытательного оборудования, численности обслуживающего персонала, отнесенной к числу подготавливаемых к старту ракет, и объявленной степени готовности. На рисунке  $t_1$  – время, соответствующее вероятности  $P_1$  того, что комплекс готов к запуску. Вероятность отказа определяется такой характеристикой комплекса, как надежность.

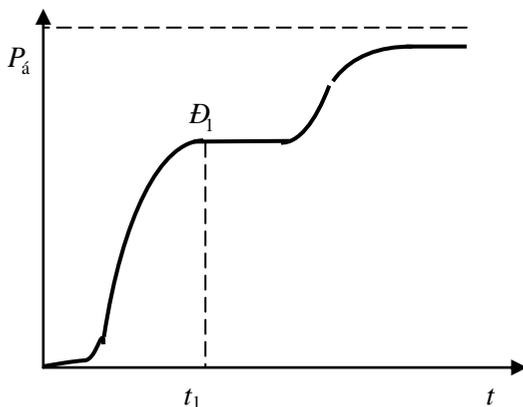


Рис. 10.4. Вероятность готовности боевых средств

При оценке боевой эффективности используют обобщенный критерий надежности. В некоторых случаях отказ любого изделия, входящего в состав комплекса вооружения, выводит из строя весь комплекс, т.е. нарушает его нормальное функционирование. В этих случаях говорят, что комплекс вооружения является системой без резервирования (рис. 10.5). Например, если ракетный комплекс состоит из одной пусковой установки и одной ракеты, то выход из строя одного из этих изделий приводит к выходу из строя всего комплекса.

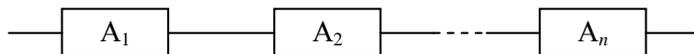


Рис. 10.5. Система без резервирования

Если изделия комплекса выходят из строя независимо друг от друга, то за критерий надежности нерезервированной системы принимают вероятность безотказного функционирования  $D_1 = \prod_{i=1}^v D_{di}$ ,

где  $v$  – число изделий, входящих в состав комплекса.

Некоторые комплексы состоят из нескольких одинаковых, дублирующих (резервных) изделий, так что выход из строя одного из них не приводит к выходу из строя всего комплекса. Такие комплексы называют системами с резервированием (рис. 10.6).

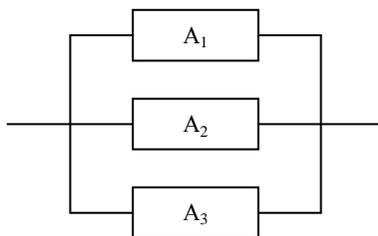


Рис. 10.6. Система с резервированием

Вероятность нормального функционирования резервированной системы

$$P_n = 1 - \prod_{i=1}^v (1 - P_{bi}).$$

Но чаще всего комплекс является смешанной системой.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Как производится учет времени пребывания объекта на позиции?
2. Какие рабочие характеристики подлежат определению в модели применения БС?
3. От чего зависит вероятность боевой готовности комплекса вооружения?

4. Приведите пример системы без резервирования.
5. Приведите пример системы с резервированием.
6. Как решается вопрос с продлением сроков службы ракет?

## 11. СИСТЕМЫ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ И ПРОТИВОРАКЕТНОЙ ОБОРОНЫ

### 11.1. Характеристики систем ПВО и ПРО

При анализе систем, предназначенных для борьбы со средствами воздушного нападения, выделяют характерные области пространства, размеры которых характеризуют возможности этих систем. Такими областями являются зоны обзора, пуска и поражения цели (рис. 11.1).

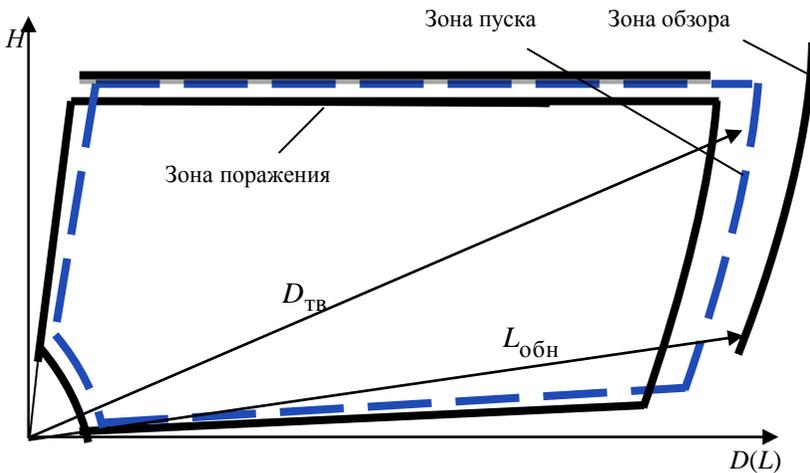


Рис. 11.1. Характерные зоны функционирования систем ПВО и ПРО

*Зона обзора* – область пространства, в котором возможно обнаружение и устойчивое сопровождение цели и наводимых ракет (перехватчиков). Параметры зоны обзора определяются составом и характеристиками средств обнаружения и распознавания целей. К таким средствам относятся РЛС различного назначения, спутниковые системы. Например, дальность действия РЛС (дальность прямой видимости)  $D_{пв} = 3,57(\sqrt{h_a} + \sqrt{H_n})$  или, с учетом рефракции,

$D_{пв} = 4,12(\sqrt{h_a} + \sqrt{H_{п}})$ , где  $h$  – высота антенны,  $H_{п}$  – высота полета, м.

*Зона пуска* – область пространства, при нахождении цели в которой запущенная ракета (перехватчик) встретится с ней с вероятностью не ниже заданной.

*Зона поражения цели* – область пространства, в которой обеспечивается встреча ракеты (перехватчика) с целью и поражение цели с вероятностью не ниже заданной.

Другими характеристиками систем ПВО и ПРО являются следующие.

*Канальность комплексов* – огневая производительность комплекса (количество ракет, которое комплекс может запустить по обнаруженным целям одновременно). Общее число каналов ЗРК  $n_k = n_{цк} n_{рк}$ ,  $n_{цк}$  – число целевых каналов РЛС,  $n_{рк}$  – число ракетных каналов.

Пропускная способность комплекса определяется работным временем  $t_p$ , циклом стрельбы  $T_{ц}$  и располагаемым временем для обстрела цели  $T_{об}$ .

*Цикл стрельбы* характеризуется временем занятости одного целевого канала:  $T_{ц} = t_p + t_{зур} + t_{инт} + t_{оц}$ , где  $t_{зур} = D_{тв}/V_{ср}$  – полетное время ЗУР (АР);  $t_{инт}$  – сумма временных интервалов между пусками ракет в очереди;  $t_{оц}$  – время оценки результатов стрельбы;  $D_{тв}$  – наклонная дальность до точки встречи,  $V_{ср}$  – средняя скорость ракеты

*Работное время* – время от начала обнаружения цели до момента пуска ракеты:  $t_p = t_{цу} + t_{захв} + t_{п}$ , где  $t_{цу}$  – время на обработку целеуказания РЛС слежения за целью и ее обнаружения;  $t_{захв}$  – время захвата цели на сопровождение;  $t_{п}$  – время на подготовку ЗРК к пуску.

*Располагаемое время* – время, которым располагает ЗРК для обстрела цели:  $t_{расп} = (L_{обн} - L_{бл.гр})/V_{ц}$ , где  $L_{обн}$  – дальность обнаружения;  $L_{бл.гр}$  – дальность до ближней границы зоны поражения

### Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите функции, выполняемые системой ПРО.
2. Сформулируйте требования, предъявляемые к системе ПРО.
3. Что такое зона обзора?
4. Чем определяется дальность действия РЛС?
5. Дайте определение зоны пуска.
6. Дайте определение зоны поражения цели
7. Что такое канальность комплексов и чем она определяется?
8. Что такое цикл стрельбы и каковы его составляющие?
9. Что такое рабочее время комплекса и чем оно определяется?
10. Чем определяется располагаемое время комплекса?

### 11.2. Модель движения ракеты к зоне обороны

Обратимся к сценарию, изложенному в подразд. 2.4. Количество боеголовок, которые достигнут зоны действия системы ПРО, будет определяться эксплуатационной надежностью носителей и головных частей в течение времени полета до этой зоны (рис. 11.2) через вероятность безотказной работы ракеты и ГЧ за время полета к зоне обороны противника.

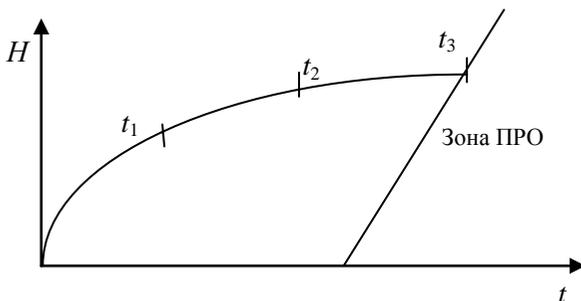
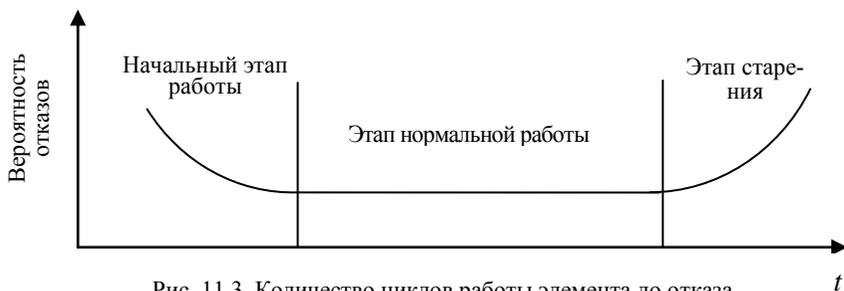


Рис. 11.2. Модель движения ракеты к зоне обороны:  
 $t_1$  — время движения носителя;  $t_2$  — время функционирования РГЧ (МГЧ, перехватчика);  $t_3$  — время достижения рубежа перехвата

В общем случае частота отказов будет примерно постоянной в процессе большей части срока службы испытываемого элемента, за исключением лишь двух участков: в начальный период эксплуатации, когда частота отказов будет выше средней (из-за наличия производственных

дефектов), и в заключительный период срока службы, когда в связи со старением изделий частота отказов будет наибольшей (рис. 11.3).



Вероятность безотказной работы на этапе нормальной работы за время  $t$  элемента, имеющего среднее время между отказами  $t_{cp}$  (см. разд. 10):  $P_6 = \exp(-t/t_{cp})$ .

Условная вероятность отказов на этапе начальной работы (этапе приработки) выше, чем на этапе нормальной. Начальный этап используется для обнаружения и устранения производственных дефектов.

Этап старения на практике стараются исключить, осуществляя регламентное техническое обслуживание оборудования. В процессе регламентных работ производят периодические испытания и проверки определенных элементов оборудования и замену тех из них, проверка которых показала, что они работают в граничном режиме, а также тех, частоты отказов которых заметно увеличились.

Определять вероятность безотказной работы ракеты необходимо с учётом времени  $t_1$  для ракетной части и  $t_2$  для РГЧ и МГЧ.

Модель раннего обнаружения применяется для определения момента времени, когда противостоящая сторона впервые получит тактическое предупреждение о начале ракетного нападения противника.

Процесс обнаружения является случайным. Один из параметров, характеризующих качество работы любого обнаружителя или другого подобного датчика информации, — его пространственная зона действия, рассматриваемая применительно к некоторому определенному моменту времени. Вероятность обнаружения цели (при условии, что аппаратура работает нормально) является функцией нескольких переменных, включая рабочие характеристики элементов системы обнаружения, размеры цели, её положение относительно пространственной зоны действия и, в частности, дальности цели до обнаружителя.

Система должна ответить на вопросы: что это такое, является ли обнаруженный объект “своим ”или ”чужим”, является ли он опасным, где находится, откуда и куда движется, сколько всего объектов и т.п.

На активном участке траектории БР можно обнаружить датчиками ИК- и УФ-излучения. Для обнаружения и непрерывного сопровождения можно использовать высокоорбитальные ИСЗ или их систему, а также загоризонтные РЛС, которые обеспечивают время предупреждения, равное времени полета МБР от района старта до района падения.

Можно поражать МБР на старте и в полете на активном и пассивном участках траектории. Сложности перехвата МБР на внеатмосферном участке заключаются в необходимости сверхдальнего обнаружения МБР, распознавания ГЧ, применения высокоскоростных антиракет, несущих кинетический боеприпас. Вероятность распознавания целей в условиях применения комплекса средств преодоления зависит от объема их рассеивания, радиуса действия БГ антиракет и возможности селективного подрыва этих БГ.

Методы селекции и распознавания целей представлены в табл. 11.1 и 11.2.

Таблица 11.1

Метод селекции целей	Признак	
	Измеряемый	Селективный
По баллистическому коэффициенту	Торможение цели	Масса, сечение мишени
По интенсивности плазмообразования	ЭПР ударного слоя, высота скачка ЭПР	Масса, сечение мишени
По ИФ-диапазону	Частота	Частота

Таблица 11.2

Методы распознавания			
Участок полета	Метод (параметр распознавания)	Измеряемый параметр	Селективный параметр
Внеатмосферный	Расчет траектории цели в режиме сопровождения	Дальность, скорость	Степень опасности объекта по отклонению точки падения
	Активная селекция (высотный ядерный взрыв)		Приращение скорости (оценка массы)

Внеатмосферный	Анализ структуры отраженного РЛС сигнала	ЭПР, поляризационные характеристики, спектр огибающей отраженного сигнала	Форма, геометрические размеры цели, направление и период кувыркания объектов
	Анализ теплового фона	ИФ-излучение объекта, дальность, скорость	Форма, геометрические размеры цели, направление движения, скорость
Спуск в атмосферу	Баллистический параметр (атмосферная фильтрация)	Торможение, скорость	Отношение массы к площади мишени
	Интенсивность плазмообразования	ЭПР ударного слоя и плазменного следа	Масса цели

Для обнаружения и распознавания ГЧ необходимы системы со скоростью обработки данных до нескольких тысяч целей в секунду на одну РЛС.

Средства дальнего обнаружения должны решать следующие основные задачи:

- обнаруживать БР, предупреждать о ракетном нападении, оценивать степень угрозы и давать рекомендации о проведении ответных мероприятий;
- распределять противоракетные комплексы по целям.

Основу системы дальнего обнаружения США составляют вынесенные РЛС Англии, Гренландии, Аляски, а также группа радиолокаторов, способных обнаруживать цели за пределами прямой видимости. Задачу обнаружения и контроля выполняют также и радиолокаторы испытательных полигонов США.

Дальность действия РЛС – около 5000 км. РЛС работает в импульсно-доплеровском режиме. Система съема и предварительной обработки информации селективирует сигналы, уровень которых превышает заданное пороговое значение, определяет доплеровский фильтр, дающий максимальный сигнал, измеряет дальность до цели, обрабатывает пачку сигналов за цикл сканирования, определяет азимут цели. Данные о дальности, скорости, азимуте цели записываются в блоке памяти для сопоставления.

В основе обнаружения и распознавания баллистических целей радиолокаторами ПРО по сигнальным характеристикам лежит явление вторичного излучения, т.е. рассеяния части падающей энергии из-за наличия резкой границы изменения проводимости, диэлектрической постоянной или магнитной проницаемости среды.

Геометрическая форма ГЧ, обеспечивающая наименьшее радиолокационное отражение в направлении оси симметрии, – бесконечный конус.

Критическими факторами в снижении радиолокационного сечения ГЧ являются отражение и диффузия электромагнитной волны у основания ГЧ, на различных выступах и переходах поверхности, которые играют роль уголковых отражателей. Отражение и дифракция от ГЧ существенно зависят от частоты облучающей РЛС. Максимальное количество энергии отражается в направлении на радиолокатор в том случае, если длина волны и геометрические размеры ГЧ соизмеримы.

При изучении структуры отраженных сигналов РЛС в зависимости от размеров объекта и разрешающей способности РЛС цели подразделяют на одиночные, групповые и объемно-распределенные, заполняющие сравнительно большой объем, например облако дипольных отражателей.

Эффективной площадью рассеивания (ЭПР) цели называют площадь поперечного сечения эквивалентной (воображаемой) цели, которая рассеивает всю падающую на нее энергию изотропно, т.е. равномерно во всех направлениях, создавая при этом в приемнике РЛС такой же сигнал, что и реальная цель. Каждый объект имеет свою ЭПР, ее считают через ЭПР простейших элементов, составляющих объект, или определяют экспериментально. Результаты расчетов и экспериментальных исследований, наблюдений за запускаемыми объектами позволяют каталогизировать различные космические и баллистические объекты. Сигнальные характеристики ГЧ анализируют по вторичным признакам – амплитуде и фазе отраженных сигналов, характеризующих размер, форму ГЧ и ее пространственное расположение.

Наибольшие трудности в определении вида реальных диаграмм вторичного излучения вносит процесс произвольного вращения объектов. В этом случае на индикаторе РЛС сопровождения будут наблюдаться регулярные усиления яркости отраженного сигнала, по частоте следования которых можно определить частоту вращения объекта и по устойчивости этих точек судить о его ориентации. По этой информации можно также определить относительные массово-инерционные параметры и на их основании – местоположение ГЧ среди ложных целей.

Для решения задачи перехвата необходимо определить местоположение цели к некоторому моменту времени с заданной точностью.

В системе ПРО радиолокаторы, сопряженные с ЭВМ, определяют параметры цели: азимут, угол места, наклонную дальность и радиальную составляющую скорости цели. Этих параметров достаточно, чтобы, решая систему уравнений, описывающих движение объекта, построить прогнозируемую траекторию. При детерминированном характере движения цели и идеальном измерителе в принципе достаточно было бы шести независимых измерений одной из величин (например, азимута) для однозначного определения искомым параметров. Однако в показаниях реальных приборов всегда присутствуют ошибки, обусловленные многими факторами.

Наличие случайных составляющих в ошибках измерений заставляет отказаться от детерминистского подхода и перейти к статистическому. Среди множества статистических методов наиболее эффективными являются методы максимального правдоподобия, байесов метод и метод наименьших квадратов.

Метод максимального правдоподобия представляет собой один из основных методов теории точечных оценок и широко используется при обработке радиолокационных измерений. Этот метод максимизирует функцию правдоподобия  $L(a) = P(y/a)$ , которая определяется как апостериорная плотность вероятности  $P(y/a)$ , где  $y$  – совокупность исходных данных (выборка из  $N$  измерений),  $a$  – исходный вектор оцениваемых параметров.

Для нахождения максимума плотности вероятности необходимо решить систему уравнений правдоподобия  $\partial \ln L(a) / \partial a_i = 0$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ , так как порядок системы уравнений, описывающих движение материальной точки в поле тяготения, равен шести. В общем случае уравнения правдоподобия являются нелинейными. Общим приемом, существенно ускоряющим и упрощающим вычисления, является линеаризация исходной нелинейной системы уравнений относительно опорной траектории движения.

Возможности систем обнаружения и сопровождения целей системой ПРО будет определяться их пропускной способностью. В теории массового обслуживания пропускная способность РЛС может определяться как максимальная плотность потока целей, который может быть обслужен радиолокационной станцией. В данном случае обслуживание означает выдачу информации по целям с точностью не ниже заданной на соответствующих этапах работы РЛС. Под плотностью потока целей обычно понимают количество целей, которые вхо-

дят в зону наблюдения за единицу времени:  $S = M_{ц} / \Delta t$ , где  $M_{ц}$  – среднее число обнаруживаемых целей;  $\Delta t$  – среднее время обслуживания потока целей.

В качестве критерия обслуживания могут приниматься ошибки измерения сигнальных характеристик и траекторных параметров цели. В подавляющем большинстве случаев оценку качества обслуживания можно свести к шаровой ошибке  $\sigma_*$  положения цели в экстраполированной точке. По данному критерию цель считается обслуженной, если ошибка экстраполяции  $\sigma_3(t_3, t_n) \leq \sigma_*$ , где  $\sigma_3 = \sqrt{D_3}$  – большая полуось эллипсоида ошибок экстраполяции цели к рубежу принятия решения;  $t_3$  – время прихода цели в экстраполированную точку;  $t_n$  – время наблюдения,  $D_3 = D_{фз} + D_{мб} + D_{сз}$ ,  $D_{фз}$  – некоррелированные (флуктуационные) ошибки, характеризующиеся большим спектром на время наблюдения, например постоянные собственные шумы приемных устройств;  $D_{мб}$  – слабо коррелированные (медленно меняющиеся) ошибки, например неточность юстировки измерительных устройств и условия распространения радиоволн;  $D_{сз}$  – сильно коррелированные ошибки, например дефекты измерительных устройств.

Время обслуживания потока целей рассчитывается в зависимости от метода сканирования пространства. Для РЛС с механическим обзором полное время обслуживания  $\Delta t$  представляет собой совокупность временных интервалов выполнения ряда последовательных операций:  $\Delta t = \sum_{i=1}^{M_{ц}} (t_{пi} + t_{поi} + t_{сi})$ , где  $i$  – порядковый номер целей, разрешаемых по угловой координате;  $t_{пi}$  – среднее время переброски луча в направлении  $i$ -й цели;  $t_{поi}$  – время поиска  $i$ -й цели в угловом стробе целеуказания, формируемом на этапе обнаружения;  $t_{сi}$  – время сопровождения и измерения параметров  $i$ -й цели.

В простейшем случае детерминированного и равномерного потока идентичных целей энергия РЛС распределяется по целям равномерно. Тогда максимальное число обслуживаемых целей составит  $M_{цmax} = F_{max} / F_{min}$ , где  $F_{max}$  и  $F_{min}$  – максимальный и минимальный темпы локации соответственно.

Максимальный темп локации ограничивается средней мощностью передатчика, минимальный – условиями устойчивого сопровождения цели и зависит от типа траектории. Тогда величина пропускной способности РЛС  $S = F_{\max} / (F_{\min} \Delta t)$ . Произведение  $F_{\min} \Delta t$  определяет объем выборок по каждой цели за время наблюдения  $\Delta t$ .

В случае произвольного потока целей пропускная способность РЛС определяется решением задачи оптимального распределения энергии радиолокатора в пространстве по априорным данным о совокупности характеристик целей, такими как ЭПР ( $\sigma_i$ ), с учетом ограниченных энергетических ресурсов РЛС.

Основным фактором, ограничивающим пропускную способность, кроме энергетического ресурса РЛС, является также организация помеховой обстановки. Пропускная способность РЛС определяется к основным рубежам функционирования системы ПРО: целераспределения, принятия решения на пуск ракеты, уничтожении целей.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Перечислите составляющие модели движения ракеты к зоне обороны.
2. От чего зависит вероятность обнаружения цели (при условии, что аппаратура работает нормально)?
3. Какие системы и аппаратуру можно использовать для обнаружения и непрерывного сопровождения целей?
4. От чего зависит вероятность распознавания целей в условиях применения комплекса средств преодоления?
5. Перечислите методы селекции и распознавания целей.
6. По каким признакам можно оценить степень опасности объекта на внеатмосферном участке траектории?
7. Как оценить приращение скорости цели на внеатмосферном участке траектории?
8. Как оценить форму и геометрические размеры цели?
9. Как оценить отношение массы цели к площади ее миделя?
10. Как оценить массу цели?
11. Какие задачи должны решать средства дальнего обнаружения?
12. Что лежит в основе обнаружения и распознавания баллистических целей радиолокаторами ПРО?
13. Что такое эффективная площадь рассеивания (ЭПР)?

14. Чему равно минимальное число независимых измерений одного из параметров траектории для однозначного определения искомых координат нахождения цели?
15. В чем суть статистического подхода при оценке составляющих в ошибках траекторных измерений?
16. В чем суть метода максимального правдоподобия и как он используется при оценке местонахождения цели?
17. Чем определяются возможности систем обнаружения и сопровождения целей?
18. Что может быть использовано в качестве критерия оценки положения цели на траектории?
19. Чем определяется максимальное число обслуживаемых целей?

### 11.3. Вероятность прорыва ГЧ через систему ПРО

Боевая задача, решаемая антиракетами ПРО, – своевременное поражение цели, следующей по баллистической траектории или совершающей противоракетный маневр. За критерий боевой эффективности выбирается вероятность  $P_{Г1}$  поражения цели антиракетой после одного выстрела.

Вероятность поражения вошедших в зону ПРО боеголовок зависит также от ряда других факторов, кроме перечисленных выше. Одним из них является пространственная зона поражения (см. рис. 11.1), которая зависит:

- от траектории полета применяемых противоракет (для ракет каждого типа имеется определенная максимальная дальность, определяемая энергетическими возможностями АР и поражающими свойствами ее БЧ или параметрами кинетического перехватчика);
- от времени запаздывания, т.е. времени, которое требуется для выполнения определенных функций, предшествующих пуску противоракет. К таким функциям относятся сопровождение цели, обработка данных и целеуказание, причем все эти этапы работы осуществляются уже после обнаружения цели;
- от характеристик цели, таких как скорость ее полета, маневренность и степень уязвимости при взрыве боеголовок противоракет;
- от поражающих свойств боеголовки противоракеты.

Другой подлежащей рассмотрению рабочей характеристикой является, так же как и в случае с системой раннего обнаружения, максимальная пропускная способность системы. При определенном ко-

личестве средств нападения возможности всех систем обороны могут быть полностью исчерпаны или, как иногда говорят, система может быть перегружена.

Предельные возможности системы ПРО определяются максимальным количеством противоракет, подготовленных для стрельбы на данной позиции, возможным темпом стрельбы, максимальным количеством целей, по которым система может одновременно работать.

Кривая на рис. 11.4 показывает зависимость ожидаемого количества целей, уничтоженных системой, от количества целей, одновременно находящихся в зоне ее стрельбы. Следует отметить, что этот график построен в предположении, что сопутствующего поражения целей не будет. Эти данные можно преобразовать в функцию распределения (рис. 11.5).

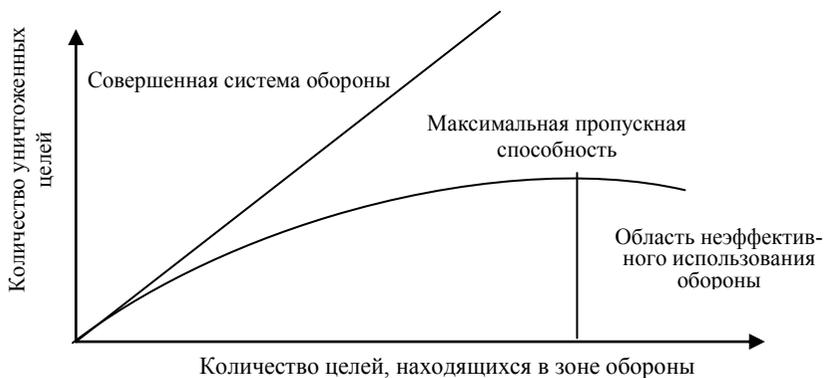


Рис. 11.4. Пропускная способность системы ПРО (ПВО)

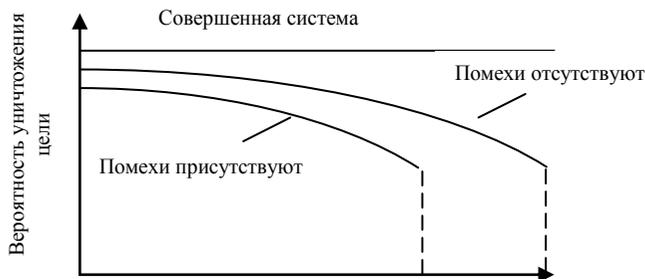


Рис. 11.5. Количество целей, находящихся в зоне обороны

Вероятность прорыва ГЧ через систему ПРО в первом приближении может быть оценена как  $P_{\text{про}} = P_{\text{лц}}P_{\text{про,лц}} + P_{\text{ап}}P_{\text{про,ап}} + P_{\text{лц,ап}}P_{\text{про,лц,ап}}$ , где  $P_{\text{лц}}$  – вероятность оснащения ГЧ ложными целями;  $P_{\text{ап}}$  – вероятность оснащения ракет системами радиопомех;  $P_{\text{лц,ап}}$  – вероятность одновременного оснащения ракет ложными целями и системами радиопомех;  $P_{\text{про,лц}}$  – эффективность защиты ГЧ ложными целями;  $P_{\text{про,ап}}$  – эффективность маскировки ГЧ активными помехами (в простейшем случае – вероятность подавления РЛС распознавания, сопровождения целей и наведения антиракет);  $P_{\text{про,лц,ап}}$  – вероятность защиты ГЧ совокупным применением ложных целей и активных помех.

В качестве показателей технической эффективности защиты ГЧ используются:

- вероятность правильного выбора системой ПРО баллистической цели для перехвата, т.е. вероятность правильного распознавания ГЧ –  $P_p$ ;
- среднее число “опасных” целей, т.е. целей, подлежащих перехвату в первую очередь, по которым проведено целераспределение антиракет;
- вероятность того, что ГЧ останутся непораженными (либо их не будут обстреливать, ошибочно приняв за ЛЦ, либо произойдет промах при перехвате).

Обозначим  $P_{\text{л-г}}$  – вероятность того, что ложная цель будет принята за ГЧ;  $P_{\text{п1}}$  – вероятность поражения цели одной антиракетой после одного выстрела;  $G$  – общее число головных частей;  $G_{\text{н}}$  – число ГЧ, не перехваченных системой ПРО;  $A$  – общее число антиракет, которыми располагает система ПРО;  $A_{\text{ср1}}$  – среднее число антиракет, приходящихся на одну баллистическую цель. Предполагается, что  $P_p$ ,  $P_{\text{л-г}}$  и  $P_{\text{п1}}$  независимы между собой и постоянны.

Вероятность правильного распознавания целей системой ПРО зависит от априорной информации, имеющейся в ее распоряжении. Если системе ПРО заранее неизвестно действительное число ГЧ, участвующих в налете, то она должна работать в режиме распознавания одновременно по всем целям, не производя окончательный выбор целей для перехвата до тех пор, пока дальнейшая задержка пуска антиракет станет неприемлемой. Если же системе ПРО известно коли-

чество ГЧ в полете, то она может производить распознавание и обстрел выбранных целей последовательно, не затягивая этот процесс на максимально возможное время.

В режиме одновременного распознавания вероятность правильного распознавания целей  $P_{\Gamma\Gamma}$ , участвующих в налете, может быть определена через вероятность  $P_{\Gamma\Gamma_1}$  того, что  $\Gamma_1$  из общего числа головных частей  $\Gamma$  будут определены как истинные цели и вероятность  $P_{\Gamma\Gamma_1}$  того, что  $\Gamma_1$  из общего числа ложных целей  $\Gamma$  – как истинные ложные цели. Тогда

$$P_{\Gamma_1\Gamma_1} = P_{\Gamma\Gamma_1} P_{\Gamma\Gamma_1} = C_{\Gamma}^{\Gamma_1} (1 - P_{\Gamma})^{\Gamma - \Gamma_1} P_{\Gamma}^{\Gamma_1} C_{\Gamma}^{\Gamma_1} (1 - P_{\Gamma})^{\Gamma - \Gamma_1} P_{\Gamma}^{\Gamma_1} P_{\Gamma}^{\Gamma_1 - \Gamma_1},$$

где  $C_{\Gamma}^{\Gamma_1}$  и  $C_{\Gamma}^{\Gamma_1}$  – число сочетаний количества правильно распознанных истинных целей из общего их числа.

При последовательном распознавании вероятность правильного распознавания зависит от порядка, в котором анализируются цели. Для любой последовательности головных частей и заданного числа ложных целей искомая вероятность содержит основной элемент  $P_{\Gamma}^{\Gamma_1} (1 - P_{\Gamma})^i$ , где  $i$  – в предположении, что  $(i+1)$ -я цель оказывается ГЧ. Число таких сочетаний  $C_{M_z - (i-1)}^i$ .

Общее число возможных последовательностей ГЧ и ЛЦ равняется числу сочетаний по  $\Gamma_1$  или  $\Gamma$  из  $(\Gamma_1 + \Gamma)$ . Тогда правильная классификация всех ГЧ:

$$P_{\Gamma\Gamma} = \frac{P_{\Gamma}^{\Gamma}}{C_{\Gamma+\Gamma}^{\Gamma}} \sum_{i=0}^{\Gamma} C_{\Gamma-1+i}^i (1 - P_{\Gamma})^i.$$

Для стороны, планирующей удар, представляет интерес выяснить, какое число ГЧ будет обстреляно и сколько антиракет расходуется на одну ГЧ.

Предполагается, что система ПРО использует в этом случае режим одновременного распознавания всех баллистических целей в полете. Кроме того, обороняющаяся сторона обладает априорной информацией о наличии среди наблюдаемых целей ложных, и на каждую из целей, принимаемую за “опасную”, выделяется одинаковое количество ракет. Необходимо иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, система ПРО будет использовать часть антиракет для пере-

хвата ложных целей, которые приняты за опасные, и, во-вторых, некоторая часть истинных целей вообще не будет подвергаться обстрелу, поскольку они будут классифицированы как ложные.

Среднее число антиракет  $A_{cp1}$ , выделяемых для обстрела каждой из опасных целей, может быть определено, если положить  $\Gamma_1 = i$  и  $L_1 = L - j$ , где  $i, j$  – число истинных и ложных целей, соответственно принятых за опасные ( $i+j > 0$ ):

$$A_{cp1} = A_{сум} \sum_{i=0}^{\Gamma} \sum_{j=0}^{L} \frac{C_{\Gamma}^i C_L^j}{i+j} P_{\Gamma}^i (1-P_{\Gamma})^{\Gamma-i} P_L^j (1-P)^{L-j},$$

где  $A_{сум}$  – общее число антиракет системы ПРО. Ожидаемое число истинных целей, не подвергшихся обстрелу,

$$\Gamma_2 = \Gamma - \sum_{i=0}^{\Gamma} i C_{\Gamma}^i P_{\Gamma}^i (1-P_{\Gamma})^{\Gamma-i}.$$

Для оценочных расчетов можно использовать среднее значение таких характеристик, как число обстрелянных головных частей  $P_{\Gamma} \Gamma$  и общее число обстрелянных целей  $P_{\Gamma} \Gamma + P_L L$ . Тогда

$$A_{cp} = A_{сум} / (P_{\Gamma} \Gamma + P_L L); \quad \Gamma_2 = (1 - P_{\Gamma}) \Gamma.$$

Приведенные уравнения составлены в предположении, что имеющийся запас антиракет обеспечивает обстрел всех опасных целей (по одной антиракете на каждую цель).

Оценку количества обстрелянных истинных целей, оставшихся не пораженными системой ПРО, проведем следующим образом.

Вероятность того, что цель не поражена, зависит от числа антиракет и вероятности поражения одной антиракетой. В случае независимых пусков антиракет эта вероятность равна:  $1 - P_{п} = (1 - P_{п1})^{A_{cp1}}$ , где  $P_{п}$  – вероятность поражения цели числом антиракет, равным  $A_{cp1}$ . Вероятность того, что ровно  $N$  головных частей не будут уничтожены, т.е. преодолению рубежи перехвата ПРО с применением только ложных целей, определится выражением  $P_{про,лц} = C_{\Gamma}^N (1 - P_{\Gamma} P_{п})^N (P_{\Gamma} P_{п})^{\Gamma-N}$ .

Математическое ожидание числа непораженных ГЧ составит:

$$S = \sum_{N=0}^{\Gamma} N P_{про,лц} = \Gamma (1 - P_{\Gamma} P_{п}),$$

где  $(1 - P_{\Gamma} P_{\Pi})$  – вероятность того, что любая из рассматриваемых ГЧ не будет уничтожена.

При маскировке ГЧ активными радиопомехами необходимо говорить об информационном ущербе, наносимом системе ПРО, мерой которого является переменный во времени объем (или площадь) пространства вдоль баллистической траектории, замаскированный активными помехами от радиолокационного наблюдения. Это соответствует указанной выше вероятности подавления РЛС, т.е. вероятности обеспечения требуемого коэффициента подавления РЛС или превышения отношения сигнал/шум на входе приемника для заданного сокращения дальности действия РЛС. Под коэффициентом подавления понимают тогда величину отношения мощностей помехи и полезного сигнала, при которой имеет место заданный информационный ущерб, характеризующийся, например, областью неопределенности по дальности и угловым координатам.

Вероятность эффективного воздействия активных помех на РЛС определяется рядом тактических и технических условий и может быть

представлена в виде  $P_{\text{про,ап}} = \prod_{j=1}^n P_j$  при  $n=5$ , где  $P_1$  – вероят-

ность правильного определения частотного диапазона РЛС;  $P_2$  – фактический уровень эксплуатационной надежности работы станций радиопомех;  $P_3$  – вероятность аппаратурной реализации технических характеристик станций радиопомех (чувствительность и быстродействие приемника, ширина спектра помех, длительность помехового импульса, мощность передатчика);  $P_4$  – вероятность наведения помехи по направлению на РЛС;  $P_5$  – вероятность наведения помехи по частоте.

Размеры зоны поражения, в которой возможен своевременный перехват ГЧ (рис. 11.6), зависят от предельно допустимого рубежа перехвата, местоположения батарей антиракет, рубежа обнаружения целей радиолокаторами и параметров траектории движения баллистической цели.

Допустим, что в распоряжении системы ПРО объекта имеется некоторое количество антиракет, базирующихся в нескольких местах. Зоны возможных перехватов баллистических целей с каждого места базирования антиракет могут перекрывать друг друга.

Обозначим вероятность попадания любой ГЧ в области, где она может быть перехвачена любой ГЧ, в область, где она может быть

перехвачена  $j$ -й батареей (с разных мест базирования) соответственно  $P_{nj}$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ). Тогда среднее число батарей антиракет, которые

могут осуществить перехват,  $K_{cp} = \sum_{j=1}^k P_{nj} j$ .

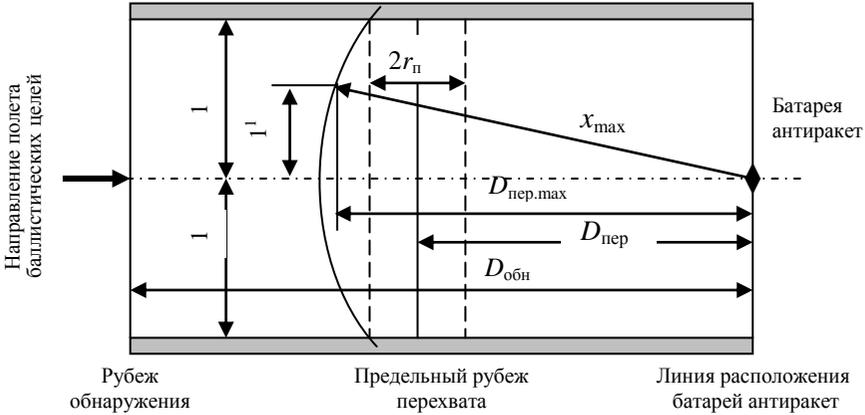


Рис. 11.6. Схема зоны перехвата

Если каждая батарея содержит  $n_j$  антиракет, то среднее число антиракет, приходящихся на каждую опасную цель, составит:

$$A_{cp} = \sum_{j=1}^k P_{nj} j n_j / (P_{\Gamma} \Gamma + P_{\Delta} \Delta), \quad \text{где } \sum_{j=1}^k P_{nj} j n_j = A_{cp}.$$

Средняя вероятность перехвата каждой из числа опасных ГЧ при стрельбе  $K_{cp}$  батарей антиракет:  $P_k = 1 - \exp[-A_{cp} \ln(1 - P_{k1})]$ .

Величина  $K_{cp}$  может быть оценена из конкретной тактической ситуации налета, характеризуемой зоной перехвата цели. Показатель  $P_{k1}$  зависит от различных свойств АР и ГЧ (стойкости ГЧ к действию поражающих факторов боеголовки антиракеты, совершает ГЧ противоракетный маневр или нет и т.п.).

Из рис. 11.6 видно, что ширина зоны, в которой возможен перехват ГЧ, движущейся по баллистической траектории без маневра, должна удовлетворять условию равенства времени полета цели от

рубежа обнаружения до рубежа перехвата сумме интервалов времени, затрачиваемых системой ПРО на все операции обнаружения, распознавания и т.п., вплоть до расчетной точки встречи:

$$l = \sqrt{\left(\frac{v_{AP}^2}{v_{ц}^2}\right) \left(D_{обн} - D_{пер} - v_{ц} t_p\right)^2 - D_{пер}^2}, \text{ где } v_{ц}, v_{AP} - \text{средние}$$

скорости цели и антиракеты;  $D_{пер}$  – дальность предельного рубежа перехвата;  $D_{обн}$  – дальность рубежа обнаружения цели;  $t_p$  – промежуток времени от момента обнаружения цели до принятия решения на пуск антиракеты (или до пуска антиракеты).

Вероятность  $P_k$  в общем случае определится двумя составляющими: точностью вывода антиракеты в окрестности перехватываемой ГЧ и радиусом поражения АР, зависящим от защищенности ГЧ от действия осколочного поля или ядерного взрыва.

При использовании в антиракете ядерного заряда основными поражающими факторами для ГЧ будут нейтронное излучение, гамма-лучи, ударная волна (при взрыве в атмосфере). При использовании антиракеты в качестве кинетического оружия при наличии промаха и срабатывании БКВУ поражающими факторами будут осколочное действие и действие продуктов детонации ВВ. Если ГЧ неядерная, то радиус поражения мал (не более 20 м).

Нейтроны, проникая через теплозащитное покрытие, корпус ГЧ в оболочку ядерного боезаряда, вызывают расщепление атомных ядер с выделением большого количества тепла. Происходит полный захват нейтронов ядрами боезаряда ГЧ. При этом ядерный заряд ГЧ может расплавиться, потерять форму и не взорваться [6].

Радиус поражения нейтронным излучением зависит от конструкции ГЧ МБР и мощности заряда антиракеты. Для поражения ГЧ нейтронным излучением промах АР может быть достаточно мал. При ядерном взрыве, температура которого составляет несколько миллионов градусов, плотность энергии излучения составляет  $10^{14} \dots 10^{15}$  эрг/см<sup>2</sup>, около 80% суммарной энергии выделяется в виде энергии гамма-лучей, особенно при взрыве зарядов мегатонного класса. Интенсивное воздействие гамма-лучей на ГЧ может вызвать сублимацию теплозащитного покрытия за очень короткий промежуток времени, что может разрушить оболочку ГЧ и даже ее внутреннюю конструкцию. Действие гамма-лучей особенно эффективно в верхних слоях атмосферы, где отсутствует их поглощение молекулами воздуха. Радиус поражения ГЧ для заряда мегатонного класса вне атмосферы может достигать десятка километров.

Существует несколько способов поражения ГЧ с помощью гамма-излучения:

- облучение ГЧ, в результате чего внутри нее высвобождаются вторичные рентгеновские лучи, способные вывести из строя бортовую электронную аппаратуру наведения ГЧ и подрыв ее боезаряда;
- поглощение рентгеновских лучей теплозащитным покрытием, вызывающее сгорание покрытия ГЧ до входа в атмосферу;
- использование гамма-лучей для вызова преждевременного подрыва ГЧ.

Импульсное рентгеновское излучение, проникая в глубь материала, вызывает чрезвычайно быстрое накопление в нем внешней энергии, в результате чего он взрывается.

Наиболее эффективными поглотителями рентгеновского излучения являются материалы, имеющие высокое атомное число, такие как золото, серебро и другие, используемые в бортовых электронных устройствах МБР. ТЗП не защищают ГЧ от воздействия рентгеновского излучения. Степень этого воздействия зависит от мощности и высоты подрыва заряда.

Третий поражающий фактор – ударная волна – будет действовать лишь в плотных слоях атмосферы. ГЧ при входе в атмосферу тормозится с ускорением до 100g. При близком ядерном взрыве замедление может быть в несколько раз больше.

Величину  $R_{\Pi}$  можно найти из выражения для экспозиционной дозы гамма-излучения (осколочного и захватного) и потока нейтронов при взрыве в атмосфере:  $D_{\text{эi}} \approx k_1 \frac{q}{R_{\Pi}^2} \exp\left(-\frac{R_{\Pi} \bar{\rho}}{B_{\text{эфф}}}\right)$ , где  $k_i$  – коэффициент

радиоактивного излучения, учитывающий энергию взрыва (табл. 11.3);  $q$  – мощность заряда боеголовки;  $\bar{\rho} = \rho_0 / \rho$  – относительная плотность воздуха;  $B_{\text{эфф}}$  – эффективная длина поглощения энергии, т.е. расстояние ослабления дозы проникающей радиации (табл. 11.3).

Таблица 11.3

Поражающий фактор	$k_i 10^{-6}$	$B_{\text{эфф}}, \text{ м}$
Осколочное гамма-излучение, рад	$1,4 \frac{\text{рад} \cdot \text{км}^2}{\text{Мг}}$	300
Захватное гамма-излучение, рад	$0,5 \frac{\text{рад} \cdot \text{км}^2}{\text{Мг}}$	410
Поток нейтронов, нейтрон/см <sup>2</sup>	$7,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{нейтрон} \cdot \text{км}^2}{\text{см}^2 \cdot \text{Мг}}; 13,5 \frac{\text{рад} \cdot \text{км}^2}{\text{Мг}}$	170

При перехвате целей на высотах более 50 км можно пренебречь ослабляющим действием атмосферы, тогда  $D_3 \cong k m_q G_{\text{БЧ}} / R_{\text{п}}^2$ , где  $m_q G_{\text{БЧ}} = Q_{\text{БЧ}}$  – эквивалентная мощность заряда боеголовки;  $m_q$  – удельная мощность заряда;  $G_{\text{БЧ}}$  – вес БЧ;  $k = 15,4 \cdot 10^6$  (рад·км<sup>2</sup>)/Мт – приведенный коэффициент суммарной дозы радиоактивного излучения. Отсюда  $R_{\text{п}} = \sqrt{k m_q G_{\text{БЧ}} / D_3}$ .

Учитывая опасные последствия ядерного воздействия на атаковую БГ для окружающей среды, военные обратили внимание на такой вид оружия, как кинетическое. Основная его идея заключалась в обеспечении прямого столкновения двух тел: перехватчика и БГ. Поражение БГ в этом случае осуществляется лобовым тараном на встречном курсе. На внеатмосферном участке траектории скорости перехватчика и БГ лежат в пределах 6...10 и 5...7 км/с соответственно. При относительной скорости встречи 11...17 км/с кинетическая энергия удара составляет около 1 т в тротиловом эквиваленте. Этого достаточно, чтобы полностью уничтожить боевой блок любой мыслимой конструкции.

Так, в 1963 г. МО СССР приняло решение о развертывании работ по созданию средства борьбы с космическими объектами. В Коломенском КБМ был разработан и доведен до стендовых испытаний реактивный самонаводящийся снаряд-гироскоп для пилотируемого спутника-перехватчика (рис. 11.7), получивший название «Шарик», который рассматривался как эффективное средство борьбы с космическими объектами.



Рис. 11.7. Модель реактивного самонаводящегося снаряда-гироскопа для пилотируемого спутника-перехватчика

В «Шарике» была применена конструктивная схема самонаводящегося снаряда-гироскопа, представляющего собой следящую гириголовку с одноканальной газодинамической коррекцией, что позволило обеспечить требуемые габариты, а за счет этого – высокую чувствительность и необходимую дальность действия. При этом углы пеленга снаряда были ничем не ограничены, что позволяло атаковать цель на попутно-пересекающихся и встречно-пересекающихся орбитах при любых углах между их плоскостями.

Для перехвата космических целей было решено применять пассивные оптические средства, использующие отраженный от цели солнечный свет. За счет релейного управления вращающимся снарядом и высокого быстродействия системы управления угловыми движениями и центром масс удалось обеспечить необходимую точность попадания в цель.

Конструктивно снаряд состоял из двух частей: снаряда-гироскопа и отделяемой ДУ.

В США рекламируются два проекта перехватчиков: GMD (Ground-based Midcourse Defense) (рис. 11.8) и MKV (Multi-Object Kill Vehicle) (рис. 11.9).

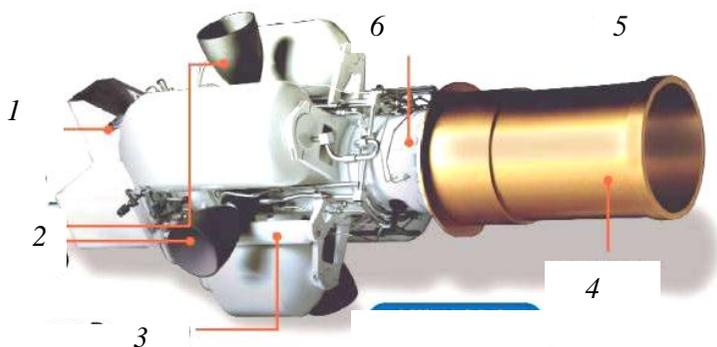


Рис. 11.8. Конструктивно-компоновочная схема боевой ступени ПР GMD: 1 – система контроля высоты; 2 – сопла ДУ; 3 – емкость с азотом; 4 – чувствительное к солнечным лучам покрытие; 5 – оптический сенсор; 6 – корпус

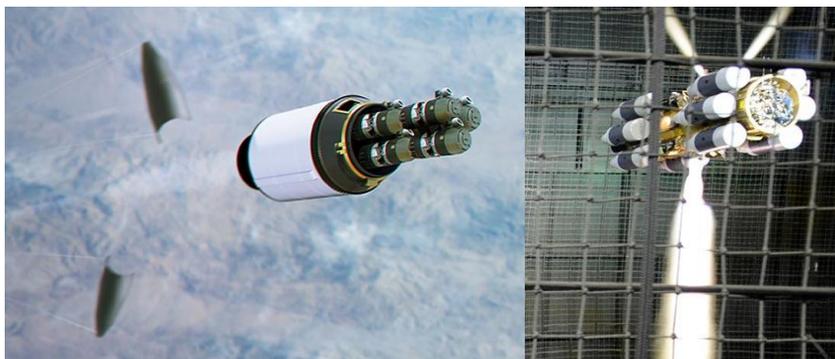


Рис. 11.9. Возможная концепция проекта MKV

Многоцелевой аппарат-перехватчик ((Multiple Kill Vehicle, MKV) предназначен для перехвата баллистических ракет, спутников и космических кораблей. Каждая из противоракет способна нести несколько боеголовок для поражения МБР с РГЧ.

MKV – 64-килограммовый снаряд – выводится противоракетой в космическое пространство, где осуществляет перехват и контактное поражение вражеской БГ благодаря электронно-оптической системе наведения, защищённой от посторонней засветки специальным кожухом и автоматическими фильтрами. Перехватчик получает целеуказание с наземных радаров, устанавливает сенсорный контакт с БГ и наводится на неё, маневрируя в космическом пространстве с помощью ракетных двигателей. Поражение БГ осуществляется лобовым тараном на встречном курсе.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Перечислите факторы, определяющие размеры зоны поражения ГЧ БР.
2. Чем определяется максимальная пропускная способность системы ПРО?
3. Как оценить вероятность прорыва ГЧ, оснащённую устройствами помех, через систему ПРО?
4. Что используется в качестве показателей технической эффективности защиты ГЧ?
5. От чего зависит вероятность правильного распознавания целей системой ПРО?
6. Чем качественно различаются режимы одновременного и последовательного распознавания целей?

7. Как оценить вероятность правильного распознавания ГЧ системой ПРО в режиме одновременного распознавания?
8. Как оценить вероятность правильного распознавания ГЧ системой ПРО в режиме последовательного распознавания?
9. Как оценить правильную классификация всех ГЧ?
10. Какое число ГЧ будет обстреляно и сколько антиракет будет израсходовано на одну ГЧ стороной, планирующей удар?
11. Как оценить среднее число антиракет, необходимых для обстрела каждой из опасных целей?
12. Чему равно ожидаемое число истинных целей, не подвергшихся обстрелу?
13. Как оценить вероятность прорыва головных частей через систему ПРО с применением только ложных целей?
14. Чему равно математическое ожидание числа непораженных ГЧ?
15. Как оценить вероятность эффективной защиты ГЧ активными помехами?
16. Чем определяются размеры зоны поражения, в которой возможен своевременный перехват ГЧ?
17. Как оценить среднее число батарей антиракет, которые могут осуществить перехват ГЧ?
18. Как оценить среднее число антиракет, приходящихся на каждую опасную цель?
19. Чему равна средняя вероятность перехвата каждой из числа опасных ГЧ?
20. Как определить ширину зоны, в которой возможен перехват ГЧ?
21. Перечислите основные поражающие факторы для ГЧ в случае использования в антиракете ядерного заряда.
22. Какова идеология использования АР как кинетического оружия?

## **12. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРЕЛЬБЫ ЗЕНИТНЫМИ РАКЕТАМИ**

### **12.1. Характеристики системы ПВО**

Основные характеристики системы ПВО приведены в разд. 11, здесь остановимся на её особенностях.

Целями войсковых ЗУР являются различные СВН: самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, тактические баллистические и крылатые

ракеты, противокорабельные КР, беспилотные ЛА, целями ЗУР ПВО страны – ГЧ межконтинентальных баллистических ракет.

Зенитные управляемые ракеты (ЗУР) по принципу действия боевой части (БЧ) разделяются на два основных класса: ЗУР прямого попадания в цель и ЗУР, поражающие цель на промахе.

Боевые части ЗУР, поражающих цель на промахах, все без исключения являются осколочными. Поражение цели осуществляется высокоскоростным потоком большого числа однотипных инертных поражающих элементов (ПЭ), метаемых взрывом заряда бризантного ВВ, причем ПЭ могут представлять осколки как естественного дробления, так и заданного, а также готовые поражающие элементы (ГПЭ).

При малых промахах поражение цели возможно продуктами детонации, ударной волной на высотах 17...20 км и осколками.

Дальняя и верхняя границы зоны поражения рассчитываются применительно к заданной скорости движения цели. Для определения дальней границы зоны поражения  $C$  (рис. 12.1) необходимо сравнить располагаемую и суммарную потребные перегрузки.

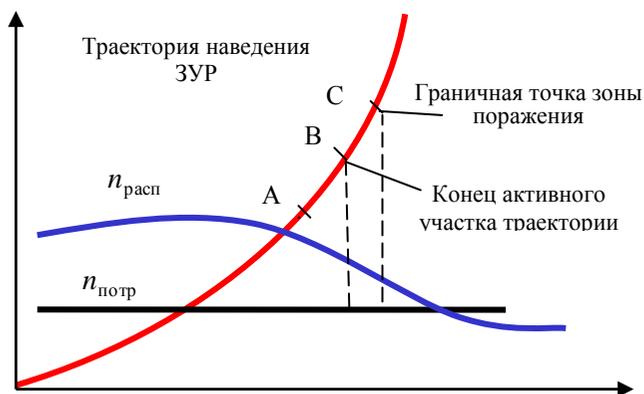


Рис. 12.1. Определение границ зоны поражения системы ПВО

Основные участки траектории полета ЗУР, определяющие положение ближней границы зоны поражения:

- участок неуправляемого полета ракеты (начальный участок);
- участок вывода ракеты на заданную траекторию (участок отработки начального рассогласования);
- участок наведения.

Точка *C* – дальняя граница зоны поражения. Основные факторы, определяющие положение верхней и дальней границ зоны поражения:

- соотношения потребных и располагаемых перегрузок;
- закон изменения скорости полета ракеты.

Построение верхней и дальней границы зоны поражения связано с расчетом семейства траекторий наведения при задаваемых параметрах движения цели и метода наведения ракеты.

Задача упрощается, если принимаются соответствующие допущения:

- цель движется горизонтально с постоянной скоростью на заданной высоте, не маневрируя (см. рис. 11.1);
- скорость ракеты постоянна или меняется по линейному закону;
- время работы двигателя задано;
- кривизна траектории движения ракеты определяется радиусом (задается);
- потребные перегрузки задаются.

Основные факторы, определяющие положение нижней границ зоны поражения:

- конструктивные особенности комплекса;
- характеристики метода наведения и системы управления ракеты;
- параметры неконтактного взрывателя.

Область пространства, при нахождении цели в которой в момент пуска ракеты встреча ракеты с целью состоится в зоне поражения, называется зоной пуска. Границы зоны пуска определяются следующим условием: полетное время ракеты до точки встречи равно времени, потребному цели для выхода за границы зоны поражения путем резкого маневра.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Чем принципиально различаются системы ПВО и ПРО?
2. Перечислите основные участки траектории полета ЗУР
3. Перечислите основные факторы, определяющие положение верхней границы зоны поражения.
4. Перечислите основные факторы, определяющие положение дальней границы зоны поражения.
5. Чем определяется положение ближней границы зоны поражения?
6. Чем определяются границы зоны пуска?

## 12.2. Модели функционирования ЗРК

Рассмотрим две из возможных схем налета: эшелонированный налет (рис. 12.2, 12.3) и звездный (рис. 12.4).

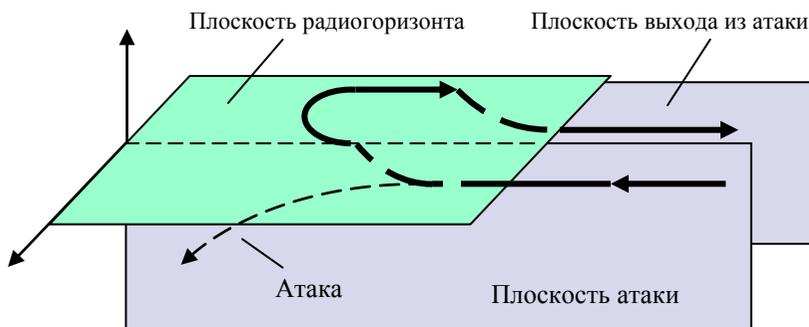


Рис. 12.2. Упрощенное представление эшелонированного налета

На рис. 12.3 группа «1» – группа носителей ВТО, группа «2» – группа подавления ПВО охраняемого объекта, состав группы – самолеты, вооруженные противорадиолокационными ракетами (ПРР), группа «3» – самолеты дальнего радиолокационного обеспечения и постановки помех. Плоскость  $DOt$  отображает положение СВН во времени;  $0$  – момент нанесения удара средствами ВТО; плоскость  $DOH$  – типовые траектории (эшелоны движения СВН во взаимосвязи с линией радиогоризонта РЛС обороны);  $N$  – численность СВН, участвующих в операции по дальности и во времени; пунктир – скорость СВН. Точки  $a, b, в$  – моменты выхода СВН из-под радиолокационного горизонта и ухода за горизонт (нижние и верхние соответственно), точки пуска ВТО и ПРР –  $M$  и  $S$  – точки «размножения», когда лавинообразно увеличивается число СВН.

Второй вариант налета – «звездный» налет (рис. 12.4). Согласованные удары по объекту наносятся с разных сторон. В налете участвуют шесть групп СВН. Тактика действия самолетов ударных групп состоит в полете на предельно малых высотах с крейсерской скоростью, нанесение удара и выход с разворотом на  $180^\circ$ .

В обоих случаях строится пространственно-временная диаграмма движения ВТО и аналогичная диаграмма работы СВН.

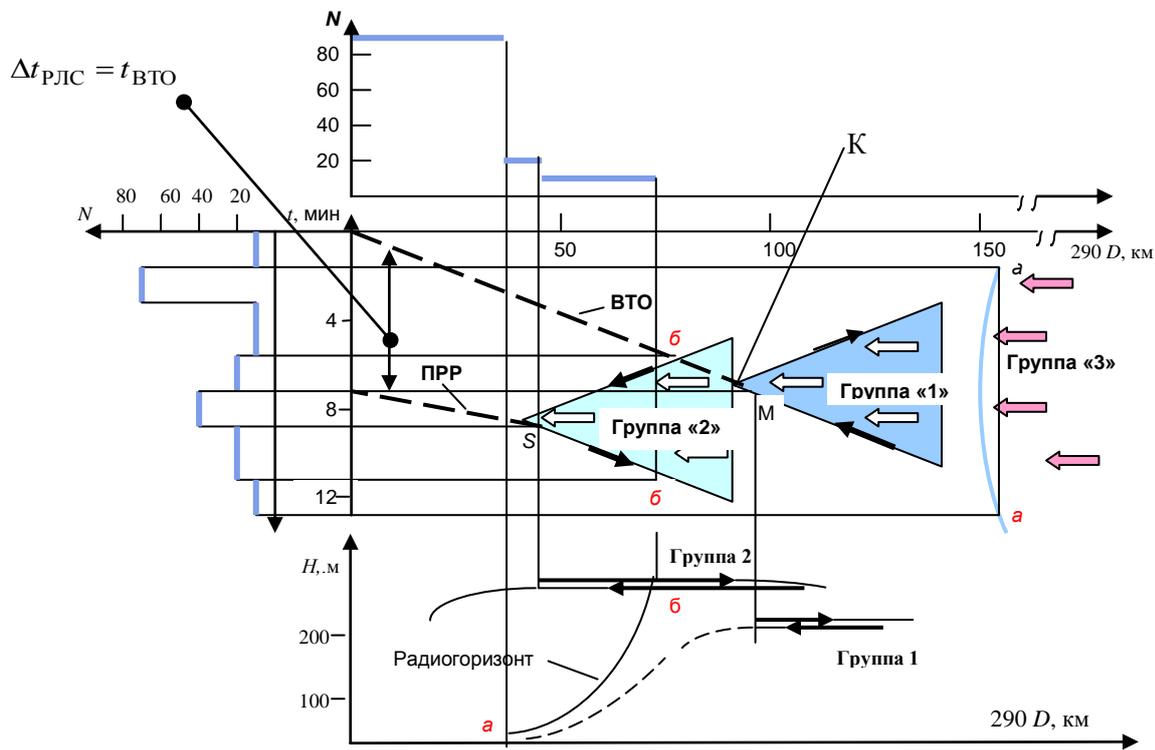


Рис. 12.3. Схема эшелонированного налета, подлежащая моделированию

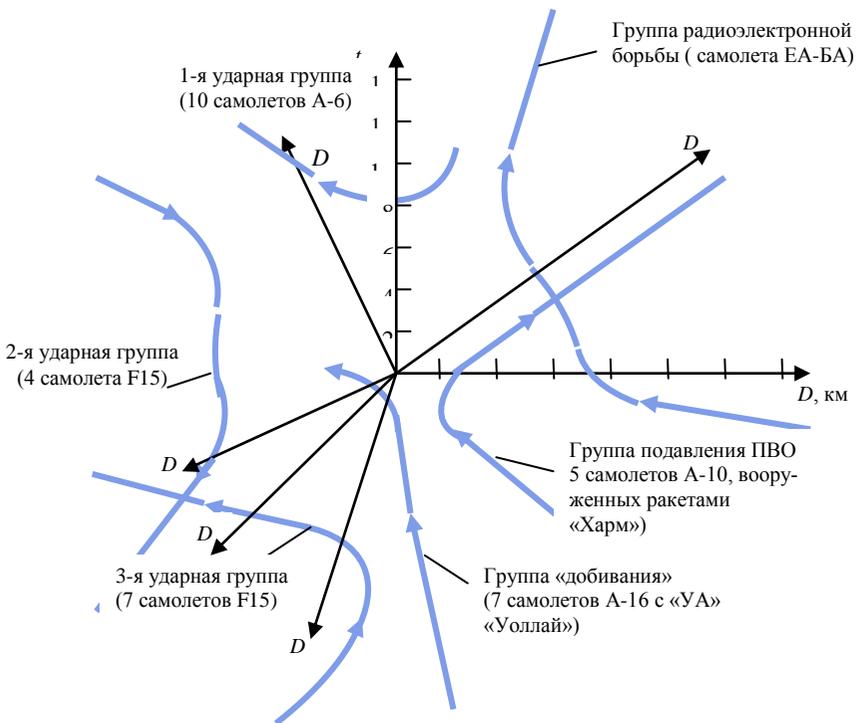


Рис. 12.4. Схема звездного налета

Планирование операции – это количественное описание конкретного сценария налета СВН и схемы его отражения, включающее в себя:

- перечень групп СВН, их состав по типам и количеству боевых средств;
- высоты и скорости полета групп к поражаемому объекту, траектории полета при выходе из атаки;
- вооружение самолетов-носителей (тип и количество средств поражения);
- дальность и высоту полета СВН;
- пространственно-временные параметры СВН, взаимодействие групп по времени и месту.

Примерный алгоритм построения плана налета СВН в координатах «дальность–время» (см. рис. 12.3).

1. Для группы «1» определяющей является точка пуска ВТО – «М». Координаты этой точки –  $D_{ВТО}$ ,  $t_{ВТО}$ , время выхода из виража  $t_{в.вир} = t_{вир} - t_{ВТО}$ , время полета ВТО  $t_{ВТО} = D_{ВТО}/V_{ВТО}$ .

Допущение: скорость носителей ВТО постоянна; после пуска ВТО носители совершают вираж и уходят от цели с максимальной скоростью. Тогда максимальный угол разворота носителей после пуска  $\varphi = 2\arctg(D_{ВТО}/R)$ , где  $R$  – радиус разворота;  $R = v_{н.ВТО}^2/(ng)$ .

Время, затрачиваемое носителем на разворот,  $t_{вир} = (\varphi R)/v_{н.ВТО} = (\varphi v_{н.ВТО})/(ng)$ . Минимальная дальность до цели

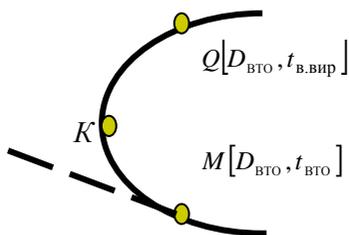


Рис. 12.5. Траектория полета ударной группы

в момент времени  $t = 0,5t_{вир} - t_{ВТО}$

$D_{\min} = \sqrt{R^2 + D_{ВТО}^2} - R$ . Координаты точки  $K$  –  $[D_{\min}, t]$ , время выхода из виража  $t = t_{вир} - t_{ВТО}$ , координаты точки  $Q$  –  $Q[D_{ВТО}, t_{в.вир}]$ .

Траектория полета ударной группы показана на рис. 12.5.

2. Группа 2. Сдвиг по времени, обеспечивающий подавление РЛС противника, предшествующий нанесению удара, –  $\Delta t_{РЛС} = \Delta t_{ВТО}$ , время полета группы 2  $t_{ппр} = D_{ппр}/V_{ппр}$ .

Основные задачи группы 3 – собрать информацию о боевой обстановке в районе объекта нанесения удара и о результатах удара; обеспечить радиолокационное прикрытие ударным группам (определить частоты, поставить помехи).

Пусть  $\Delta t_{упр}$  – начало времени барражирования и управления до момента пуска ПРР группой подавления РЛС ПВО объекта;  $\Delta t_{сб.инф}$  – время окончания после нанесения удара. Общее время барражирования  $t_{бар} = \Delta t_{упр} + \Delta t_{сб.инф} + t_{ВТО} + t_{ппр} + t_{н.ппр}$ .

Координаты точки начала барражирования и постановки помех и точки выхода –  $[D_{бар} - (\Delta t_{упр} + \Delta t_{сб.инф} + t_{ВТО} + t_{н.ппр}) v_{н.ппр}]$ ;  $D_{бар}, \Delta t_{сб.инф}$ .

Решаемая задача системы ПВО (схема 1) – отразить налет. Можно рассматривать два варианта:

1) поразить цели ударной группы 1, самолеты подавления средств ПВО, самолеты разведки управления и радиоэлектронной борьбы до пуска ВТО;

2) работать на два фронта, если пуск ВТО состоялся (по самолетам и по ВТО).

Особенности налета: РЛС ПВО обнаруживают самолеты-носители, когда те выходят из-под линии радиогоризонта  $D_{\text{РЛС}} = 113[\sqrt{H} + \sqrt{h}]$ , следовательно, пуск средств поражения должен производиться из-под этой линии и высота пуска ВТО выбирается из условия  $H_{\text{гр.1}} \leq [D_{\text{ВТО}}/113 - \sqrt{h}]^2$ .

Траектория полета группы подавления РЛС (группа 2) тоже проходит под линией визирования, и после получения информации от группы управления и постановки помех (группы 3) группа 2 набирает высоту, выходит из-под линии радиогоризонта и производит пуск ракет. Таким образом, только группа 3 все время находится над линией радиогоризонта.

Строятся пространственно-временные диаграммы параметров пилотируемых средств, участвующих в налете, находящихся в зоне видимости РЛС объекта, на которые отображаются случаи обстрела самолетов носителей до и после пуска ПРП, случай обстрела самолетов носителей только после пуска ПРП.

Высота полета (барражирования) группы 3 должна удовлетворять условию  $H_{\text{гр.2}} \geq (D_{\text{ВТО}}/113)^2$ .

3. Интенсивность потока воздушных целей определим на примере группы 2 (рис. 12.6).

По заданной высоте полета группы 2 найдем дальность прямой видимости:  $D_{\text{гр2}} = 113(\sqrt{H} + \sqrt{h})$ . Точки б-б определяют моменты времени выхода группы из-под линии радиогоризонта и ухода за него.

Время пребывания группы 2 в зоне прямой радиолокационной видимости  $t_{\text{гр.2}} = t_{\text{max гр.2}} - t_{\text{min гр.2}}$ . Минимальное расстояние группы 2 до объекта  $D_{\text{min гр.2}}$ . Диапазон изменения дальностей

$$\Delta D_{\text{гр.2}} = D_{\text{пр.в.гр.2}} - D_{\text{min гр.2}}$$

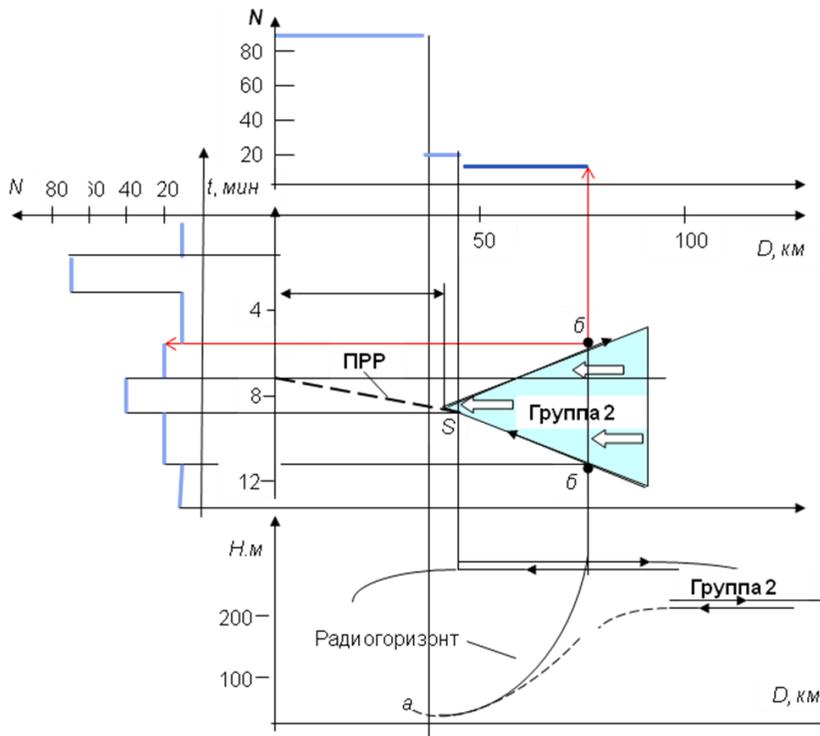


Рис. 12.6. Схема налета группы 2

4. Рассчитываем:

- дальность прямой видимости:  $D_{\text{пр. в. гр.2}} = 113(\sqrt{H_{\text{гр.2}}} + \sqrt{h})$ ;

- минимальную дальность группы носителей с учетом выража:

$$D_{\text{min}} = \sqrt{R^2 + D_{\text{ВТО}}^2} - R;$$

- диапазон дальностей «видимого» полета группы:

$$\Delta D_{\text{гр.2}} = D_{\text{пр.в.гр.2}} - D_{\text{min гр.2}};$$

- сдвиг по времени по отношению к удару ВТО:

$$t_{\text{ВТО}} = D_{\text{ВТО}}/v_{\text{ВТО}};$$

- время входа группы 2 в зону видимости (точка  $b$ ):

$$\begin{aligned} t_{\text{min гр.2}} &= t_{\text{ВТО}} + t_{\text{прр}} + t_{\text{н прр}} = \\ &= \left( D_{\text{ВТО}}/v_{\text{ВТО}} + D_{\text{прр}}/v_{\text{прр}} + (D_{\text{пр.в гр.2}} - D_{\text{прр}})/v_{\text{н прр}} \right); \end{aligned}$$

- время нахождения группы 2 в зоне видимости без учета времени на разворот:  $t_{гр.2} = 2\Delta D_{гр.2} / v_{н.прр}$  ;

- время выхода группы 2 из зоны видимости (точка б верхняя):  $t_{max гр.2} = t_{min гр.2} - t_{гр.2}$  .

5. Формируем полную группу событий (*A, B, C, D, E*) (рис. 12.7):

*A* – группа сохранила боеспособность, ВТО применено, результат достигнут;

*B* – группа сохранила боеспособность, ВТО применено, результат не достигнут;

*C* – группа сохранила боеспособность, ВТО не применено, результат не достигнут;

*D* – группа потеряла боеспособность, ВТО применено, результат достигнут;

*E* – группа потеряла боеспособность, ВТО не применено, результат не достигнут.

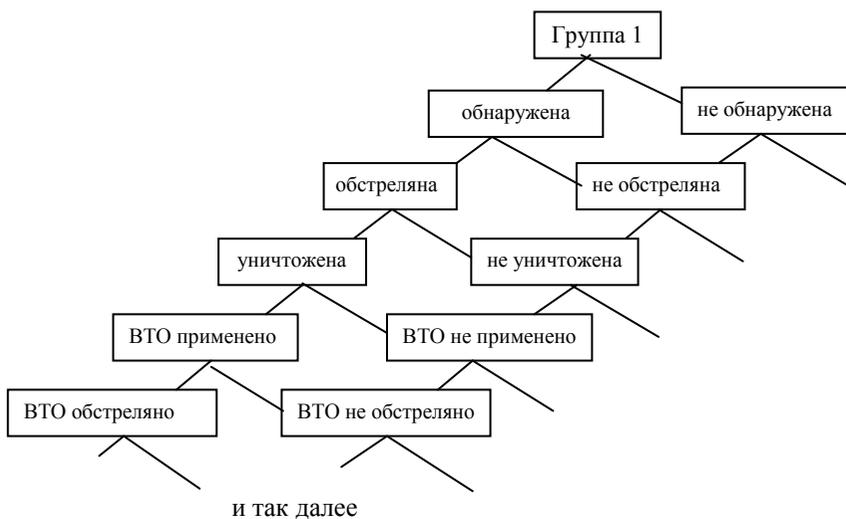


Рис. 12.7. Полная группа событий

6. Рассчитываем вероятности окончательных состояний группы 1 (*A, B, C, D, E*), используя правила расчета вероятностей (сложения и умножения), убеждаемся, что  $p(A) + p(B) + p(C) + p(D) + p(E) = 1$ .

7. Усложняем пример, задействовав группы 2 и 3.

8. Применяем знания, полученные при изучении дисциплины «Моделирование» (раздел «Теория массового обслуживания») для учета надежности системы при определении показателя эффективности работы системы ПВО, поскольку эта система является системой массового обслуживания.

Материал, который необходимо привлечь, чтобы учесть, что система ПВО может быть системой массового обслуживания:

- с дискретным состоянием и непрерывным временем;
- с отказами и с ожиданием,
- с чистым ожиданием и смешанного типа,
- с привилегиями, разомкнутые и замкнутые.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Дайте определение располагаемой и суммарной потребных перегрузок.
2. Чем определяется кривизна траектории движения ракеты?
3. Чем различаются эшелонированный и звездный налеты СВН?
4. Что такое радиогоризонт и чем он характеризуется?
5. Какова последовательность функционирования СВН при реализации эшелонированного налета?
6. Какой смысл Вы видите в подробном исследовании последовательности функционирования СВН?
7. Что необходимо учесть в сценарии эшелонированного налета при расчете вероятности успешного отражения атаки СВН?
8. Какие задачи может решать система ПВО при отражении эшелонированного налета?
9. В чем суть построения пространственно-временных диаграмм параметров пилотируемых средств, участвующих в налете?
10. Какова последовательность расчетов, необходимых для оценки эффективности работы системы ПВО?

### **12.3. Поражающее действие БЧ ЗУР**

Осколочные боевые части (ОБЧ) ЗУР подразделяются по следующим признакам.

По типу цели:

- многоцелевые или универсальные (например, естественного дробления);
- специализированные (для поражения целей определенного класса);

- противотранспортные (небронированная техника  $m = 1 \dots 10$  г);

- противобронные (легкобронированная техника, сталь, 20 мм,  $m = 10 \dots 100$  г).

По конфигурации осколочного поля (рис. 12.8):

- ОБЧ с круговыми полями;
- ОБЧ с осевыми полями;
- ОБЧ с радиально-направленными полями.

По величине меридионального угла поля различают:

- узкие поля ( $< 30^\circ$ );
- широкие поля ( $> 90^\circ$ ).

ОБЧ с круговыми полями являются наиболее распро-

страненными. Их главные преимущества – наиболее высокий коэффициент использования энергии ВВ, возможность расположения боевой части в любом месте ракеты и поражения цели при произвольной стороне промаха. Основной недостаток круговых ОБЧ, имеющих более или менее широкие поля, – низкая плотность осколочного поля (низкая плотность кинетической энергии осколков на единицу телесного угла поля), что уменьшает радиус поражения цели.

Малые углы разлета ( $5 \dots 10^\circ$ , осколочные поля типа «режущий диск») реализуются с помощью оболочки с вогнутой образующей, двухточечного инициирования на торцах заряда, многоточечного синхронного инициирования по оси заряда, создающего расходящуюся детонационную волну, близкую к цилиндрической. Большие углы разлета обычно достигаются приданием ОБЧ бочкообразной или, в предельном случае, сферической формы.

В БЧ ракет и реактивных снарядов с большими стартовыми перегрузками, как правило, применяются оболочки заданного дробления, осуществляемого с помощью рифления, использования навитой рифленой ленты, нанесения охрупченной сетки, например, с помощью электронно-лучевой или лазерной обработки и т.п. Для БЧ с относительно невысокими стартовыми перегрузками, в первую очередь БЧ ЗУР, широко применяется сборно-клееные оболочки с ГПЭ. ГПЭ в

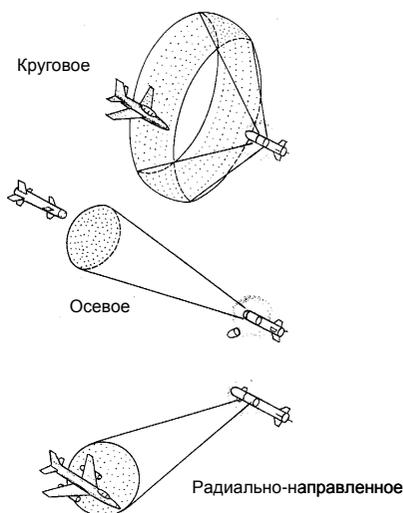


Рис. 12.8. Конфигурации осколочного поля

форме кубиков, цилиндров и др. изготавливаются из стали или тяжелых сплавов на основе вольфрама с плотностью 16...18 г/см<sup>3</sup>.

Реализация направленного действия ОБЧ с круговым полем может быть осуществлена с помощью доворота оси ОБЧ, с помощью изменяемой осесимметричной схемы инициирования или за счет предварительного осесимметричного деформирования ОБЧ (рис. 12.9).

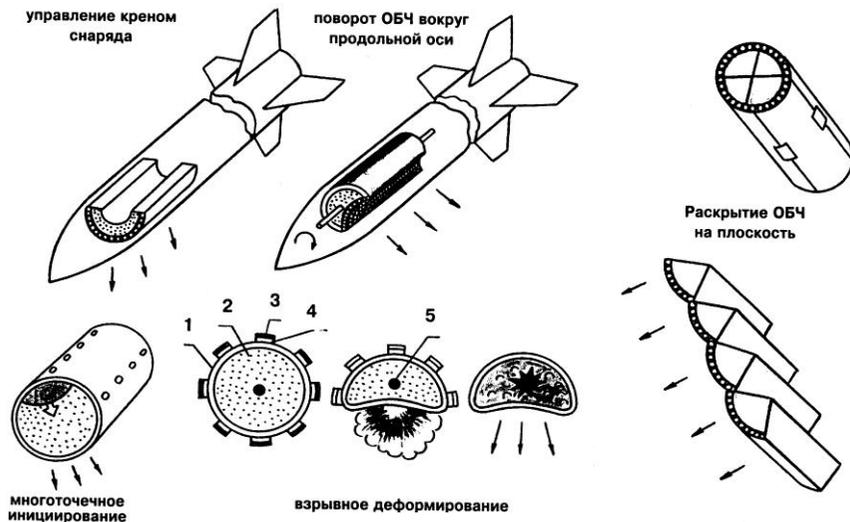


Рис. 12.9. Способы реализации радиально-направленного поля: 1 – оболочка; 2 – заряд пластического ВВ; 3 – деформирующий заряд; 4 – демпферы; 5 – основной детонатор

Отдельный класс ОБЧ с ГПЭ представляют стержневые боевые части ракет (рис. 12.10), предназначенные для действия по панелям летательных аппаратов. Основным элементом стержневой БЧ является набор стержней квадратного или круглого сечения, уложенных на поверхности заряда, как правило, под небольшим углом к его образующей. Стержни могут быть соединены (сварены) попеременно верхними или нижними концами либо не иметь связи друг с другом. При подрыве они разлетаются, образуя при связанных стержнях сплошное кольцо, а при несвязанных – прерывистое с перекрытием. Преимущество стержневых ПЭ перед обычными компактными ГПЭ заключается в нанесении сплошного разреза обшивки и силового набора, приводяще-

го к разрушению конструкции планера, т.е. поражению воздушной цели по классу «мгновенное разрушение цели в воздухе».

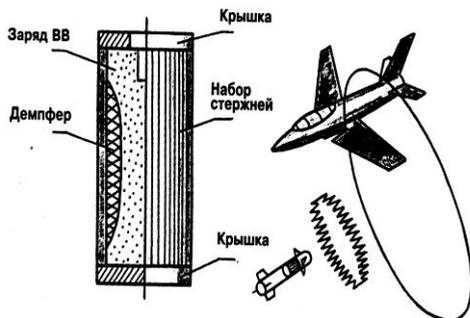


Рис. 12.10. Стержневая БЧ и схема ее действия

В конструкциях осколочно-стержневых боевых частей поверх набора стержней укладывается слой компактных готовых поражающих элементов. Боевая часть такой схемы применена в ЗУР 9М311, входящей в состав войскового зенитного ракетно-артиллерийского комплекса 2К22М «Тунгуска» и корабельного комплекса 3М87 «Каштан».

Недостаток БЧ ненаправленного действия – низкая плотность осколочного поля. Этого недостатка лишены БЧ направленного действия; направленность поля обеспечивается либо выбором формы поверхности БЧ (рис. 12.11), либо многоточечным инициированием (рис. 12.12, 12.13).

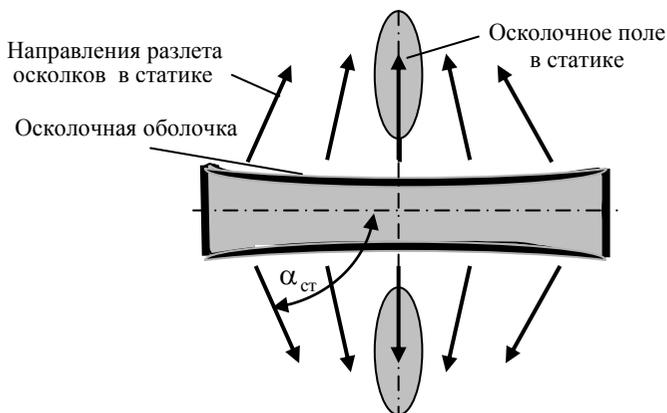


Рис. 12.11. Узкое поле, «режущий диск»

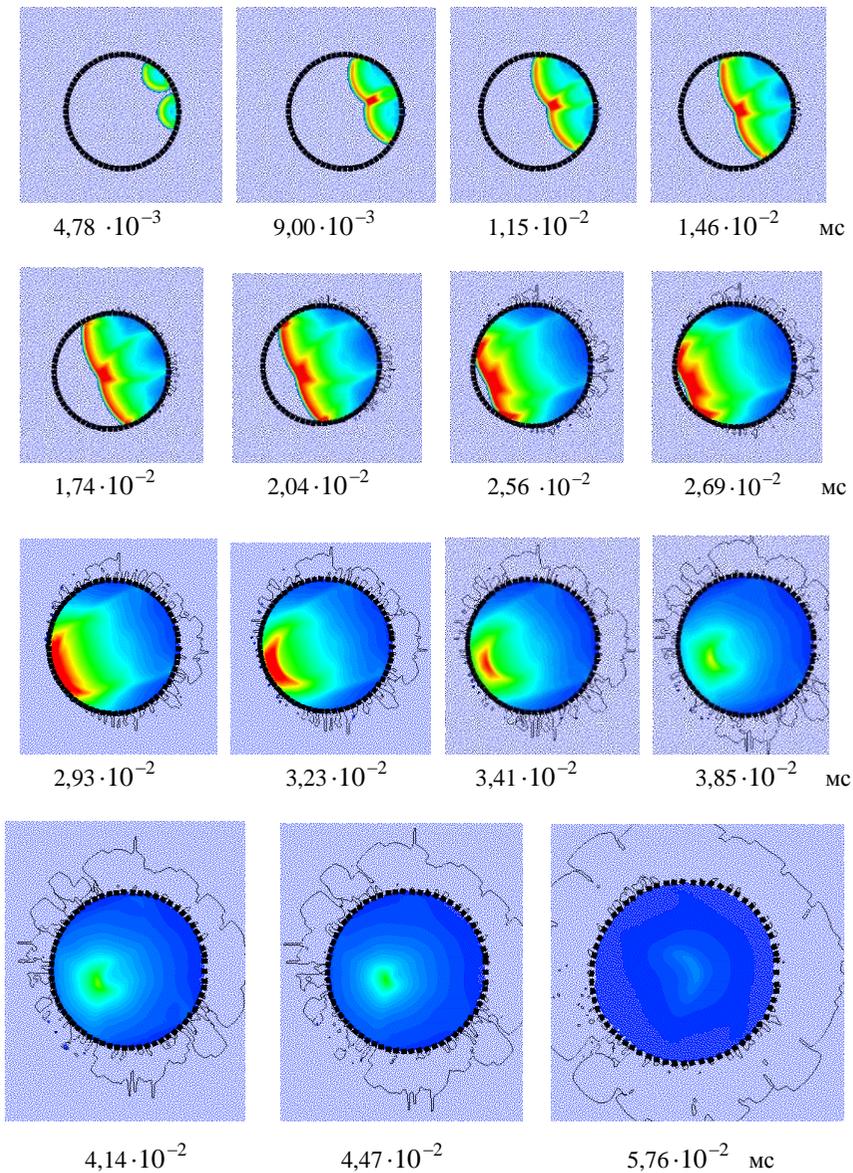


Рис. 12.12. Формирование детонационной волны при одновременном инициировании заряда двумя детонаторами, расположенными с шагом по углу в  $45^\circ$

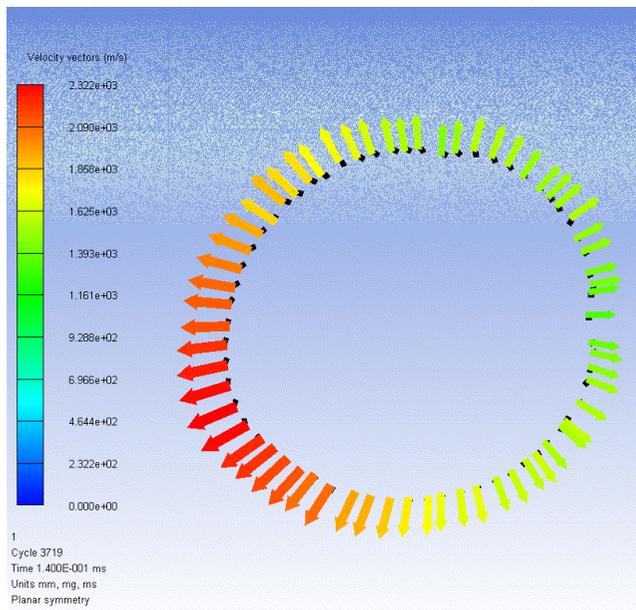


Рис. 12.13. Пример рассчитанных значений скоростей разлета ГПЭ на 0,14 мс при двухточечном расположении детонаторов с шагом по углу в 45°

Применение боевых частей направленного действия более целесообразно, так как при одной и той же массе БЧ можно получить большую плотность потока осколков в направлении цели. Однако подрыв такой боевой части должен осуществляться с учетом положения ракеты относительно цели.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Дайте классификацию осколочных боевых частей ЗУР.
2. Чем определяется поражающее действие ЗУР?
3. По каким признакам можно классифицировать осколочные боевые части ЗУР?
4. Какие факторы определяют параметры формируемого в пространстве осколочного поля при подрыве БЧ ЗУР?
5. Каким образом можно сформировать направленное осколочное поле?

## 12.4. Боевые части ЗУР с готовыми поражающими элементами

ЗУР и АУР могут применяться и не по своему основному назначению, например для поражения наземных или надводных целей.

При использовании ОБЧ на земле весомый вклад в поражающее действие вносит фугасное действие, в то время как при стрельбе по воздушным целям его эффект существенно ниже. Воздействия этих поражающих факторов можно считать независимыми, т.е. воздействие одного фактора не влекущим изменения результатов действия по цели другого и наоборот. Тогда вероятность поражения цели, в соответствии с координатным законом поражения цели, будет равна:

$$G(R) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - G_i(R)],$$
 где  $G_1(R)$  – вероятность поражения осколочным полем;  $G_2(R)$  – вероятность поражения ударной волной:  
$$G_2(R) = k(H)G_2(R).$$

Вероятность поражения цели зависит, с одной стороны, от типа цели, ее размеров, размеров её уязвимых частей (тела, отсеков, дополнительной защиты и т.п.), с другой – от характера действия самой БЧ: условий встречи с целью, плотности потока осколков на расстоянии  $R$  и количества ”убойных”, т.е. обладающих для поражения цели энергией. При этом уязвимость цели может характеризоваться повреждением и поражением. В первом случае цель может продолжить функционировать, хотя и с меньшей эффективностью, во втором – прекращает функционирование

Если говорят о плотности потока осколков (т.е. количестве осколков, приходящихся на единицу площади) в целом, то та часть их, которые не являются ”убойными”, может нанести цели повреждения. При стрельбе по воздушным целям или слабозащищенной наземной технике (самолеты на аэродроме) желательно обеспечивать равномерную плотность распределения ”убойных” осколков на накрываемой площади цели. Понятие ”убойный” не имеет смысла без привязки к конкретной цели: для живой силы это 2...4 г, для воздушной цели 10 г.

Рассмотрим сначала подход к боевым частям для слабозащищенной техники: самолетов, вертолетов, крылатых ракет, автоматических дрейфующих аэростатов, шаров, дронов и т.п.

Военные самолеты в зависимости от характера действия и предназначения подразделяются на бомбардировщики, истребители-

бомбардировщики, истребители, штурмовики, самолеты специального назначения (разведывательные, военно-транспортные, связи и др.).

Самолет любого типа состоит из фюзеляжа, шасси, крыльев, хвостового оперения, двигателя (двигателей), топливной и других систем обеспечения работы двигательной установки, систем управления самолетом, электро- и радиооборудованием и др. Боевая нагрузка бомбардировщика 15...30 т. В качестве основного оружия бомбардировщиков применяются крылатые ракеты "воздух-земля", располагаемые в отсеках вооружения или подвешиваемые под крылом. Истребители-бомбардировщики и штурмовики могут нести различные виды обычного и ядерного оружия. Экипаж бомбардировщика – 2...6 человек, пилотируемого самолета тактической авиации – 1...2 человека.

Топливная система современного самолета, как правило, оборудована средствами защиты от зажигательного действия осколков. Так, защита бензобаков изготавливается из пластического материала, затягивающего осколочные пробоины; свободное пространство баков заполняется инертным газом, в самолете используется автоматическое огнетушение и т.п.

Характерной особенностью вертолетов является наличие несущей винтовой системы, хвостового винта (у одновинтовых вертолетов) и трансмиссии. Эти элементы более уязвимы для воздействия боевых частей.

В борьбе с воздушными целями желаемыми результатами являются как отражение атаки, так и полное уничтожение цели. Эти результаты можно получить многими способами: вывести из строя экипаж самолета, разрушить фюзеляж и крылья, повредить моторы, органы управления, автопилот или уничтожить боевой груз.

Во многих случаях повреждение планера самолета (непосредственно или в результате взрыва боевого груза) приводит к полному уничтожению цели и, если это произошло, к полному отражению атаки противника. Повреждение моторов и связанной с ним системы питания топливом сокращает дальность полета самолета и увеличивает вероятность последующего уничтожения цели и отражения атаки. Повреждение системы управления и связи может иметь ряд последствий, в том числе и отражение атаки, если поврежден бомбосбрасыватель. Повреждение системы управления огнем, бомбовых прицелов и вывод из строя обслуживающих эти приборы членов экипажа не позволяют самолету эффективно использовать свой груз. Повреждение боевого груза, особенно если он взрывоопасен, приводит к уничтожению цели.

Отсеки, при попадании в которые имеют место последствия для воздушной цели, называются уязвимыми. Их можно разделить на две группы. К первой относятся отсеки, при попадании в которые цель поражается однозначно, ко второй – те, при попадании в которые осколков цель поражается, если набирается определенная комбинация этих отсеков. Если цель состоит из отсеков обеих групп, то может иметь место накопление ущерба. Осколки могут произвести механическое разрушение конструкции самолета или, пройдя через обшивку, поразить агрегаты, мотор и т.п.

Если плотность осколков достаточно высока, то аэродинамические нагрузки, действующие на конструкцию самолета, завершат его разрушение. Вероятность поражения конструкции будет определяться законом распределения толщины корпуса самолета, спроецированного на плоскость, перпендикулярную вектору относительной скорости разлета осколков. При этом, если стрельба идет по цели, расположенной на земле, необходимо в плотности потока осколков учесть составляющую от рикошета  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ , где  $\lambda_1$  – плотность потока осколков до рикошетирования,  $\lambda_2$  – после.

Вероятность поражения уязвимого отсека любой группы ( $A_i$ ) определяется как

$$P(A_i) = \sum_{m=0}^n G_i(m) P_i(m), \quad (12.1)$$

где  $P_i(A_i)$  – вероятность поражения отсека  $A_i$ ;  $P_i(m)$  – вероятность попадания в отсек  $m$  осколков;  $G_i(m)$  – вероятность поражения отсека при попадании в него  $m$  осколков;  $n$  – число осколков БЧ в данной области пространства. Вероятность попадания осколков в отсек есть функция площади проекции на плоскость, перпендикулярную вектору относительной скорости осколка, и плотности осколков на заданном расстоянии от точки взрыва.

Число осколков, попадающих в отдельные отсеки цели, распределяется по закону Пуассона, тогда

$$P_i(m) = \frac{(\lambda S_{отсi})^m}{m!} \exp(-\lambda S_{отсi}), \quad (12.2)$$

где  $\lambda$  – плотность осколков при заданном удалении от точки подрыва боевой части;  $S_{отсi}$  – площадь проекции отсека на плоскость, перпендикулярную направлению разлета осколков.

Вероятность поражения отсека при попадании в него осколков зависит от уязвимости отсека, скорости осколков при их встрече с преградой, массы и формы осколков, характера окружающей среды и т.д.:

$$G_i(m) = 1 - (1 - G_{i1})^m, \quad (12.3)$$

где  $G_{i1}(m)$  – вероятность поражения  $A_i$  отсека при попадании в него одного осколка.

Подставив формулы (12.2) и (12.3) в (13.1), получим

$$P(A_i) = \exp(-\lambda S_{\text{отс}i}) \left[ \sum_{m=0}^n \frac{(\lambda S_{\text{отс}i})^m}{m!} - \sum_{m=0}^n \frac{(\lambda S_{\text{отс}i})^m (1 - G_{i1})^m}{m!} \right]. \quad (12.4)$$

Учитывая, что

$$\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\lambda S_{\text{отс}i})^m}{m!} = \exp(\lambda S_{\text{отс}i}) \quad \text{и} \quad \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(\lambda S_{\text{отс}i})^m (1 - G_{i1})^m}{m!} = \exp[(\lambda S_{\text{отс}i})(1 - G_{i1})],$$

вероятность поражения отсека  $A_i$  можно представить зависимостью

$$P(A_i) = 1 - \exp(-\lambda S_{\text{отс}i} G_{i1}). \quad (12.5)$$

Используя понятие приведенной уязвимой площади отсека  $S_{\text{отс.уязв}i} = S_{\text{отс}i} G_{i1}$ , вероятность поражения отсека  $A_i$  при подрыве БЧ у цели может быть записана в виде

$$P(A_i) = 1 - \exp(-\lambda S_{\text{отс.уязв}i}). \quad (12.6)$$

Каждый уязвимый отсек (агрегат) составляет площадь  $S_{\text{отс.уязв}i}$ , а толщины всех отсеков меняются от  $h_{\text{min}}$  до  $h_{\text{max}}$ . Если разбить диапазон толщин на несколько интервалов с шагом  $\Delta h_i$ , то можно построить гистограмму  $\Delta S_{\text{отс.уязв}i}(S_{\text{ц}}, \Delta h_i)$  и соответствующую выравнивающую кривую плотности вероятности  $f(h)$  и функцию распределения  $F(h)$  эквивалентной толщины уязвимых отсеков цели. Величины  $S_{\text{ц}}$  и  $\Delta S_{\text{отс.уязв}i}$  в данном случае могут рассматриваться как конкретные реализации случайных величин, являющиеся неслучайными функциями случайных аргументов – расстояния до цели  $R$

угла  $\varphi$ , определяющего положение точки взрыва боевой части относительно цели. При известных  $f(h)$  и  $F(h, \varphi)$  площадь уязвимых отсеков  $S_{\text{ц}} = S(R, \varphi)F(h, \varphi)$ .

Для малоразмерных целей проекции цели  $S(R, \varphi)$  можно определить как по расстоянию, так и по направлению и принять средним значением  $S_{\text{ц ср}}$ . Зависимость  $F(h, \varphi)$  можно определить по углу  $\varphi$ . В таком случае функция уязвимости  $S_{\text{ц ср}} = S_{\text{ц}}F(h)$ .

Возможные законы распределения толщин цели (единичный, показательный, равномерный, нормальный) задаются, например, в виде

$$F(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h < h_i; \\ 1 - k_1 \exp[-k_2(h - h_i)] & \text{при } h \geq h_i; \end{cases}$$

$$f(h) = \begin{cases} 0 & \text{при } h < h_i; \\ k_1 k_2 \exp[-k_2(h - h_i)] & \text{при } h \geq h_i, \end{cases} \quad (12.7)$$

где  $k_1 = 1 - F_1$ ;  $k_2 = \ln\left(\frac{1 - F_1}{1 - F_2}\right) / (h_2 - h_1)$ ;  $h_1 = h_{\min}$ ;  $h_2 = h_{\max}$ ;  $F_1$  и  $F_2$  – значения  $F(h)$  в характерных точках. Вид функций  $f(h)$  и  $F(h, \varphi)$  можно определить, лишь зная конкретную цель. При этом необходимо учитывать направление вероятного подхода ракеты к цели.

Плотность потока осколков, направленных в сторону цели, зависит от начальной скорости их разлета  $v_p$ , скорости полета ракеты, ориентации ракеты относительно цели, расстояния между ракетой и целью и, конечно, от типа БЧ.

Зависимость для определения скорости разлета осколков можно получить из уравнения баланса энергии:

$$m_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}} = E_0 + E_{\text{ПВ}} + E_{\text{К}} + E_{\text{П}}, \quad (12.8)$$

где  $m_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}$  – энергия, выделившаяся при детонации ВВ;  $E_0 = (M_{\text{К}} v_p^2) / 2$  – энергия осколков;  $v_p$  – скорость разлета осколков;  $E_{\text{В}} = (M_{\text{В}} v_p^2) / 4$  – энергия продуктов взрыва (цифра 4 в знаменателе объясняется тем, что скорость продуктов детонации вдоль радиуса

изменяется от нуля на оси симметрии до  $V_p$  у внутренней поверхности корпуса, допускается ее линейное изменение в этих пределах);  $E_K, E_{II}$  – энергия, израсходованная на деформацию и разрушение корпуса боеприпаса и потери энергии соответственно,  $E_K + E_{II} = 0,1 m_B Q_B$ ;  $m_B$  – масса взрывчатого вещества;  $Q_B = D^2/16$  – теплота образования ВВ (энергия, выделяемая при взрыве единицы массы ВВ).

При принятых допущениях скорость разлета осколков  $V_p = 0,5 D \sqrt{\varphi_1 \alpha / (2 + \alpha/\varphi)}$ , где  $D$  – скорость детонации взрывчатого вещества;  $\alpha = m_{ВВ}/m_M$ ;  $m_{ВВ}$  – масса взрывчатого вещества боевой части;  $m_M$  – масса металла корпуса боевой части;  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий форму боевой части;  $\varphi = 3,33; 4$  и  $6$  соответственно для сферической, цилиндрической и плоской формы;  $\varphi_1 = 0,8-0,9$  – коэффициент, учитывающий потери энергии, идущей на разрушение оболочки или на прорыв продуктов детонации в зазоры ГПЭ и передаваемой осколками воздуху в момент разлета.

Примерное представление о порядке  $V_p$  для осколков, образуемых взрывами зарядов из тротила в цилиндрических оболочках, дает табл. 12.1.

Таблица 12.1

$\alpha$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,66
$V_p, \text{ м/с}$	245	542	757	1046	1253	1417	1552	1736

Скорость разлета осколков БЧ с заранее приготовленными осколками примерно на 20% меньше скорости разлета осколков с произвольным дроблением корпуса.

Начальная скорость осколков  $V_0$  рассматривается как абсолютная, полученная в результате сложения векторов скоростей осколка и ракеты (рис. 12.14):  $V_0 = \sqrt{V_R^2 + V_p^2 + 2V_c V_p \cos \varphi}$ , где  $V_p$  – начальная скорость разлета осколков;  $V_R$  – скорость движения ракеты;  $\varphi$  – угол между векторами скоростей  $\vec{V}_p$  и  $\vec{V}_R$ .

Встреча осколочного поля с целью произойдет при условии своевременной выдачи команды на подрыв БЧ (рис. 12.15).

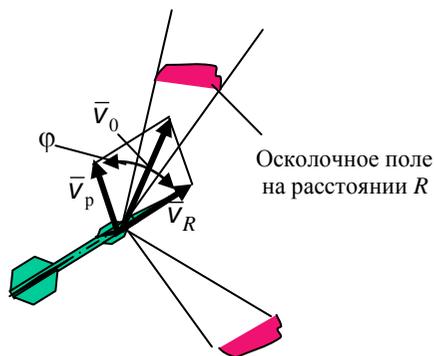


Рис. 12.14. Начальная скорость осколков

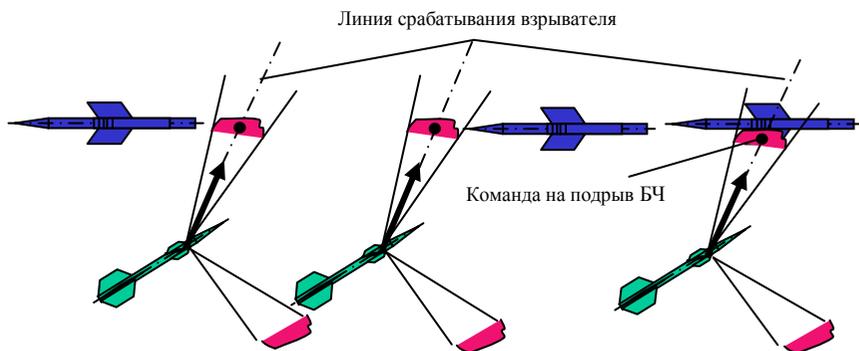


Рис. 12.15. Определение момента срабатывания ББУ

Относительную скорость встречи  $V_B$  осколка с целью на расстоянии  $R$  определим с учетом потери скорости осколком при его движении в атмосфере. Уравнение движения осколка:

$$m \frac{dV}{dt} = -c_x \frac{\rho V^2}{2} S_{cp}, \quad (12.9)$$

где  $m$  – масса осколка;  $V$  – скорость осколка;  $\rho$  – плотность атмосферы;  $S_{cp} = \Phi m^{2/3}$  – средняя площадь поперечного сечения осколка;  $\Phi \cong 0,0144$  – коэффициент формы осколка произвольно дробящейся оболочки. Если известны размеры осколка, то

$S_{cp} = (ab + ac + bc)/2$ ;  $a, b, c$  – размеры осколка приведенного к прямоугольному параллелепипеду;  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления осколка ( $c_x \approx 1, 24$ ).

Решив (12.9) относительно  $v = v(R)$  при  $x = R$ , получим

$$v(R) = v_0 \exp\left(-c_x \frac{\rho S_{cp} R}{2m}\right), \quad (12.10)$$

$$v_B = \sqrt{v_{ц}^2 + v(R)^2} + 2v_{ц} v(R) \cos \varphi. \quad (12.11)$$

где  $v_{ц}$  – скорость цели в момент встречи;  $\varphi$  – угол между векторами скорости цели и скорости разлета осколков.

Наибольшее распространение получили БЧ с корпусами в виде тел вращения, которые могут иметь цилиндрическую, сферическую или близкую к ним форму (типа кокона или параболической бочки с программируемой формой поверхности). Корпуса могут быть с примерно постоянной толщиной стенки, иметь насечку или способность формировать осколки заданной массы и габаритов при взрыве, или состоять из фрагментов (ГПЭ). Скорости разлета осколков по длине образующей также могут быть разными. Целый класс БЧ составляют те, при срабатывании которых формируется плоский фронт осколков.

Если в конструкции боевой части предусмотрены ГПЭ или дробление корпуса на осколки определенной формы и массы, то область их разлета представляется в виде поверхности, по которой осколки распределяются в соответствии с их расположением на поверхности самой БЧ. Возможность образования конгломератов из двух или более осколков рассчитывается с привлечением статистики. Считается, что вся масса метаемого металла такой БЧ сосредоточена во фрагментах; толщиной и характеристиками материала оболочки корпуса пренебрегают. Система фрагментов приводится к условной изотропной оболочке без прочности толщиной  $b$  и плотностью  $\rho$  материала фрагментов. Скорость разлета фрагментов вычисляется по их суммарной массе.

Если область разлета осколков ограничить шаровой поверхностью (рис. 12.16) с радиусом  $R$  и центром в точке разрыва БЧ, то распределение ПЭ по этой поверхности можно определить, «нарезав» 19 шаровых поясов (рис. 12.16). Площадь поверхности каждого пояса:

$$S_{шп} = 2\pi R^2 (\cos \varphi_i - \cos \varphi_{i+1}). \quad (12.12)$$

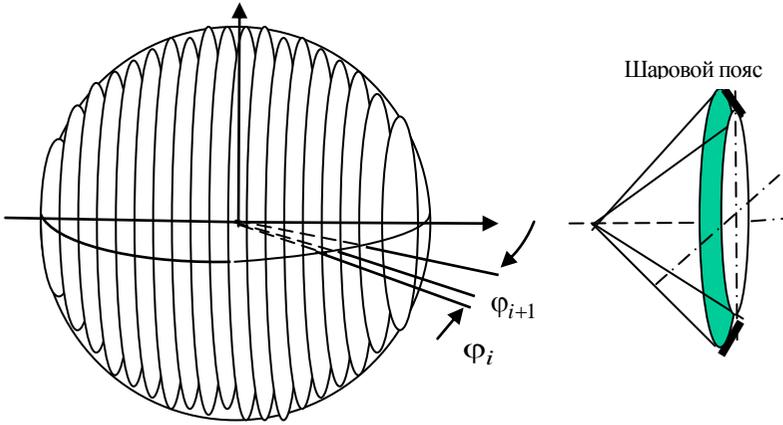


Рис. 12.16. Представление области разлета осколков сферической поверхностью

Средняя плотность потока осколков, располагающихся на поверхности шарового пояса,

$$\lambda = \frac{Nk_{\phi}}{2\pi R^2 (\cos \phi_i - \cos \phi_{i+1})}. \quad (12.13)$$

Здесь  $k_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий распределение осколков в поясах при произвольном дроблении корпуса БЧ.

Из статистики известно, что для БЧ с симметричной цилиндрической оболочкой 97% всех осколков, образующихся при дроблении корпуса, распределяются в шаровом поясе с центральным углом 120° (табл. 12.2).

Таблица 12.2

**Средняя плотность распределения 1000 осколков в 19 поясах сферической поверхности с радиусом  $R_3 = 3$  м и центром, совмещенным с центром взрыва для симметричной цилиндрической оболочки**

Пояс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ф <sub>0</sub> , град	0... ...5	5... ...15	15... ...25	25... ...35	35... ...45	45... ...55	55... ...65	65... ...75	75... ...85	85... ...95	95... ...105
$S_{\text{пояса}}$	0,215	1,715	3,369	4,925	6,332	7,546	8,531	9,257	9,702	9,851	9,702
$S_{\text{пояса}}$	0,002	0,015	0,032	0,044	0,056	0,067	0,075	0,082	0,086	0,087	0,086
% осколков	0,04	0,04	0,04	0,04	0,82	0,83	0,84	0,85	0,85	0,85	0,856
Количество осколков	1,21	2,38	3,48	4,48	109,46	125,26	137,55	145,87	146,13	145,88	145,88
Плотность	0,02	0,30	0,59	0,87	1,12	1,33	1,51	1,64	1,72	1,74	1,72

Для определения плотности потока осколков в районе цели необходимо определить, какой из шаровых поясов накрывает цель (приходится на проекцию цели на плоскость, перпендикулярную вектору скорости разлета осколков), и затем рассчитать плотность эффективных осколков в этом шаровом поясе, т.е. в районе цели.

Первая часть задачи носит чисто геометрический характер, и ее решение зависит от положения БЧ относительно цели в момент разрыва. В результате ее решения должны быть определены угол между вектором скорости ракеты и направлением на цель от точки разрыва ( $\varphi_1$ ), угол между направлением на цель и вектором скорости разлета осколков ( $\varphi_2$ ), угол между вектором скорости ракеты и вектором скорости разлета осколков ( $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ ) и по нему коэффициент  $k_\varphi$  в формуле (12.13).

При работе по наземной (надводной) цели решается геометрическая задача в соответствии с рис. 12.17.

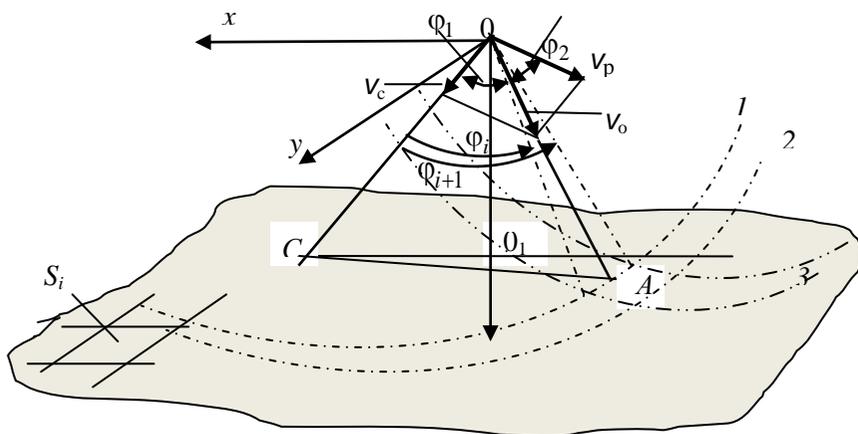


Рис. 12.17. Работа БЧ по наземной (надводной) цели:

$C$  – точка встречи боевой части с целью;  $xOC_1$  – плоскость стрельбы;  $OC_1A$  – плоскость цели, разделенная на отдельные площадки  $S_i$ ;  $OCA$  – меридиональная плоскость, проходящая через цель;  $I$  – граница меридиональной плоскости БЧ в пределах выделенного осколочного поля;  $2$  – граница осколочного поля в пределах расстояния от точки разрыва боеприпаса до цели;  $3$  – шаровой пояса, накрывающий цель

Если заданы размеры осколка и определено их количество в шаровом поясе  $\varphi_i - \varphi_{i+1}$ , то известна и плотность потока осколков  $\lambda_i$ , если нет, то после анализа целей и определения законов распределения толщин оболочки цели  $F(h)$  и  $f(h)$  необходимо рассчитать требуемую массу осколка.

Минимальная потребная масса осколка рассчитывается из условия  $E_{уд} \geq E_{уд.уб}$ , где  $E_{уд} = \frac{mV_B^2}{2S_{ср}}$  – кинетическая энергия осколка, отнесенная к средней площади его поперечного сечения (удельная энергия осколка);  $E_{уд.уб}$  – удельная энергия осколка, обладающего способностью поразить цель (удельная энергия убойного осколка). Данное выражение позволяет рассчитать убойный интервал осколка, т.е. расстояние от центра подрыва, на протяжении которого осколок сохраняет способность поразить цель.

Полагая  $v = v_{уб}$  и  $R = R_{уб}$ , получим

$$R_{уб} = -\frac{2m}{c_x \rho S_{ср}} \ln \frac{V_B}{V_0}. \quad (12.14)$$

Скорость  $v_{уб}$  можно определить, зная потребную для поражения заданной цели удельную энергию осколка  $E_{1пор}$  из выражения

$$E_{1пор} = \frac{mV_{уб}^2}{2S_{ср}} :$$

$$v_{уб} = 1,41 \sqrt{\frac{E_{1пор} S_{ср}}{m}}. \quad (12.15)$$

Значение  $E_{1пор}$  определяется экспериментально. Например, для самолета-истребителя и вертолета  $E_{1пор} > 2,8$  МДж/м<sup>2</sup>; для крылатой ракеты  $E_{1пор} > 1,8$  МДж/м<sup>2</sup>.

Если уязвимые отсеки располагаются под обшивкой (под защитой), то вероятность поражения цели будет зависеть от того, какой энергией будет обладать осколок, пройдя через стенку (защиту – рис. 12.18). Эта энергия будет в первую очередь определяться предельной скоростью сквозного пробития  $V_{псп}$ , которая находится либо

экспериментально, либо по эмпирическим зависимостям. В любом случае потребную массу осколка нужно рассчитывать с учетом относительной скорости ракеты и цели:  $\bar{V}_B = \bar{V}_p + \bar{V}_ц$ .

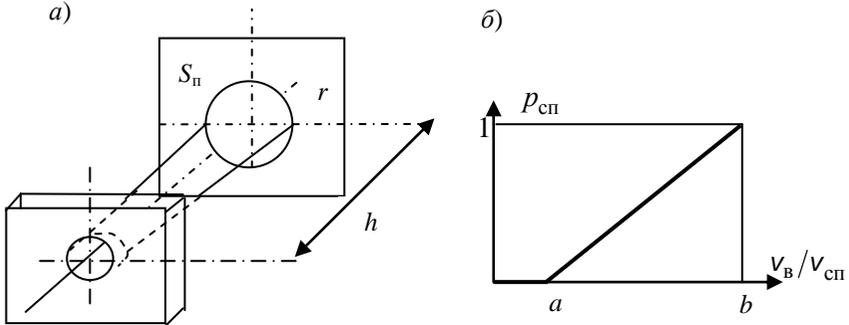


Рис. 12.18. Запреградное действие осколков: а – схема; б – распределение вероятности пробития

При увеличении скорости соударения вероятность сквозного пробития возрастает. Для определения вероятности пробития нужно знать закон ее изменения в пределах возможного диапазона скоростей. Скорость удара, при которой преграда толщиной  $h^*$  пробивается с полной потерей кинетической энергии, называется критической скоростью, скоростью сквозного пробития. Если скорость удара превысит критическое значение, осколок пробьет преграду насквозь, потеряв лишь часть энергии.

С целью обобщения данных удобно пользоваться в качестве аргумента отношением  $v_B/v_{сп}$  и представлять функцию в виде  $P_{сп} = f(v_B/v_{сп})$ , в первом приближении – в виде линейной зависимости от скорости встречи  $v_B$  (рис. 12.18, б):

$$P_{сп} = 0; \quad \frac{v}{v_{сп}} \leq a;$$

$$P_{сп} = \frac{1}{b-a} \frac{v_B}{v_{сп}} - \frac{a}{b-a}; \quad a < \frac{v_B}{v_{сп}} < b;$$

$$P_{сп} = 1 \quad \text{при} \quad \frac{v}{v_{сп}} \geq b.$$

Приближенно можно принять  $a = 0,7$ ;  $b = 1,13$ .

Толщина металлической преграды  $h^*$ , пробиваемой осколком с вероятностью 0,5:

$$h^* = 0,138d_1\rho_1 \frac{v}{\sqrt{\sigma_2\rho_2}} \quad (h^* < 1,1d_1), \quad (12.16)$$

где  $d_1$  – приведенный диаметр осколка;  $\rho_1$  – плотность материала осколка;  $\rho_2$  – плотность материала преграды;  $\sigma_2$  – динамический предел текучести материала преграды.

Остаточная скорость после пробития преграды в предположении линейной аппроксимации скорости в преграде толщиной  $h^*$ :

$$v_{\text{ост}} = v_{\text{в}} - \frac{7,25h_2}{\rho_1 d_1} \sqrt{\sigma_2\rho_2}. \quad (12.17)$$

В литературе по удару приводятся полуэмпирические формулы для оценки остаточной скорости типа:

$$v_{\text{ост}} = v_{\text{в}} - h_2 \sqrt{K_{\text{пр}} \frac{d_1}{m_0}}. \quad (12.18)$$

Оценка коэффициента, характеризующего преграду, производится по соотношению  $K_{\text{пр}} = 52,5\sigma_2\rho_2 m_0 / (d_1^3\rho_1^2)$ . Так, если за металлической преградой находится ВВ, проверку на детонацию проводят при скорости на вылете не менее 1500 м/с.

При ударе по преграде из упругохрупкого материала (бетон, стекло, тонкая броня) может возникнуть вторичный поток осколков разрушающейся части преграды. Откол возникает при выполнении одного из условий:

$$\begin{aligned} \bar{p} &\geq 8,1 (i \leq 2), \quad \bar{p} \geq 7,0 (2 < i \leq 3), \\ \bar{p} &\geq 5,6 (3 < i \leq 8), \quad \bar{p} \geq 5,25 (i > 8), \end{aligned} \quad (12.19)$$

где  $\bar{p}$  – безразмерное контактное давление осколка,

$$\bar{p} = \frac{p}{\sigma_2} = \left( \frac{d_1}{h_2} \right)^{0,4} \frac{\rho_2 a_2 v}{\left[ \sigma_2 \left( 1 + \frac{\rho_2 a_2}{\rho_1 a_1} \right) \right]},$$

$i$  – безразмерный импульс, переданный преграде при ударе,

$$i = \frac{Ia_2}{ph_2} = \frac{\rho_1 d_1}{2\rho_2 h_2} \left( 1 + \frac{\rho_2 a_2}{\rho_1 a_1} \right).$$

Здесь  $a_1, a_2$  – скорость звука в материалах осколка и преграды соответственно.

Поражение объекта за слабозащищенной преградой определяется тем же условием:  $\frac{mV_{\text{ост}}^2}{2S_{\text{сп}}} \geq E_{\text{уд. уб}}$ . Отсюда же находят минимальную

массу убойного осколка для такой цели. Теперь необходимо определить плотность потока осколков, попадание этого потока в  $S_{\text{отс уязв}}$  и ответить на вопрос, будет ли находиться отсек в этой площадке и какова вероятность его поражения этим потоком. Можно полагать распределение осколков с плотностью  $\lambda$  по  $S_{\text{отс уязв}}$  равномерным и считать, сколько осколков попадет на неё и какова вероятность попадания определенного их числа в соседние уязвимые отсеки. При ударном подрыве боеприпаса на поверхности земли (на палубе корабля) и на небольших, до 3 м, высотах, часть осколков рикошетирует от грунта (палубы) и изменяет направление своего полета (рис. 12.19).

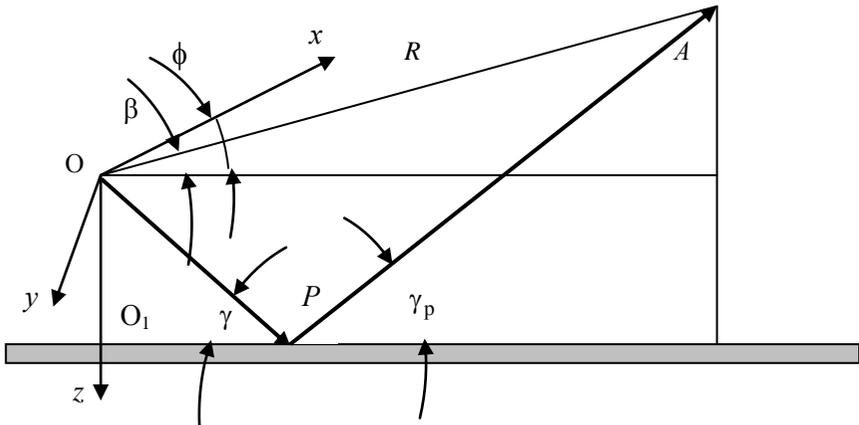


Рис. 12.19. Схема рикошета осколка:  $\gamma_p$  – угол рикошета;  
 $\gamma$  – угол падения осколка

Плотность убойных осколков после рикошета подсчитывается по формуле

$$\lambda_2 = \frac{N k_{\pi} k_{\phi} k_2}{2\pi R^2 (\cos\varphi_i - \cos\varphi_{i+1})}, \quad (12.20)$$

где  $N$  – количество осколков, подлетевших к месту рикошета.  $k_2 = f(\gamma, v, k_{гр})$  – коэффициент, учитывающий относительное число осколков после рикошета, направленных к цели, и являющийся функцией угла подлета осколков, их скорости и свойств грунта (палубы):

$$k_2 = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma \leq 10^\circ; \\ 0 & \text{при } \gamma > \gamma_{пр}; \\ (\gamma_{пр} - \gamma) / (\gamma_{пр} - 10) & \text{при } 10^\circ < \gamma < \gamma_{пр}, \end{cases} \quad (12.21)$$

где  $\gamma_{пр}$  – предельный угол, при котором наблюдается рикошет;  $k_{\pi}$  – коэффициент, учитывающий потерю энергии осколком при рикошетировании;  $k_{\pi} = 0,378\gamma k_{гр} + 0,0002v\gamma k_{гр}$ ;  $k_{гр}$  – коэффициент, учитывающий свойства грунта:

Известняк, песчаник.....	0,02
Слабый бетон.....	0,012...0,015
Камень булыжный.....	0,025
Кирпичная кладка.....	0,02... 0,025
Песок слежавшийся.....	0,045
Глина плотная.....	0,07
Грунт плотный.....	0,06 ...0,085
Грунт средней плотности.....	0,11...0,13

Критический угол рикошета может быть подсчитан по формуле Тейга:

$$\operatorname{tg}^3 \gamma = \frac{2}{3} \frac{\rho_1 v^2}{Y_1} \left( \frac{l_1^2 + d_1^2}{l_1 d_1} \right) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right], \quad (12.22)$$

где  $l_1, d_1$  – длина и калибр осколка;  $Y$  – предел упругости;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности осколка и преграды.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Какие факторы необходимо учесть при расчете вероятности поражения СВН БЧ ЗУР?
2. Каково Ваше представление о воздушной цели как объекте, по которому действует БЧ ЗУР?
3. Чем характеризуются уязвимые отсеки воздушной цели?
4. Как можно классифицировать уязвимые отсеки воздушной цели?
5. Как можно оценить вероятность поражения уязвимого отсека?
6. Дайте определение приведенной уязвимой площади отсека.
7. Предложите Ваши варианты расчета вероятности поражения воздушной цели, имеющей разные по характеристикам отсеки.
8. Как определить начальную скорость разлета осколков?
9. Как рассчитать скорость встречи осколка с целью?
10. Предложите вариант расчета плотности потока осколков на некотором расстоянии от точки подрыва БЧ.
11. Какой смысл вкладывается в понятие «убойный осколок»?
12. Что такое убойный интервал?
13. Как рассчитать минимальную потребную массу осколка?
14. От чего зависит толщина металлической преграды, пробиваемой осколком?
15. Как рассчитать вероятность поражения воздушной цели, находящейся на аэродроме или на небольшой высоте над поверхностью земли?

### **12.5. Стержневые боевые части**

Стержневые боевые части получили распространение в ракетах с БЧ массой менее 50 кг.

Различают два типа БЧ: стержневая оболочка (рис. 12.20, *а,б*) и отдельные стержневые элементы, расположенные под углом к ее образующей (рис. 12.20, *в*). В стержневой оболочке концы стержней связаны (сварены, спаяны – рис. 12.21).

В стержневых БЧ со связанными концами могут применяться стержни круглого или прямоугольного сечения, как постоянного, так и переменного по длине оболочки, в стержневых БЧ с несвязанными концами – в основном круглого сечения. Стержневая оболочка формируется из монолита, потребная длина которого определяется из условия получения требуемого радиуса кольца, обеспечивающего

сплошное покрытие цели:  $R_{к\text{спл}} = \sigma\sqrt{-2\ln(1-P)}$ , где  $P$  – вероятность пересечения образуемым кольцом какого-либо элемента цели;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение центра кольца относительно цели. Приведенное выше соотношение не учитывает геометрию поперечного сечения стержня.

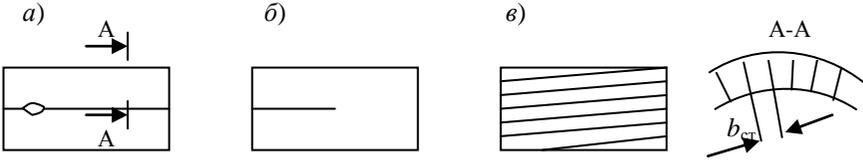


Рис. 12.20. Схемы стержневых БЧ: а, б – БЧ со связанными стержнями (сварка, пайка во время взрыва); в – БЧ с несвязанными косоугольными стержнями

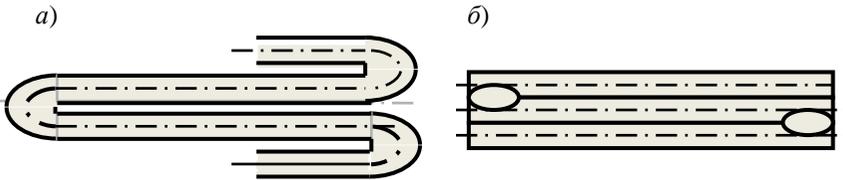


Рис. 12.21. Способы скрепления концов стержней:  
а – гибка из прутка; б – сварка (пайка) концов

При срабатывании заряда ВВ БЧ оболочка, состоящая из  $n$  стержней длиной  $l$ , раскрывается в кольцо радиусом  $R_{к\text{спл}} = 0,85(nl)/(2\pi)$ , где 0,85 – коэффициент, учитывающий распрямление стержневой оболочки;  $l_{ст}$  – длина стержня;  $n$  – число стержней (см. рис. 12.10).

Радиус кольца связан с геометрией БЧ и размерами поперечного сечения стержня соотношением для стержней круглого сечения:  $R_{к\text{кр}} = [(D_{бч} - d_{ст})l_{ст}K_{ст}]/(2d_{ст})$  и прямоугольного:  $R_{к\text{пр}} = [(D_{бч} - d_{ст})l_{ст}K_{ст}]/(2b_{ст})$  соответственно. Здесь  $K_{ст} = 0,75 \dots 0,9$  – комплексный коэффициент, учитывающий набор факторов, влияющих на реальный радиус кольца, таких как плотность укладки и наличие наружной обшивки, степень выравнивания импульса вдоль стержневой оболочки, уровень начальной скорости ме-

тания оболочки, потеря длины размеров кольца из-за неполноты раскрытия стыков, соединяющих стержни.

Значение  $R_k$  позволяет определить дальность, на которой поле поражения составляет 100%. На расстояниях больших  $R_k$  кольцо распадается на отдельные плети. Соединение отдельных плетей в сплошную линию повреждения при действии по цели происходит при расстояниях между плетями, не превышающими в сумме  $0,6 \dots 0,9$  длины окружности радиуса  $R_k$ , и зависит от типа цели, конструкции ее планера, условий полета, длины отдельных стержневых поражающих элементов или плетей.

Увеличить  $R_k$  при заданном габарите БЧ можно за счет уменьшения диаметра  $d_{ст}$  (ширины  $b_{ст}$ ) поперечного сечения стержня или укладки стержней в два яруса. Однако  $d_{ст}$  и  $b_{ст}$  сильно влияют на эффективную глубину внедрения элемента кольца в конструкцию цели.

Рассмотрим формирование кольца из оболочки, сформированной из стержней с несвязанными концами. В общем случае стержни могут быть уложены под углом к образующей цилиндрической поверхности БЧ.

При раскрытии кольца имеют место два вида движения стержней: поступательное – вдоль прямой, совпадающей с радиусом заряда, и вращательное относительно направления поступательного движения.

Стержни под действием продуктов детонации ВВ разгоняются, приобретая начальную скорость  $V_H$  (рис. 12.22). Центр масс стержня движется вдоль радиуса БЧ. Расположение стержня под углом к образующей БЧ приводит к появлению момента, заставляющего стержень вращаться относительно центра масс (рис. 12.23).

Допущения для БЧ с несвязанными концами: заряд имеет цилиндрическую форму; распределенную по стержню нагрузку заменяем сосредоточенной силой, приложенной в центре масс стержня, направленной по радиусу кольца; давлением продуктов детонации на боковую поверхность стержней пренебрегаем.

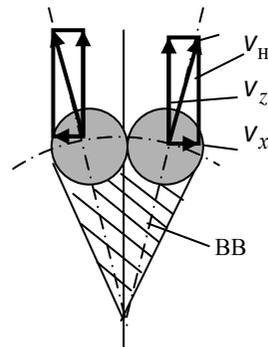


Рис. 12.22. Векторы скорости концов стержней в плоскости нормальной образующей БЧ

Считаем, что движение стержней начинается с поверхности заряда. Длительность фазы разгона стержня в порядки раз меньше длительности фазы полета стержня по инерции.

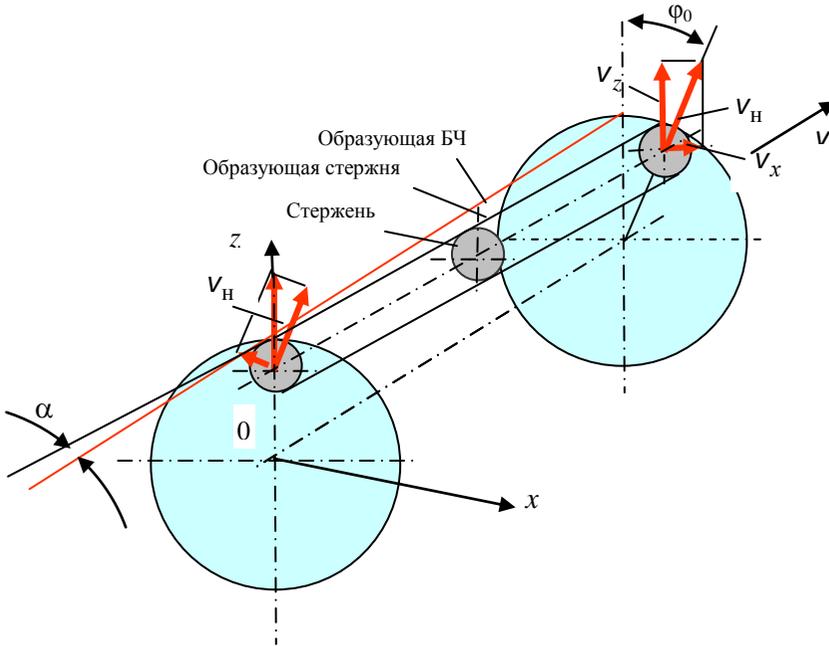


Рис. 12.23. Схема сил, действующих на косоугольный стержень

Начальный угол  $\phi_0$  смещения концов стержней в плоскости, перпендикулярной образующей заряда ВВ, мал, поэтому можно считать, что стержень лежит в плоскости  $xOy$ ;  $\phi_0 = \arcsin(r_0/l) \approx 1^\circ$  для стержней круглого сечения и  $\phi_0 = \arcsin(b/l) \approx 1^\circ$  для стержней прямоугольного сечения;  $r_0, b$  – характерные поперечные размеры стержня;  $l$  – длина стержня.

Так же как и в ОБЧ, начальная скорость раскрытия стержневого кольца  $v_p$  является функцией активной массы (толщины слоя) ВВ, характеристик ВВ (плотности  $\rho_{вв}$ , скорости детонации  $D$ , теплоты взрывчатого превращения и т.д.), размеров стержня (диаметра –  $d_{ст}$ ,

$a, b$  – размеров сторон стержня прямоугольного сечения, длины  $l_{\text{ст}}$ ), плотности материала стержня  $\rho_{\text{ст}}$ , диаметра БЧ –  $D_{\text{БЧ}}$ , удлинения заряда ВВ и других особенностей отсека, в том числе выбора точки инициирования и конструктивных способов выравнивания импульса. Начальная скорость движения стержней может быть принята как скорость разлета осколков:  $v_p = 0,5 D \sqrt{\varphi_1 \alpha / (2 + \alpha / \varphi)}$  (см. подразд. 12.3).

При рассмотрении фазы движения стержня по инерции принято допущение, что импульс выровнен вдоль стержневой оболочки и все сечения стержня движутся с одинаковой начальной скоростью.

Решая уравнения движения стержня под действием сил, обеспечивающих поступательное и вращательное движение, получим динамику раскрытия стержневого кольца:

$$V_x = V_H \sin \varphi_0 \approx V_H \varphi_0; \quad V_z = V_H \cos \varphi_0 \approx V_H. \quad (12.23)$$

Расстояние между центрами концов стержня  $S = l \sin \alpha_0 \approx l \alpha_0$ ,  $\varphi_0 = \arcsin(S/r_0) \approx (l \alpha_0)/r_0$ ; отсюда

$$v_x = (v_H \alpha_0 l) / r_0. \quad (12.24)$$

Для БЧ со связанными концами в уравнениях движения необходимо учесть момент, препятствующий раскрытию кольца.

Примем допущения для БЧ со связанными концами: стержни соединены шарнирно; трением в шарнирах пренебрегаем.

Так как соединенные стержни уложены на поверхности заряда асимметрично относительно плоскости, проходящей через их центр масс, но симметрично относительно противоположных пар, то достаточно рассмотреть пару полустержней  $l_3/2$  ( $l_3$  – эффективная длина стержня, т.е. длина без учета соединения).

Движение пары стержней, так же как и отдельного стержня, является сложным, состоящим из переносного движения общего центра масс и относительного движения стержней около этого центра. Переносное движение и есть поступательное движение со скоростью  $V_H$  вдоль прямой, являющейся продолжением радиуса заряда, проходящего через общий центр масс. Для оценки влияния совместного движения пары стержней на отдельные взятые стержни необходимо рассмотреть пару в ее относительном движении.

Относительное движение стержней связано с наличием составляющей  $v_x$ , имеющей в плоскости сечения, проходящей через центр масс, составляющую  $(v_H \alpha_0 l_3)/(2r_0)$ , направленную влево для левого полустержня и вправо для правого. Здесь  $l_3$  – эффективная длина стержня без учета соединения торцов (рис. 12.24, а).

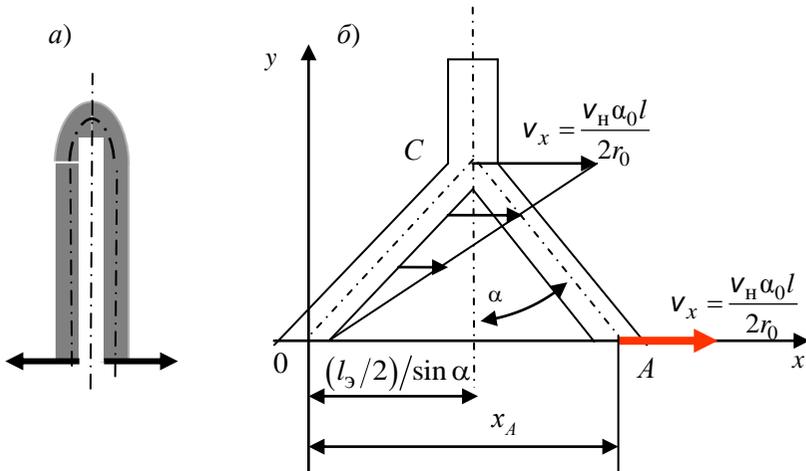


Рис. 12.24. Расчетная схема раскрытия стержневой БЧ со связанными концами

В процессе раскрытия стержневого кольца в месте соединения стержней образуется пластичный шарнир – точка  $C$  (рис. 12.24, б). Движение пары можно рассмотреть как движение шарнирного соединения в точке  $C$  элементов, закрепленных в точке  $O$ , при наличии вектора скорости, приложенного в точке  $A$ , и направленного по прямой  $OA$ . Расстояние между центрами концов стержней  $x_A = l_3 \sin \alpha$ .

Продифференцировав это выражение по времени и найдя производные, получим  $d\alpha/dt = \dot{\alpha} = v_A/(l_3 \sin \alpha)$ ;  $d^2\alpha/dt^2 = \ddot{\alpha} = v_A \dot{\alpha} \sin \alpha / (l_3 \cos^2 \alpha) = v_A^2 \sin \alpha / (l_3^2 \cos^3 \alpha)$ .

Учитывая, что  $\sin \alpha = x_A/l_3 = 2\pi RN / (2\pi R^*) = R/R^* = \bar{R}$  и  $v_A = v_H \alpha_0 l_3 / r_0$ , где  $R$  – текущий радиус раскрытия стержневого кольца (теоретический радиус),  $R^*$  – относительный радиус раскры-

тия стержневого кольца,  $N$  – количество стержней, запишем следующие выражения для угловой скорости и углового ускорения:

$$\dot{\alpha} = v_H \alpha_0 / \left( r_0 \sqrt{1 - \bar{R}^2} \right); \quad \ddot{\alpha} = v_H^2 \alpha_0^2 \bar{R}^2 / \left( 1 - \bar{R}^2 \right)^{3/2}.$$

Заменив  $v_H \alpha_0 / r_0 = \omega_0$  получим

$$\dot{\alpha} = \omega_0 / \sqrt{1 - \bar{R}^2}; \quad \ddot{\alpha} = \omega_0 \bar{R}^2 / \left( 1 - \bar{R}^2 \right)^{3/2}. \quad (12.25)$$

При  $v_H = \text{const}$   $R = v_H t$ . Тогда  $\bar{R} = v_H t / R$  и зависимости (12.25) можно представить как функцию времени разлета стержней:

$$\dot{\alpha} = \alpha_0 R^* / \left( r_0 \sqrt{t_k - t} \right); \quad \ddot{\alpha} = \alpha_0^2 \bar{R}^{*2} t / \left[ r_0 \left( t_k^2 - t^2 \right)^{3/2} \right].$$

Глубина внедрения  $h_{\text{вн}}$  стержней в преграду прямо пропорциональна произведению эквивалентного диаметра поперечного сечения стержня  $d_{\text{ст}}$ , плотности материала стержня, синусу угла подхода стержня к поверхности преграды (отсчитывается от поверхности) и скорости соударения стержня с преградой  $v_{\text{соуд}}$  в степени  $k$  ( $k = 0,75 \dots 1$ ):  $h_{\text{вн}} = d_{\text{ст}}^{\text{ЭКВ}} \rho_{\text{ст}} v_{\text{соуд}}^k \sin \alpha$ , где  $d_{\text{ст}}^{\text{ЭКВ}} = 1,1 \sqrt{a_{\text{ст}} b_{\text{ст}}}$ .

Большинство уязвимых агрегатов ракет (кроме БЧ) эффективно поражается осколком, у которого масса 10...20 г и  $v_{\text{соуд}} = 800$  м/с. Для инициирования БЧ любой ракеты необходимы осколки, имеющие  $v_{\text{соуд}} = 3000 \dots 4000$  м/с.

БЧ с несвязанными концами имеют стабильную структуру поля поражения. Кратчайшее расстояние между резами  $a_p$ , наносимыми конструкцией отдельными стержнями,

$$a_p = 2\pi R \cos \left[ (90 - \alpha) R / R_{\text{кр}} - a_{\text{ст}} \right] / n_{\text{ст}} \quad \text{при } R \leq R_{\text{кр}},$$

$$a_p = \sqrt{l_{\text{ст}}^2 \cos^2 \alpha + (2\pi R / n_{\text{ст}} - l_{\text{ст}} \sin \alpha)^2} \quad \text{при } R > R_{\text{кр}} \text{ и } \alpha > 90^\circ.$$

Видно, что величина  $a_p$  минимальна на очень малых расстояниях от точки подрыва, где поражение цели достигается за счет совместного фугасного и стержневого действий и дальностей, близких к  $R_{\text{кр}}$ .

На расстояниях  $R > R_{кр}$   $\alpha$  увеличивается и может превышать критические значения, резы не объединяются и имеет место тепловое поражение. Этого нет при  $R \leq R_{кр}$ , если  $\alpha_p < 0,5l_{реза}$  от отдельных стержней и  $\alpha_p = \alpha_p + \sigma_a \leq l_{реза}$ .

Стержневые БЧ могут применяться для борьбы не только с воздушными, но и с наземными и надводными целями, которыми могут быть легкозащищенные наземные цели, малотоннажные суда, противокорабельные ракеты и т.п. Как пример приведем характеристики ракет "Экзосет" и "Гарпун":

	"Экзосет"	"Гарпун"
Длина, м.....	4,79	3,84; 4,58*
Диаметр, м.....	0,34	0,34
Размах крыла, м.....	1,0	0,91
Масса, кг.....	655	522; 667*
МассаБЧ, кг.....	165	230

\* Вариант ракеты, запускаемой с корабля.

Эти ракеты, предназначенные для борьбы с кораблями, могут запускаться с вертолетов, самолетов, кораблей. Во время Фолклендской войны "Экзосет" потопил эсминец "Шеффилд". Попадание в контейнеровоз, на борту которого было 18 вертолетов, привело к пожару, результат – 12 убитых, судно потеряно. Легкий крейсер Глэмфэри – 13 убитых, 17 раненых.

Для любого корабля существует понятие рубежа перехвата ПКР. Конкретные рубежи выбираются с учетом размеров и уязвимости защищаемого корабля, могущества нападающей ПКР, тактики ее применения (профиля траектории и высоты полета). Характерные параметры рубежей перехвата приведены в табл. 12.3.

Таблица 12.3

Рубеж перехвата	Дальность перехвата, м	Уязвимые агрегаты
1	150	Боевая часть, неконтактный взрыватель
2	600	Боевая часть, неконтактный взрыватель, агрегаты, планер
3	1200	Боевая часть, неконтактный взрыватель, агрегаты, планер, головка самонаведения
4	>2500	Боевая часть, неконтактный взрыватель, агрегаты,

		планер, головка самонаведения, блоки питания, обтекатели рулевых машин, двигательная установка
--	--	--

Для увеличения эффективности действия стержневой БЧ можно применять тяжелые металлы и сплавы, варьировать размеры  $a_{ст}$  и  $b_{ст}$  соответственно. При этом  $b_{ст}$  следует выбирать из условия гарантированного пробития обшивки конструкции современной цели:  $b_{ст}^{max} = 2,5...3$  мм.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. В чем смысл использования стержневых БЧ?
2. В чем разница в поражающем действии стержневых БЧ с несвязанными и со скрепленными концами?
3. Каковы особенности расчета поражающего действия стержневых БЧ ЗУР со скрепленными концами?
4. Каковы особенности расчета поражающего действия стержневых БЧ ЗУР с несвязанными концами?

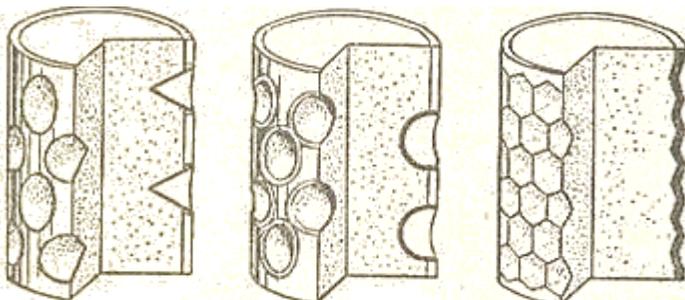
## **12.6. Мультикумулятивная боевая часть**

При решении задачи перехвата баллистических ракет и их БГ встает вопрос о проникании осколков через многослойную конструкцию. ПЭ массой 6...7 г не способны пробить терпозащитный слой головной части и вызвать детонацию основного заряда взрывчатого вещества, поэтому необходим переход от круговых осколочных полей к направленным.

Использование мультикумулятивных БЧ с многоточечным инициированием принципиально позволяет решить данную проблему. При равномерном размещении кумулятивных облицовок по всей поверхности цилиндрического корпуса БЧ (рис. 12.25) формируется радиально-кольцевое поле ударных ядер (УЯ), при размещении кумулятивных облицовок в торцевой части БЧ (рис. 12.26) – направленное поле УЯ. Подбирая параметры кумулятивных выемок, можно добиться требуемого уровня кинетической энергии ударных ядер, обеспечивающих пробитие корпуса ГЧ БР в варианте как кругового поля, так и осевого.

Расчёт параметров БЧ осуществляется с учётом характера формирования поля УЯ. Для БЧ с радиально-кольцевым полем ПЭ задаются

параметры БЧ: длина, диаметр, толщина оболочки и параметры кумулятивной выемки (диаметр основания и угол раствора облицовки). Определяется количество выемок, размещаемых в БЧ. В заданном габарите БЧ определяется потребная масса ВВ, необходимая для



формирования УЯ. Рассчитываются параметры формируемого УЯ (габариты, скорость), определяются площадь радиально-кольцевого поля ПЭ на дистанции промаха и плотность поля ПЭ.

Рис. 12.25. Схемы мультикумулятивных БЧ, формирующих радиально-кольцевое поле УЯ

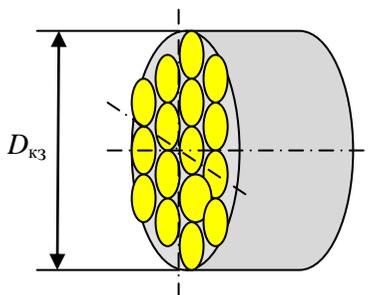


Рис. 12.26. Схема БЧ, формирующей направленное поле УЯ

Аналогичен порядок расчета поля ПЭ БЧ направленного действия. В обоих случаях имеет место итерационный подход в расчете, поскольку масса ВВ, участвующая в формировании УЯ требуемых габаритов, может оказаться избыточной или недостаточной. Конечный результат проектирования такой БЧ может быть получен при отыскании оптимального решения либо на уровне решения задачи

оптимизации ЗУР, либо при заданных параметрах ЗУР на уровне оптимизации параметров БЧ. В последнем случае целевой функцией будет вероятность поражения типовой ГЧ при попадании в нее не менее одного УЯ:  $P_{\Pi} = 1 - \exp(-\lambda S_{\Pi} \sin \alpha)$ .

### *Вопросы для самоконтроля*

1. В чем смысл использования мультикумулятивных БЧ?
2. Чем поражающий элемент мультикумулятивной БЧ отличается от кумулятивной струи?
3. Каковы особенности расчета поражающего действия мультикумулятивных БЧ ЗУР по СВН?

## **13. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Поскольку боевая работа ПЗРК при стрельбе представляет собой процесс, характеризуемый действием множества случайных факторов, то для оценки результатов его функционирования на каждом этапе целесообразно использовать метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).

### **13.1. Сущность метода статистических испытаний**

Предположим, что требуется найти значение некоторой изучаемой величины  $x$ . Для этого выбирают такую случайную величину  $X$ , математическое ожидание которой равно  $M(X) = x$ . Чтобы определить  $M(X)$ , проводят  $n$  испытаний, в результате которых получено  $n$  значений величины  $X_i$ . Тогда среднее значение  $\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$

принимают в качестве оценки искомого значения:  $x \approx \hat{x} = \bar{x}$ .

Поскольку метод Монте-Карло требует большого числа испытаний, то необходимо определить, сколько их нужно провести, чтобы получить удовлетворяющий испытателя результат.

Обозначим  $W_1$  условную вероятность поражения цели;  $P_{\text{БС}}^{\text{нп}}$ ,  $P_{\text{БС}}^{\text{кп}}$ ,  $P_{\text{БС}}^{\text{нп}}$ .

**Соотношение частоты и вероятности.** Если в результате заданного числа реализаций  $I_{\text{зад}}$  получена частота события  $A$  (например,  $W_1, P_{\text{БС}}^{\text{ПП}}, P_{\text{БС}}^{\text{КП}}, P_{\text{БС}}^{\text{НП}}, P_{\text{БС}}$ ), равная  $\hat{P}$ , то истинное значение вероятности события  $A$  будет лежать в пределах

$$P = \hat{P} \pm \sqrt{\hat{P}(1 - \hat{P})} / I_{\text{зад}}.$$

**П р и м е р.** В результате 500 реализаций ( $I_{\text{зад}}=500$ ) получена частота события  $A$ , равная  $\hat{P} = 0,6$ . С какой ошибкой определяется вероятность события  $A$ ?

Максимальная ошибка

$$E = \sqrt{\hat{P}(1 - \hat{P})} / I_{\text{зад}} = \sqrt{\frac{0,6 \cdot 0,4}{500}} = 0,022 = 2,2\%.$$

Следовательно, истинное значение вероятности

$$P = \hat{P} \pm E = 0,60 \pm 0,02 = 0,58 \dots 0,62.$$

**Число реализаций и максимальная ошибка.** Чтобы обеспечить максимальную практически возможную ошибку в определении вероятности события  $A$ , не превосходящую  $\Delta$ , необходимо осуществить число реализаций  $I_{\text{зад}}$ , не менее чем  $I_{\text{зад}} = \frac{4P(1-P)}{\Delta^2}$ , где  $P$  – искомая вероятность события  $A$ , которую можно взять ориентировочным значением по частоте события в первой серии реализаций.

**П р и м е р.** Сколько нужно сделать реализаций, чтобы ошибка в определении вероятности  $P = 0,6$  была не более  $\Delta = 0,05$ ?

Получим

$$I_{\text{зад}} = \frac{4P(1-P)}{\Delta^2} = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,05^2} = 384.$$

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В чем сущность метода статистических испытаний?
2. Как определить число испытаний, необходимых для получения удовлетворяющего испытателя результата?

3. С какой ошибкой определяется вероятность прогнозируемого события?
4. Что необходимо сделать, чтобы обеспечить максимальную возможную ошибку в определении вероятности прогнозируемого события, не превосходящую заданного значения?
5. Каково соотношение частоты и вероятности?
6. Что принимается в качестве оценки искомого значения случайной величины?

### 13.2. Алгоритм оценки эффективности действия боевого снаряжения ЗУР

Эффективность действия боевого снаряжения ЗУР можно оценить двумя способами: 1) смоделировать действие боевого снаряжения, не рассматривая подробно сам процесс действия, 2) получить закон распределения вероятностей поражения цели, подробно анализируя поведение ракеты вблизи цели с учетом ее ориентации относительно цели и функционирования непосредственно боевого снаряжения (БЧ и ракеты).

В первом случае определяется факт поражения цели в данной точке встречи ЗУР с целью.

Пусть  $P_{\text{БС}}(D_{\text{в}})(P_{\text{БС}}(x_{\text{в}}))$  – условная вероятность поражения цели боевым снаряжением ЗУР ( $P_{\text{БС}}$ ) в зависимости от дальности (горизонтальной дальности –  $D_{\text{Е}}$ ) встречи ( $x_{\text{в}}$ ) в беспомеховой обстановке;  $P_{\text{БС}}^{\text{ф}}(D_{\text{в}})(P_{\text{БС}}^{\text{ф}}(x_{\text{в}}))$  – в условиях фонов;  $P_{\text{БС}}^{\text{п}}(D_{\text{в}})(P_{\text{БС}}^{\text{п}}(x_{\text{в}}))$  – в условиях постановки ЛТЦ.

Если задается условная вероятность поражения цели боевым снаряжением ЗУР ( $P_{\text{БС}}$ ) в зависимости от дальности встречи ЗУР с целью ( $D_{\text{в}}$ ), то при отсутствии фоновых помех и ЛТЦ или при наличии только первых или только вторых, по  $D_{\text{в}}$  из соответствующей таблицы, например табл. 13.1, путем линейной интерполяции определяется соответствующее данной точке встречи ЗУР с целью значение  $P_{\text{БС}}$ .

Т а б л и ц а 13.1

$P_{\text{БС}}$ $(P_{\text{БС}}^{\text{ф}}, P_{\text{БС}}^{\text{п}})$	$P_{\text{БС}1}$ $(P_{\text{БС}1}^{\text{ф}}, P_{\text{БС}1}^{\text{п}})$	$P_{\text{БС}2}$ $(P_{\text{БС}2}^{\text{ф}}, P_{\text{БС}2}^{\text{п}})$	...	$P_{\text{БС}m}$ $(P_{\text{БС}m}^{\text{ф}}, P_{\text{БС}m}^{\text{п}})$
---	--	--	-----	--

$D_B(x_B)$	$D_{B1}(x_{B1})$	$D_{B2}(x_{B2})$	$\dots$	$D_{Bm}(x_{Bm})$
------------	------------------	------------------	---------	------------------

Аналогичный подход используется, если задается условная вероятность поражения цели боевым снаряжением ЗУР ( $P_{BC}$ ) в зависимости от горизонтальной дальности встречи ЗУР с целью ( $x_B$ ).

Полученная вероятность  $P_{BC}$  сравнивается со случайным числом  $\alpha_{25}$ . Если  $\alpha_{25} \leq P_{BC}(x_B, y_B, z_B)$ , то в данной точке встречи ЗУР поразила цель – условная вероятность поражения цели принимается равной единице ( $W_1 = 1$ ), если  $\alpha_{25} > P_{BC}(x_B, y_B, z_B)$  – равной нулю ( $W_1 = 0$ ). Значения  $W_1$  в каждой реализации запоминаются для дальнейшего использования в блоке определения закона распределения вероятности поражения цели.

Законы распределения горизонтальных дальностей пуска и встречи, а также вероятности поражения цели строятся на базе набранной статистики.

Из всех горизонтальных дальностей пуска, полученных в результате решения заданного количества реализаций, выбираются их минимальное ( $x_{п\min}$ ) и максимальное ( $x_{п\max}$ ) значения.

Затем для определения закона распределения горизонтальных дальностей пуска отрезок  $[x_{п\min}; x_{п\max}]$  разбивается на заданное число интервалов точками  $x_{пi}$ , где  $i$  – номер интервала.

Далее суммируется число горизонтальных дальностей пуска, попавших в каждый интервал, и определяется частота попадания:  $f_{пi}(x_{пi}) = n_{пi} / NP$ , где  $n_{пi}$  – число горизонтальных дальностей пуска, попавших в  $i$ -й интервал;  $NP$  – количество всех горизонтальных дальностей пуска, полученных в результате решения заданного числа реализаций.

Закон распределения горизонтальных дальностей пуска определяется как  $F_{п}(x_{п}) = \sum_{i=1}^{KI} f_{пi}(x_{пi})$ , где  $KI$  – число интервалов, необходимое для построения законов распределения.

Суммируя число горизонтальных дальностей встречи, попавших в каждый интервал, определяют частоту попадания:  $f_{Vi}(x_{Vi}) = \frac{n_{Vi}}{NV}$ , где  $n_{Vi}$  – число горизонтальных дальностей встречи, попавших в  $i$ -й

интервал;  $NV$  – число всех горизонтальных дальностей встречи, полученных в результате решения заданного число реализаций.

По частоте попаданий определяется закон распределения горизонтальных дальностей встречи:  $F_B(x_B) = \sum_{i=1}^{KI} f_{Bi}(x_{Bi})$ .

Алгоритм определения закона распределения вероятности поражения цели ЗУР аналогичен алгоритму, приведенному для горизонтальных дальностей пуска и встречи. Так, определяется частота поражения цели в каждом интервале:  $W_{li}(x_{Bi}) = \frac{n_{wi}}{NR}$ , где  $n_{wi}$  – количество фактов поражения в  $i$ -м интервале;  $NR$  – заданное количество реализаций.

Тогда закон распределения вероятности поражения цели одной ЗУР с учетом всего процесса боевой работы комплекса запишется как

$$W_1(x_B) = \sum_{i=1}^{KI} W_{li}(x_{Bi}).$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Каковы возможные методы оценки эффективности действия боевого снаряжения ЗУР?
2. Каков алгоритм оценки эффективности действия боевого снаряжения ЗУР в конкретной точке встречи её с целью?
3. Каков алгоритм оценки эффективности действия боевого снаряжения ЗУР в зависимости от горизонтальной дальности встречи её с целью?
4. Как определяется закон распределения горизонтальных дальностей встречи ЗУР с целью?
5. Как определяется закон распределения вероятности поражения цели ЗУР?
6. Представьте закон распределения вероятности поражения цели одной ЗУР с учетом всего процесса боевой работы комплекса.

### **13.3. Пример использования метода статистических испытаний**

Сущность метода статистических испытаний состоит в создании специального алгоритма, математически воспроизводящего боевой процесс. Моделирующий алгоритм позволяет получать информацию

о состоянии процесса работы ПЗРК на отдельных этапах, начиная с момента обнаружения ВЦ и заканчивая моментом поражения ее боевым снаряжением ЗУР. Вычислительный процесс в этом случае строится по единому алгоритму, отражающему весь цикл функционирования ПЗРК, включая этап поражения цели (рис. 13.1).



Рис. 13.1. Укрупненный алгоритм расчета вероятности поражения цели

Суть вычислительного процесса – построение законов распределения показателей эффективности на каждом этапе работы ПЗРК при известных законах распределения, входных неопределенных условиях внешней среды, воздействие которой также является неопределенным. По результатам моделирования каждого этапа вычисляется оценка показателя эффективности использования ПЗРК при работе по конкретной цели.

Для построения закона распределения оценки показателя эффективности и определения его характеристик необходимо провести заданное количество опытов, сделать выборку репрезентативной и получить состоятельную оценку показателя.

Способ задания законов распределения входных характеристик и параметров внешней среды может быть как аналитическим, так и наиболее простым – табличным. Таблицы составляются для конкретного типа цели, фиксированных параметра и высоты ее полета, конкретного типа помехи и способа ее применения, конкретных заданных внешних условий. Здесь и в дальнейшем определяется случайное число ( $\alpha$  или какое-либо другое), равномерно распределенное в интервале  $[0;1]$ .

Вычислительный процесс организуется следующим образом:

- выбирается вариант функционирования ПЗРК либо на этапах, предшествующих действию ракеты или ее БЧ по цели, либо в период воздействия;
- для каждого рассматриваемого этапа выбирается реализация случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке  $[0,1]$ , с помощью специальной программы «датчика случайных чисел»;
- с помощью этих чисел описываются случайные процессы, отражающие существо рассматриваемого этапа, и рассчитываются значения характеризующих его величин. Рассматриваемое число реализаций задается на основе накопленного опыта.

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 13.1, сначала моделируются процессы функционирования ПЗРК на предпусковом этапе и этапе наведения, предшествующих непосредственному взаимодействию ракеты с целью. Результатом моделирования в этом случае будет закон распределения горизонтальных дальностей встречи ракеты с целью – условная вероятность выхода ракеты в точку встречи с целью в функции горизонтальной дальности полета ЗУР. Второй этап – моделирование воздействия ракеты или ее БЧ по цели. Результатом моделирования будет закон распределения вероятности пора-

жения цели – условная вероятность поражения также в функции горизонтальной дальности.

Представленный на рис. 13.2 алгоритм включает в себя 19 блоков, каждый из которых описывает конкретный этап работы ПЗРК: 1 – исходные данные; 2 – анализ надежности; 3 – выбор варианта расчета; 4 – определение параметров траектории цели; 5 – определение дальности и времени обнаружения цели; 6 – вычисление I рабочего времени и момента готовности к захвату цели ОГС; 7 – определение дальности и времени захвата цели ОГС; 8 – вычисление II рабочего времени и момента готовности к пуску ЗУР; 9 – определение дальности и времени пуска ЗУР; 10 – воздействие линии горизонта; 11 – определение фоновых условий; 12 – воздействие фонов на предпусковом этапе; 13 – определение условий применения ЛТЦ; 14 – воздействие ЛТЦ на предпусковом этапе; 15 – определение дальности и времени встречи ЗУР с целью; 16 – воздействие фонов на этапе наведения; 17 – воздействие ЛТЦ на этапе наведения; 18 – расчет вероятности встречи ракеты с целью; 19 – анализ эффективности действия боевого снаряжения ЗУР. Выход – определение закона распределения вероятности поражения цели ЗУР.

С подробным содержанием каждого блока можно ознакомиться в работе [17]. Здесь рассмотрим содержание только блока 19.

Оценка эффективности действия боевого снаряжения ЗУР позволяет получить закон распределения вероятностей поражения цели в результате подробного анализа поведения ракеты вблизи цели с учетом ее ориентации относительно цели и функционирования непосредственно боевого снаряжения (БЧ и ракеты).

Для этого необходимо:

- определить положение ракеты относительно цели в точке встречи;
- учесть рассеивание координат точек срабатывания ВУ;
- описать внешний облик цели;
- описать внутреннее устройство цели;
- определить момент срабатывания ВУ;
- оценить последствия непосредственного взаимодействия ракеты с целью;
- оценить последствия действия поражающих факторов при подрыве БЧ и топливных остатков ДУ ракеты.

Организация вычислительного процесса в этом случае представлена на рис. 13.3.

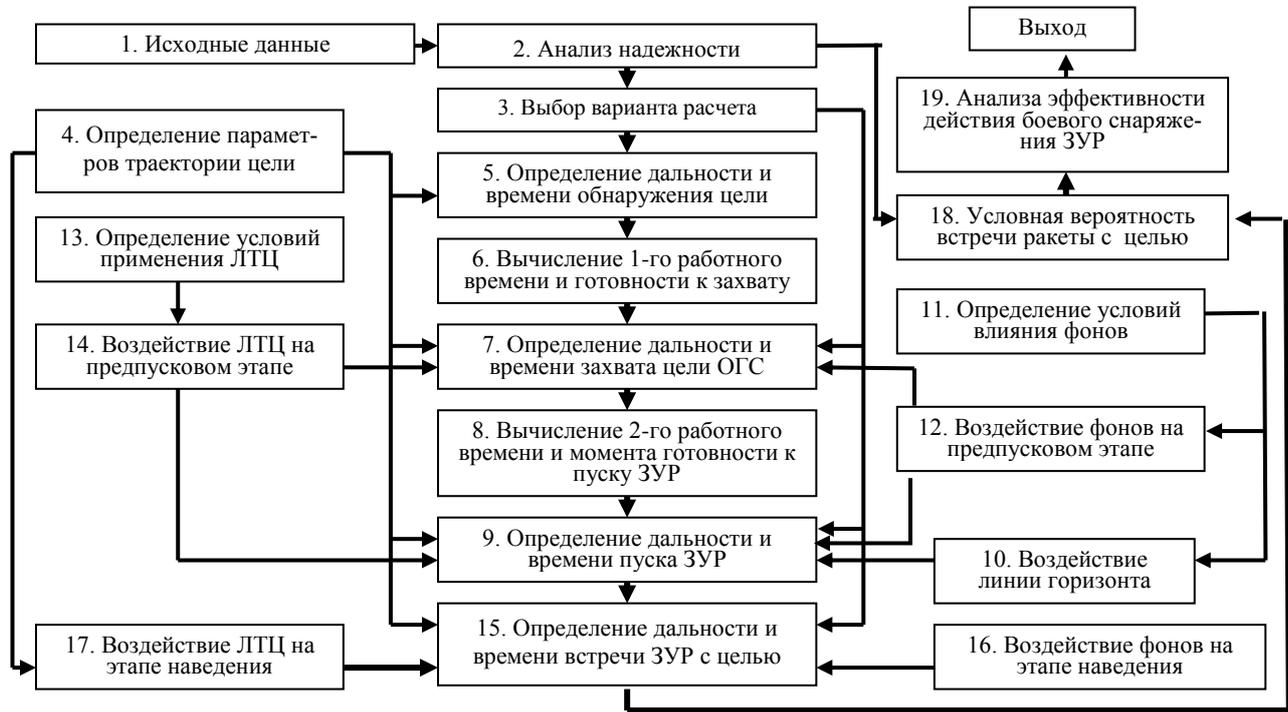


Рис. 13.2. Укрупненный алгоритм моделирования воздействия ракеты по цели

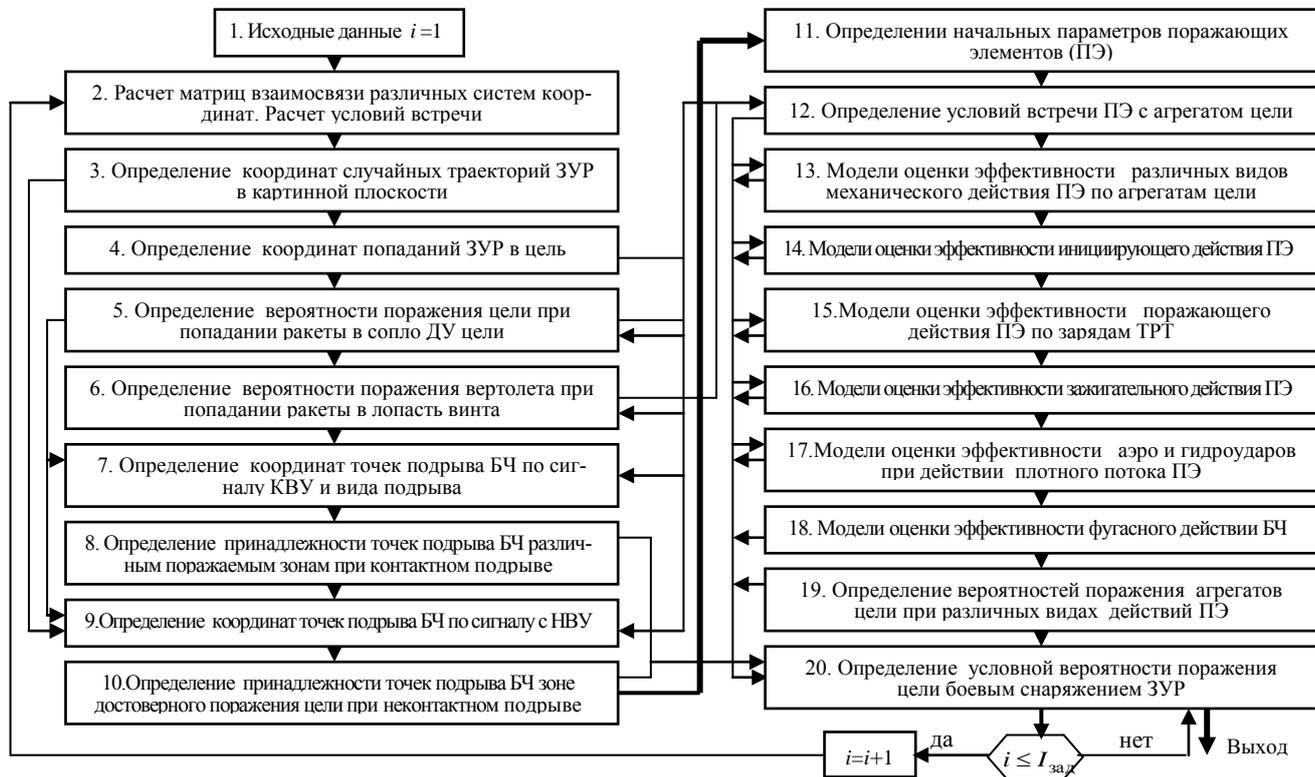


Рис. 13.3. Схема оценки поражающего действия ЗУР

Условия встречи ракеты с целью рассматриваются в *блоке 2*. Одной из величин, определяющих эти условия, является относительная скорость, которая может быть определена через проекции ее вектора на оси земной СК.

При определении взаимного положения ЗУР и цели используются следующие системы координат (все правые):  $X_3 Y_3 Z_3$  – земная СК (начало совпадает с точкой старта ЗУР, ось  $X_3$  произвольно ориентирована в горизонтальной плоскости, ось  $Y_3$  направлена вертикально вверх);  $X_{vp} Y_{vp} Z_{vp}$  – ракетная скоростная СК (начало в центре масс ЗУР,  $X_{vp}$  параллельна вектору скорости ракеты, ось  $Y_{vp}$  – в вертикальной плоскости).

Для формирования условий встречи ракеты с целью используются:

- матрица представления систем координат;
- матрица направляющих косинусов вектора скорости цели в земной СК;
- матрица направляющих косинусов взаимосвязи связанной и скоростной СК цели;
- матрица взаимосвязи ракетной связанной и ракетной скоростной СК в предположении об отсутствии у ракеты крена ( $\gamma_p = 0$ ).

Распределение случайных значений параметров, характеризующих положение ракеты в названных СК, определяется соответствующими соотношениями: для скорости ЗУР; для угла между плоскостью  $X_3 OZ_3$  и вектором скорости ракеты; для угла между осью  $X_3$  и проекцией векторов скорости ЗУР; для угла атаки ЗУР; для угла скольжения ЗУР; для угла крена ЗУР. Случайный параметр записывается в виде, например для угла крена,  $\gamma_p = m_{\gamma_p} + \zeta_6 \sigma_{\gamma_p}$ , где  $\zeta_i$  – случайное число, распределенное по нормальному закону с  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ ,  $m$  – математическое ожидание и  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Аналогичные соотношения, характеризующие положение цели: для скорости цели, для углов между плоскостью  $X_3 OZ_3$  и вектором скорости цели, между осью  $X_3$  и проекцией вектора скорости цели, углов атаки, скольжения и крена цели.

Координаты точек наведения (*блок 3*) могут определяться в процессе решения или задаваться произвольно. Причем могут находить-

ся или задаваться одна или две точки (по количеству двигателей у цели).

Если задана одна точка наведения, то вероятность наведения принимается равной:  $p_n = p_1 = 1$  (при  $n = 1$ ).

Если координаты точек наведения определяются в процессе решения, то точка наведения выбирается на кромке сопла двигателя цели (ближнего двигателя при наличии у цели двух двигателей).

Координаты случайной точки наведения в картинной плоскости СК XYZ определяются как  $y_n = \bar{y}_n + \zeta_{13}\sigma_{y_n}$ ,  $z_n = \bar{z}_n + \zeta_{14}\sigma_{z_n}$ , где  $\zeta_i$  – случайное число, распределенное по нормальному закону с  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ . Относительно этой точки определяются координаты случайной ( $i$ -й) траектории центра масс ЗУР в картинной плоскости СК XYZ. Далее решается задача попадания ЗУР в цель. ЗУР представляется в виде отрезка прямой, разделенного на  $k$  частей (рис. 13.4):  $k = 0 \dots k_{\max}$ . Поскольку решается задача поражения ЗУР цели как объемного объекта, то необходимо определить координаты траектории  $k$ -й точки ЗУР в системе XYZ.

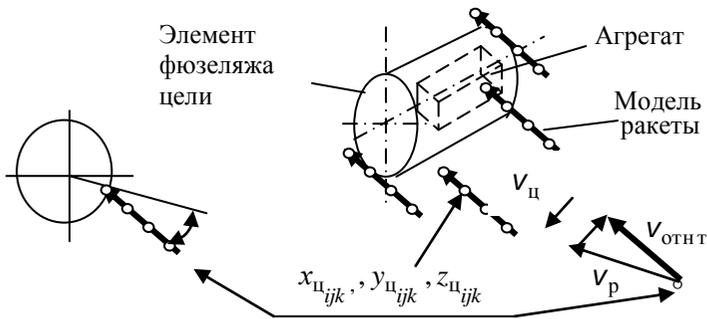


Рис. 13.4. Определение координат попаданий ЗУР в цель

Координаты "потенциального" попадания ЗУР в цель (**блок 4**) необходимы либо для определения точки подрыва БЧ для ЗУР с КВУ, либо для ЗУР с НВУ, не сработавшим до прямого попадания в цель (отсек, агрегат).

При контактном подрыве БЧ ЗУР возможны попадание ракеты в форсажную камеру двигателя цели, прямой контакт ракеты носиком с целью, соударение корпуса ракеты с целью, соударение ракеты с ло-

пастями несущего или хвостового винтов вертолета. Во всех случаях ЗУР представляется в виде набора равноотстоящих по продольной оси ракеты  $X_p$  точек с координатами  $x_{цijk}, y_{цijk}, z_{цijk}$  (см. рис. 13.4).

Подлет ракеты к цели возможен с любого направления при стрельбе навстречу или вдогон (сверху, снизу, слева, справа).

Определение координат попадания ЗУР в контур  $j$ -го отсека цели основано на поиске ближайшей точки пересечения прямой, ориентированной по вектору относительной скорости, и поверхности 2-го порядка, аппроксимирующей отсек.

При наличии ограничений, наложенных на поверхности отсеков, возможно попадание ЗУР в ограничительную плоскость, перпендикулярную одной из осей. В этом случае выбор истинной точки соударения из нескольких (до четырех) точек пересечения траектории ЗУР с отсеком неоднозначен и требует дополнительного анализа.

В случае попадания определяются углы между нормалью к поверхности цели в точке соударения и вектором относительной скорости (продольной осью ЗУР).

Координата  $x$  точки пересечения  $k$ -й точки  $i$ -й траектории ЗУР с поверхностью  $j$ -го отсека цели находится на основании совместного решения уравнения поверхности, описывающего  $j$ -й отсек цели, и уравнения траектории  $k$ -й точки ЗУР в системе  $X_{ц}Y_{ц}Z_{ц}$ .

Определить принадлежность координат точек попадания ЗУР всем отсекам необходимо для всех просматриваемых траекторий ракеты:  $k(k \leq k_{\max})$  и  $j(j \leq j_{\max})$ .

После перебора возможных точек пересечения  $k$ -х точек ракеты со всеми  $j$ -ми отсеками из массива координат этих точек выбирается точка, находящаяся на минимальном расстоянии от цели:

$$d_{ijk} = \min_j \min_k \{d_{ijk}\}.$$

При попадании в плоскость среза сопла двигателя определяется факт влета ЗУР в форсажную камеру. Условиями этого являются пересечение ограничительной плоскости, перпендикулярной оси  $X_{ц}$ , стрельба вдогон и  $x_{цijk} = x_{цij}$ . В этом случае за координаты точки влета принимаются координаты центра сопла и далее рассчитываются параметры взаимодействия ЗУР с элементами форсажной камеры.

При попадании в поверхность, аппроксимирующую любое положение лопастей несущего или хвостового винтов вертолета, опреде-

ляется факт попадания ЗУР в лопасть. При этом несущий и хвостовой винты аппроксимируются эллипсоидами, моделирующими любое положение лопастей. Центр эллипсоида совпадает с центром вращения, а две его полуоси равны длине лопастей.

Если имеет место попадание в несущий или хвостовой винты, то за координаты точки пересечения принимаются те же координаты  $x_{цi} = x_{цijk}$ ,  $y_{цi} = y_{цijk}$ ,  $z_{цi} = z_{цijk}$  и разыгрывается определение факта попадания в лопасть одного из них.

Таким образом, координаты попаданий ЗУР в цель определяются для случаев:

- пересечения траектории ЗУР с целью (в том числе если есть КНВУ, но характеристики его неизвестны, и если есть КВУ, а КНВУ отключено);
- индикации цели лучом НВУ;
- пересечения траектории ПЭ с целью.

В **блоке 5** на основании информации о наличии пересечения траектории ЗУР с плоскостью среза сопла двигателя устанавливается факт влета ЗУР в форсажную камеру (ФК) двигателя цели. В этом случае необходимо определить координаты попадания ЗУР либо во внутреннюю стенку ФК, либо в турбину.

Цель может иметь по крайней мере два двигателя. Тогда встает вопрос, в какой из них попадет ракета.

Проверка наличия у цели одного или двух двигателей проводится на основании анализа:  $|z_{c1}| + |z_{c2}| > 0$ , при выполнении этого условия – два двигателя, иначе – один, где  $z_{c1}$  и  $z_{c2}$  – координаты центров сопел двигателей. За координаты центра сопла, в плоскость среза которого произошло попадание носика ЗУР, принимаются удовлетворяющие одному из условий.

В **блоке 6** определяется случайное положение первой лопасти несущего ( $\alpha_{ц0}$ ) и хвостового ( $\alpha_{x0}$ ) винтов в момент пролета ЗУР картинной плоскости.

При известных координатах точки попадания, относительной скорости и углах соударения после срабатывания КВУ (**блок 7**) определяются координаты точки подрыва БЧ и его вид (заглубленный или поверхностный).

Возможны следующие положения точки подрыва БЧ по сигналу с КВУ относительно цели и внутри нее (см. рис. 13.4):

- при соударении носика ЗУР с корпусом цели;
- при соударении носика ЗУР с корпусом цели и последующем проникании за обшивку отсека;
- при касательном соударении корпуса ЗУР с целью;
- при влете ЗУР в форсажную камеру двигателя;
- при соударении ЗУР с лопастями винтов вертолета.

В случае соударения корпуса ЗУР с целью необходимо определить факт срабатывания БЧ для рассматриваемых типов ВУ. Команда на подрыв БЧ формируется контактными (КВУ) или неконтактными (НВУ) взрывательными устройствами.

КВУ могут быть следующих типов:

- на наведенных токах, в котором исполнительный сигнал на подрыв БЧ вырабатывается при проникании центра БЧ за металлическую преграду (I тип);
- магнитно-электрического типа, в котором сигнал на подрыв БЧ поступает с некоторой задержкой (II тип);
- комбинированного типа (КВУ на наведенных токах плюс КВУ магнитно-электрического типа), в котором КВУ II типа выступает в качестве дублирующего, если не сработал первый (III тип).

НВУ могут быть радиолокационными, лазерными, оптическими.

Область срабатывания НВУ формируется лучами ограниченной длины, равной дальности срабатывания НВУ, расположенных под некоторым заданным углом наклона к оси ЗУР. Она может представлять собой конус или систему лучей, с описанными выше параметрами. В простейшем случае срабатывание НВУ происходит, если хотя бы один из его лучей пересечется с поверхностью цели и величина отраженного сигнала будет достаточна для срабатывания исполнительной схемы. С целью повысить помехозащищенность подрыв БЧ может осуществляться только после накопления определенного числа отраженных импульсов, что реализуется введением так называемой конструктивной задержки, величина которой зависит от способа обработки и анализа сигналов и инерционности радиоэлементов.

Для повышения эффективности НВУ может быть предусмотрена также функциональная задержка выдачи команды на подрыв БЧ, которая задается искусственно и зависит от степени учета типа цели и условий ее полета, а также от условий встречи ракеты с целью. Эта задержка может определяться на борту ЗУР или на земле и затем передаваться на борт, либо устанавливаться на земле до старта ЗУР и не изменяться в полете.

При промахе ЗУР окончание процесса функционирования НВУ определяется максимальной дальностью, ограничивающей область срабатывания НВУ.

Поскольку в точке попадания толщина обшивки неизвестна, то при оценке вида подрыва необходимо предусмотреть определение случайного значения приведенной к дюралю толщины обшивки планера. Ее можно задать в исходных данных в зависимости от наличия толщины для различных участков отсеков цели.

Рассмотрим некоторые возможные случаи подрыва.

**Соударение носика ЗУР с корпусом цели и последующее проникание за обшивку отсека.** Это случай с неясными исходами пробития преграды или его отсутствия и, как следствие, нахождения места подрыва БЧ.

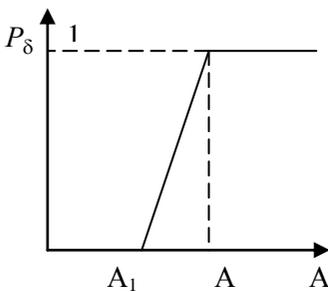


Рис. 13.5. Закон распределения вероятности пробития

Будем считать закон распределения вероятности пробития преграды корпусом ЗУР при попадании в цель ( $k=0$ ) линейным в функции рассчитываемого параметра  $A$ , значение которого вычисляется в соответствующей реализации при определении пробиваемой толщины с вероятностью

$$\delta_{пр} = f(P_\delta): A = \frac{v_{отн}^{\Lambda_1} \cos \alpha_p}{(\delta_{пр} \gamma)^{\Lambda_2}}, \text{ где } \gamma - \text{плотность материала обшивки}$$

планера цели;  $\Lambda_1, \Lambda_2$  – коэффициенты, получаемые опытным путем; приближенно можно считать  $\Lambda_1 = 1,5$ ,  $\Lambda_2 = 1,33$ .

По значению  $A$  определяется вероятность пробития преграды корпусом ЗУР при попадании в цель ( $k=0$ ):

$$P_\delta = \begin{cases} 1 & \text{при } A > A_2, \\ \frac{A - A_1}{A_2 - A_1} & \text{при } A_1 \leq A \leq A_2, \\ 0 & \text{при } A < A_1, \end{cases}$$

где  $A_1$  и  $A_2$  также получают из опыта; приближенно можно считать  $A_1 = 12$ ,  $A_2 = 0,28$ .

При попадании ракеты в цель возможен рикошет. Критический угол рикошетирования определяется зависимостью

$\alpha_{кр} = \Lambda_3 \cdot e^{-\Lambda_4 \cdot \delta_{пр}}$  рад, где коэффициенты  $\Lambda_3, \Lambda_4$  определяются опытным путем. Приближенно можно считать  $\Lambda_3 = 1,57, \Lambda_4 = 0,03$ .

При встрече ракеты с целью возможен поверхностный и заглубленный подрыв БЧ, что определяется особенностями работы КВУ и отсутствием или наличием рикошета. Вероятность заглубления БЧ при условии пробития преграды:

$$P_3 = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha_p \leq \alpha_{кр} , \\ 0 & \text{при } \alpha_p > \alpha_{кр} . \end{cases}$$

Тогда вероятность заглубленного подрыва БЧ:

$$P_{зп} = P_{пр} P_3 .$$

Если однозначно определено, что имеет место заглубленный подрыв БЧ ( $P_{зп} = 1$ ), то координаты положения КВУ в момент попадания носика ЗУР в цель определяются из соотношений  $\bar{x}_{ц_i}^{кву} = x_{ц_i} - L_{кву} l_{x_{ц_i}}^p$ ,  $\bar{y}_{ц_i}^{кву} = y_{ц_i} - L_{кву} l_{y_{ц_i}}^p$ ,  $\bar{z}_{ц_i}^{кву} = z_{ц_i} - L_{кву} l_{z_{ц_i}}^p$ , где  $L_{кву}$  – расстояние от носика ЗУР до центра КВУ.

Если вероятность заглубления БЧ в цель  $P_{зп} < 1$ , то ее значение разыгрывается и в зависимости от результата принимается решение либо о заглубленном, либо о поверхностном подрыве БЧ.

Координаты точки подрыва БЧ при заглубленном подрыве определяются следующим образом: сначала определяются координаты точки пересечения траектории центра КВУ с поверхностью цели  $x_{ц_i}^{кву}, y_{ц_i}^{кву}, z_{ц_i}^{кву}$ , аналогично порядку и соотношениям, приведенным при определении координат попаданий ЗУР в цель, с подстановкой вместо координат  $x_{ц_0}, y_{ц_0}, z_{ц_0}$  соответственно  $\bar{x}_{ц_i}^{кву}, \bar{y}_{ц_i}^{кву}, \bar{z}_{ц_i}^{кву}$ , принимая  $x_{ц_i}^{кву} = x_{ц_{ijk}}, y_{ц_i}^{кву} = y_{ц_{ijk}}, z_{ц_i}^{кву} = z_{ц_{ijk}}$ . Тогда координаты точки подрыва БЧ будут равны:  $x_{ц_i}^{пк} = x_{ц_i}^{кву} + (L_{кву} - L_{бч}) l_{x_{ц_i}}^p$ ,  $y_{ц_i}^{пк} = y_{ц_i}^{кву} + (L_{кву} - L_{бч}) l_{y_{ц_i}}^p$ ,  $z_{ц_i}^{пк} = z_{ц_i}^{кву} + (L_{кву} - L_{бч}) l_{z_{ц_i}}^p$ , где  $L_{бч}$  – расстояние от носика ЗУР до центра БЧ.

При поверхностном подрыве БЧ  $P_{зп}=0$  координаты точки подрыва БЧ определяются в зависимости от типа срабатываемого КВУ. Если сработало КВУ на наведенных токах или если КВУ комбинированного типа и  $\alpha_p > \alpha_{кр}$ , то за координаты принимаются  $x_{ц_i}^{пк} = x_{ц_i}$ ,  $y_{ц_i}^{пк} = y_{ц_i}$ ,  $z_{ц_i}^{пк} = z_{ц_i}$ .

**Соударение корпуса ЗУР с целью по касательной.** При касательном соударении  $k$ -й ( $k>0$ ) частью корпуса ЗУР с целью срабатывает КВУ на наведенных токах. Тогда, задавшись законом распределения вероятности срабатывания КВУ, в зависимости от того, какой частью корпуса ЗУР произошло соударение с целью ( $P_{k_{ср}}$  в функции  $\Delta L$  для соответствующего расстояния от носика ракеты  $k \cdot \Delta L$ ), определяются координаты  $x_{ц_i}^{пк}$ ,  $y_{ц_i}^{пк}$ ,  $z_{ц_i}^{пк}$  для поверхностного подрыва. Для определения принадлежности точек подрыва БЧ различным поражаемым зонам цели при контактном подрыве (**блок 8**) вся поверхность цели (или отсека) разбивается на зоны, внутри которых подрыв БС приводит к повреждениям цели, соответствующим определенному типу поражения. Каждому участку поражаемой зоны соответствует свой признак поражения.

При определении вероятности поражения цели необходимо учитывать не только вид подрыва БЧ, но и подрыв остатков топлива двигателя ЗУР. Предусмотрено задание зон для трех значений остатков топлива ДУ: нулевого и двух нормированных. Остатки топлива ДУ задаются в виде функции полетного времени ЗУР до точки встречи с целью и выбираются по его значению  $t_{пол} : t_{пол} = m_{t_{пол}} + \zeta_{19} \sigma_{t_{пол}}$ , где  $m_{t_{пол}}$ ,  $\sigma_{t_{пол}}$  – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение полетного времени ЗУР до точки встречи ЗУР с целью;  $\zeta_{19}$  – случайное число.

В случае непоражения цели ни по какому типу, кроме А, при поверхностном подрыве БЧ полученная информация используется при расчете поражения цели при неконтактном подрыве для определения возможности поражения соседних отсеков за счет осколочно-фугасного действия.

В **блоке 9** рассматривается модель работы НВУ, позволяющая достаточно точно аппроксимировать работу таких типов взрывателей,

как радиолокационный, лазерный, оптический, с геометрически простой областью срабатывания (конус, система лучей).

Начиная с заведомо дальней точки, с определенным шагом вдоль относительной траектории ЗУР формируется область срабатывания лучей.

Так же как и ранее, необходимо знать координаты "потенциального" попадания ЗУР в цель, которые определяют точки подрыва БЧ ЗУР с НВУ, не сработавшим до прямого попадания в цель. В случае попадания определяются углы между нормалью к поверхности цели в точке соударения и вектором относительной скорости (продольной осью ЗУР). При промахе ЗУР окончание процесса моделирования работы НВУ определяется максимальной дальностью, ограничивающей область срабатывания НВУ.

Вероятность безотказной работы НВУ принимается равной:  $P_{\text{вбр}}^{\text{НВУ}} = 1$ , если случайное число  $\eta_i \leq P_{\text{вбр}}^{\text{НВУ}}$ ; в противном случае осуществляется переход к новой реализации, считая, что в составе ЗУР имеется только контактное взрывательное устройство или что неконтактное отключено.

Область срабатывания лучей НВУ вдоль относительной траектории ЗУР может быть сформирована с постоянным шагом  $\Delta x_{\text{отн}}$ , или шаг смещения координаты вдоль оси  $X$  системы  $XYZ$  может рассчитываться как  $\Delta x_{\text{отн}} = v_{\text{отн}} \cdot \tau_{\text{и}}$ , где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса НВУ.

Случайное значение минимального расстояния, ограничивающего область срабатывания НВУ вдоль оси  $X$ , определится из соотношения  $x_{\text{min}} = x_{\text{min}} + \eta_i \cdot \Delta x_{\text{отн}}$ , где  $0 \leq \eta_i \leq 1$ ;  $x_{\text{min}}$ ,  $x_{\text{max}}$  – минимальное и максимальное значения дальностей вдоль оси  $X$ , ограничивающих область срабатывания НВУ;  $\Delta x_{\text{отн}}$  – шаг смещения координаты вдоль оси  $X$  системы  $XYZ$ .

Могут быть заданы дальности срабатывания НВУ или закон срабатывания НВУ по дальности. Если задаются дальности срабатывания НВУ, то с ними сопоставляются соответствующие вероятности срабатывания НВУ  $P_{\text{ср}}^{\text{НВУ}}$ . Если задается закон срабатывания НВУ по дальности, то расчет  $P_{\text{ср}}^{\text{НВУ}}$  ведется с учетом полученной дальности.

Если истинная координата дальности срабатывания НВУ  $d_j^{л}$  лежит в пределах между  $D_{ср1} \leq d_j^{л} < D_{ср2}$ , то вероятность срабатывания НВУ можно определить как

$$P_{ср}^{НВУ} = \frac{D_{ср2} - d_j^{л}}{D_{ср2} - D_{ср1}}.$$

В других случаях необходимо задаться зависимостью  $P_{ср}^{НВУ} = f(d_j^{л})$  и приступить к новой реализации числа отраженных импульсов:

$$N_{отр\ им} = N_{отр\ им} + 1, \quad N_{им} = N_{им} + 1,$$

где  $N_{отр\ им}$  – число отраженных от цели импульсов, начальное значение  $N_{отр\ им} = 0$ ;  $N_{им}$  – число всех импульсов, начиная с первого отраженного, начальное значение  $N_{им} = 0$ .

В зависимости от типа цели (крупноразмерная или малоразмерная) и типа стрельбы (навстречу или вдогон) необходимо назначить или рассчитать время функциональной задержки выдачи команды на подрыв БЧ –  $\tau_{зф}$ .

Принадлежность точек подрыва БЧ зоне достоверного поражения при неконтактном подрыве определяется в **блоке 10**.

Напомним, что под зоной достоверного поражения понимается некоторая пространственная область, внутри которой при подрыве БЧ с учетом подрыва остатков топлива ДУ, событие, заключающееся в поражении цели за счет совместного осколочно-фугасного действия, является достоверным.

Геометрически зона достоверного поражения представляет собой пространственную область, ограниченную поверхностью исходного отсека, поверхностью, эквидистантной поверхности исходного отсека и отстоящей от нее на некотором расстоянии, и поверхностями, проходящими по границам исходного отсека перпендикулярно его поверхности.

Начальные параметры поражающего элемента БЧ определяются в **блоке 11**. В случае непоражения цели при прямом попадании ЗУР в цель и при подрыве БЧ в зоне достоверного поражения координаты точки подрыва БЧ используются для оценки поражения цели ПЭ БЧ.

Начальные параметры поражающего элемента определяются исходя из его распределения и начальных скоростей в угле разлета, полученных в статике. Начальная скорость ПЭ в угле разлета может быть оценена по известной зависимости:  $v_p = 0,5 D \sqrt{\varphi_1 \alpha / (2 + \alpha / \varphi)}$  (см. подразд. 12.3).

Поражающие элементы, образующиеся при разрушении корпуса, могут иметь произвольную форму (разные миделево сечение, суммарную площадь поверхности), разные массу, начальные скорости и углы разлета, скорости и углы подхода к цели в момент контакта с ней.

Количество осколков массой 1 г и более  $N > 1$  можно определить по формуле

$$N_{>1} = \beta \frac{m_{\text{БВ}}}{r_{\text{ср}}} \cdot \frac{B}{\sqrt{\sigma_{\text{в}}}},$$

где  $\beta = 0,45 \dots 0,65$  – опытный коэффициент, зависящий от свойств взрывчатого вещества;  $B = 0,3 \dots 0,4$  – коэффициент, зависящий от конструкции БЧ;  $r_{\text{ср}}$  – средний радиус камеры корпуса БЧ;  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности материала корпуса БЧ на разрыв.

Структура осколочного потока БЧ характеризуется распределением поражающих элементов по углу разлета:  $N_{\text{пэ}}(\psi_{r_{\text{ст}}})$ , общим количеством ПЭ  $N_{\text{пэ}}$  и распределением ПЭ по весовым группам:  $N_{\text{пэ}}(q_r)$ .

Для каждого ПЭ выбираются случайные угол вылета, начальная скорость и вес, определяются направляющие косинусы траектории в различных системах координат, скорость в динамике (с учетом скорости ЗУР), относительная скорость.

Применительно к БЧ ЗУР ПЗРК распределение ПЭ по весовым группам может быть организовано в диапазоне  $0,2 \leq q_{r_{\text{мин}}} \leq 0,5$ ;

$0,6 \leq q_{r_{\text{макс}}} \leq 5$  и задано либо таблично, либо законом.

Для заданной весовой группы ПЭ по случайному числу  $\eta_{13}$ , равномерно распределенному в интервале  $[0;1]$ , по данным распределений  $N_{\text{пэ}}(\psi_{r_{\text{ст}}}) = f(\eta_{13})$  и  $v_{\text{ст0}} = f(\eta_{13})$  и  $N_{\text{пэ}}(q_r) = f(\eta_{13})$  определяются случайные значения угла  $\psi_r$  в меридиональной плоскости, начальной скорости в статике  $v_{\text{ст}r}$ , вес  $q_r$  и площадь миделева сечения  $S_{\text{м}}^T$ .

При определении условий встречи ПЭ с агрегатом цели и предельной толщины пробития монолитной дюралевой преграды ПЭ (блок 12) сначала оцениваются возможность и координаты попадания в цель (отсек) каждого ПЭ. При этом за начальные значения координат цели (отсека) принимаются координаты цели (отсека), полученные при неконтактном подрыве БЧ.

Далее определяются скорость соударения ПЭ с первой преградой, коэффициент формы ПЭ, возможность и координаты попадания ПЭ в уязвимый агрегат, предельная толщина монолитной дюралевой преграды, которую пробивает ПЭ при нормальном соударении, моделируются воздействия всех ПЭ и определяются вероятности поражения агрегатов цели за счет действия различных поражающих факторов БЧ.

Поражение ВЦ за счет механического действия ПЭ по ее ЖВА происходит при пробитии экранирующих, как правило разнесенных, преград и нанесении повреждений ЖВА, приводящих к выводу их из строя.

Способность ПЭ пробить преграду оценивается сопоставлением его удельной кинетической энергии (энергии, отнесенной к средней площади поперечного сечения осколка) и энергии, требуемой для пробития преграды заданных толщины и материала. Удельная кинетическая энергия ПЭ на разных расстояниях от точки подрыва БЧ различна:  $E_{уд} = q_r v_r^2 / (2S_{ср})$ .

Масса ПЭ и его средняя площадь миделева сечения связаны соотношением  $S_{ср} = k_{\phi} q_r^{2/3}$ , где  $k_{\phi}$  – коэффициент формы ПЭ. Для компактных ПЭ  $k_{\phi_{мин}} = k_{\phi_{макс}} = k_{\phi} = (S_{п}/4)(\rho_0/q_r)^{2/3}$ , где  $\rho_0$ , г/см<sup>3</sup> – плотность материала ПЭ;  $S_{п}$  – площадь полной поверхности ПЭ. Для некомпактных ПЭ при известной их ориентации в момент соударения с первой преградой  $k_{\phi_{мин}} = k_{\phi_{макс}} = k_{\phi} = S_{м}(\rho_0/q_r)^{2/3}$ . Для некомпактных ПЭ при неизвестной (случайной) их ориентации в момент соударения с первой преградой  $k_{\phi_{макс(мин)}} = S_{м_{макс(мин)}}(\rho_0/q_r)^{2/3}$ , где  $S_{м_{макс}}$  и  $S_{м_{мин}}$  – соответственно наибольшее и наименьшее из всевозможных значений площади миделя ПЭ –  $S_{м}$ .

После определения возможности и координат попадания в цель (отсек) каждого ПЭ определяются:

- скорость соударения ПЭ с первой преградой;
- коэффициент формы ПЭ;
- возможность и координаты попадания ПЭ в уязвимый агрегат;
- предельная толщина монолитной дюралевой преграды, которую пробивает ПЭ при нормальном соударении.

Поскольку агрегат моделируется параллелепипедом, то по соответствующему алгоритму последовательно просматриваются все координаты пересечения траектории ПЭ с гранями параллелепипеда.

Предельная толщина пробития монолитной дюралевой преграды конечной толщины при нормальном ( $\bar{\alpha} = 90^\circ$ ) соударении ПЭ с преградой  $h_{пр}$  ( $h_{пр\min}, h_{пр\max}$ ) определяется из соотношений

$$h_{пр\min(\max)} = \frac{A}{1 + 1,55 \cdot 10^{-4} (v_{Br} - 800)^{4/3}} \text{ при } v_{Br} > 800 \text{ м/с,}$$

где  $A = \frac{q_r^{1/2} \cdot \rho_0^{2/3} \cdot v_{Br}^2 \cdot 10^{-2}}{2k_{\phi\max(\min)}' \cdot E_d}$ ,  $k_{\phi\max(\min)}' = 1,21 + (k_{\phi\max(\min)} - 1,21) \cdot 800/v_{Br}$ ,

$$h_{пр\min(\max)} = A \text{ при } v_{Br} < 800 \text{ м/с.}$$

Значение коэффициента, учитывающего материал преграды,  $E_d$ , берется из соответствующих таблиц (например, табл. 13.2).

Таблица 13.2

**Коэффициенты  $E_d$ , учитывающие материал преграды**

$\tau$	$E_j$	$\lambda_M^{\text{общ}}$	$E_d, \text{Дж/см}^3$
1			
2			
⋮			
$\tau_{\max_1}^{\text{МД}}$			

В таблице  $\tau_{\max_1}^{\text{МД}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет пробивного действия ПЭ (механическое действие);  $E_j - E_j^t$  – признак принадлежности  $\tau$ -го агрегата  $j$ -му отсеку;  $\lambda_M^{\text{общ}}$  – признак материала обшивки.

$\lambda_{\text{м}}^{\text{общ}} = 1$  – для углепластиков (КМ) и оргстекла;

$\lambda_{\text{м}}^{\text{общ}} = 2$  – для обшивок из алюминиевых сплавов,  
 $E_{\text{д}} = 1180 \text{ Дж/см}^3$ ;

$\lambda_{\text{м}}^{\text{общ}} = 3$  – для обшивок из титановых сплавов,  $E_{\text{д}} = 1770 \text{ Дж/см}^3$ ;

$\lambda_{\text{м}}^{\text{общ}} = 4$  – для стальных обшивок;  $E_{\text{д}} = 2360 \text{ Дж/см}^3$ .

В *блоке 13* используется модель оценки эффективности механического действия ПЭ (механического, иницирующего, зажигательного, по зарядам РДТТ АР, аэрогидроударного и фугасного действий ПЭ соответственно).

Обозначим через  $\tau_{\text{мах}}^{\text{мд}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{ин}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{трт}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{зд}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{ау}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{гу}}, \tau_{\text{мах}}^{\text{фд}}$  максимальное число поражаемых агрегатов цели:

$\tau_{\text{мах1}}^{\text{мд}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет пробивного действия ПЭ (механическое действие);

$\tau_{\text{мах2}}^{\text{мд}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет впрыска топлива в воздушные каналы ГТД при действии ПЭ (механическое действие);

$\tau_{\text{мах3}}^{\text{мд}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет внешней в них ПЭ кинетической энергии (механическое действие);

$\tau_{\text{мах}}^{\text{ин}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет иницирующего действия ПЭ по зарядам ВВ;

$\tau_{\text{мах1}}^{\text{трт}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет действия ПЭ по зарядам РДТТ АР;

$\tau_{\text{мах2}}^{\text{трт}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет разрыва корпуса работающего РДТТ при действии ПЭ;

$\tau_{\text{мах3}}^{\text{трт}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет взрывного горения ТРТ при воздействии потока ПЭ;

$\tau_{\text{мах}}^{\text{зд}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет воспламенения топлива и взрыва его паров при действии ПЭ;

$\tau_{\text{мах}}^{\text{ау}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет аэроудара при действии потока ПЭ по конструкции планера;

$\tau_{\max}^{\text{гу}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет гидроудара при действии потока ПЭ;

$\tau_{\max}^{\text{фд}}$  – последний номер из агрегатов, поражаемых за счет фугасного действия взрыва ОФБЧ по конструкции планера.

Суммарные наименьшая и наибольшая толшины разнесенных преград в дюралевом эквиваленте ( $h_{\min}^*$ ,  $h_{\max}^*$ ) с учетом углов подхода ПЭ:

$$h_{\min}^* = \frac{h_{\min}}{k_{\alpha}}, \quad h_{\max}^* = \frac{h_{\max}}{k_{\alpha}},$$

где  $k_{\alpha} = 0$ , если  $\bar{\alpha} \leq \alpha_1$ ,  $k_{\alpha} = \frac{\bar{\alpha} - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$ , если  $\bar{\alpha} < \alpha_2$ ,  $k_{\alpha} = 1$ , если

$\bar{\alpha} > \alpha_3$ ,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – углы для определения коэффициента, учитывающего влияние угла подхода ПЭ на его пробивную способность. Полученные экспериментальные значения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  равны  $9^\circ, 35^\circ$  и  $90^\circ$  соответственно.

Условная вероятность поражения агрегатов цели:

$$P_{\text{пр}\bar{r}_i}^{\tau} = 0, \quad (P_{\bar{r}_i}^{\tau})_1^{\text{МД}} = 0 \text{ если } k_{\alpha} = 0, \quad \text{или } h_{\Sigma_{\max}} \leq h_{\min}^*,$$

$$P_{\text{пр}\bar{r}_i}^{\tau} = 1, \text{ если } h_{\Sigma_{\max}} \geq h_{\max}^*;$$

$$P_{\text{пр}\bar{r}_i}^{\tau} = \frac{h_{\Sigma_{\max}} - h_{\min}^*}{h_{\Sigma_{\max}} - h_{\Sigma_{\min}} + h_{\max}^* - h_{\min}^*}, \quad \text{если } h_{\Sigma_{\max}} \leq h_{\max}^*.$$

Вероятность поражения агрегата при условии накрытия его соответствующей площадью:

$$(P_{\bar{r}_i}^{\tau})_1^{\text{МД}} = P_{\text{пр}\bar{r}_i}^{\tau} \cdot \frac{\bar{S}_r^y}{S_r},$$

где  $S_r$  – площадь грани с  $\mu$ -го направления;  $\bar{S}_r^y = S_r^y$ ;  $S_r^y$  – наибольшая уязвимая площадь грани  $\tau$ -го агрегата с  $\mu$ -го направления. Если агрегатами являются топливные и масляные системы в РД и магистрали управления, то  $\bar{S}_r^y = S_r \cdot (1 + 0,25 \cdot S_M^{1/2})$ . Если в текущей реализации  $\eta \leq (P_{\bar{r}_i}^{\tau})_1^{\text{МД}}$ , то вероятность поражения агрегатов цели,

поражаемых за счет пробивного действия ПЭ, принимается равной единице  $(P_{i_1}^{\tau})^{\text{МД}} = 1$ , соответственно  $\chi_i = \Theta_{\tau}$  и  $(P_i^{\tau})^{\text{МД}} = 1$ , иначе  $((P_{i_1}^{\tau})^{\text{МД}} = 0)$ .

Для агрегатов, поражаемых иницирующим действием ПЭ (**блок 14**), для расчета вероятности поражения используются такие характеристики уязвимости, как толщина преграды, экранирующей боевую нагрузку, и толщина оболочки заряда ВВ, которые характеризуют защищенность заряда ВВ оболочкой и экраном в стальном эквиваленте, а также коэффициенты, характеризующие структуру оболочки заряда и достаточный уровень взрывчатых преобразований ВВ, при котором поражается цель.

Прямая надежная передача детонации от активного заряда через воздух к пассивному заряду бризантного ВВ возможна при давлениях не менее сотен МПа и происходит на очень малых дистанциях порядка 30...40 см, при контакте зарядов или при действии продуктов взрыва активного ВВ.

Критерием возможности детонации является критическое давление чувствительности конденсированных ВВ к детонации (табл. 13.3).

Таблица 13.3

Взрывчатое вещество	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$p_{\text{кр}}$ , ГПа
Тротил	1,6	1,96
Тротил	1,34	0,77
Гексоген	1,74	1,78
Тетрил	1,7	2,55
ТГ 50/50	1,7	2,94
Аммонит ПЖВ-20	1,34	0,70
Победит ВП-3	1,34	0,56

Такие цели, как самолеты-носители, могут иметь на борту авиационное вооружение (бомбы, ракеты), снабженное двигателями ТТ. В этом случае возможно поражение агрегатов цели за счет иницирующего действия ПЭ по зарядам ТРТ РДТТ, находящихся в составе управляемых и неуправляемых ракет на борту самолета-носителя, а также за счет разрыва корпуса работающего РДТТ ракеты и взрывного горения ТРТ при воздействии потока ПЭ. В качестве характеристик уязвимости в этом случае дополнительно используются величина свободного объема камеры сгорания РДТТ, а также наименьшее и наибольшее критические значения удельной энергии ПЭ, при которых разрушается агрегат конструкции планера цели.

В процессе решения определяется скорость соударения ПЭ, соответствующая вероятности инициирования, равной 0,5. Для агрегатов, поражаемых за счет инициирующего действия ПЭ по зарядам ВВ ( $\tau \leq \tau_{\max}^{\text{ин}}$ ), определяется скорость соударения для заданных типа ВВ и материала ПЭ:

$$v_{0,5} = k^o \cdot k_{\text{кр}} \cdot v_{\Gamma} \cdot (1 + A \cdot \lambda^{3/2}),$$

где  $v_{\Gamma} = \frac{B}{k_{\phi}^{1/3} \cdot q_r^{2/9} \cdot \sin^k \bar{\alpha}}$ ;  $\lambda = \frac{(h_{\text{экр}} + h_{\text{об}}) \cdot k_{\phi}^2}{q_r^{1/3} \cdot \sin^n \bar{\alpha}}$ ;  $k^o$  – коэффициент,

определяющий изменение инициирующей способности осколка в зависимости от структуры оболочки заряда БП;  $k_{\text{кр}}$  – коэффициент, учитывающий степень взрывчатого превращения ВВ боевой нагрузки, достаточного для поражения цели;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы ПЭ;  $h_{\text{об}}$  – толщина оболочки заряда ВВ, приведенная к стали;  $h_{\text{экр}}$  – толщина преграды, экранирующей боевую нагрузку или боевое снаряжение, приведенная к стали;  $A, B, K, n$  – коэффициенты для определения вероятности инициирования заряда ВВ одиночным осколком (табл. 13.4).

Таблица 13.4

Тип ВВ	Материал ПЭ	A	B	K	n
ТГ-40	ВНЖ-90	0,012	2700	0,47	0,24
ТГ-40	Сталь	0,012	2550	0,39	1,33
ТГ-40	Цирконий	0,036	2550	0,58	0,48
ТГ-40	Ал. сплав	0,060	2500	0,63	0,02
Тротил	ВНЖ-90	0,0075	4680	0,11	1,00
Тротил	Сталь	0,020	4540	0,13	0,57
Окфол	ВНЖ-90	0,036	2270	0,52	0
Окфол	Сталь	0,030	1900	0,57	0,30
...	...	...	...	...	...

Характеристики уязвимости агрегатов, поражаемых за счет инициирующего действия ПЭ по зарядам ВВ, задаются в виде таблицы.

Условная вероятность инициирования ВВ цели:

$$P_{\bar{r}} = \frac{v_{\text{вр}} - 0,9 \cdot v_{0,5}}{0,2 \cdot v_{0,5}},$$

причем  $P_{\bar{i}} = 0$ ,  $(P_{\bar{i}}^{\tau})^{\text{ин}} = 0$ , если  $v_{v_r} \leq 0,9 \cdot v_{0,5}$ , и  $P_{\bar{i}} = 1$ , если  $v_{v_r} \geq 1,1 \cdot v_{0,5}$ .

Вероятность поражения агрегата при условии накрытия его соответствующей площади:

$$(P_{\bar{i}}^{\tau})^{\text{ин}} = P_{\bar{i}} \cdot \frac{S_{\Gamma}^y}{S_{\Gamma}}$$

Если в данной реализации  $\eta \leq P_{\bar{i}} \cdot \frac{S_{\Gamma}^y}{S_{\Gamma}}$ , то вероятность поражения агрегата за счет иницирующего действия ПЭ принимается равной единице:  $(P_{\bar{i}}^{\tau})^{\text{ин}} = 1$ , соответственно  $(P_i^{\tau})^{\text{ин}} = 1$ , иначе  $(P_{\bar{i}}^{\tau})^{\text{ин}} = 0$ .

Модель оценки эффективности поражающего действия ПЭ по зарядам ТРТ РДТТ АР приводится в **блоке 15**. Находящиеся на борту самолета-носителя авиационные ракеты (управляемые и неуправляемые) могут быть объектами воздействия ЗУР. Поражение агрегатов самолета в этом случае может произойти за счет иницирующего действия ПЭ по зарядам БЧ или ТРТ РДТТ АР. Подход к оценке поражающего действия ЗУР по зарядам БЧ описан в работе [10]. Поражение агрегатов самолета при попадании ЗУР в РДТТ АР будет иметь место, если произойдет разрыв корпуса работающего РДТТ или возникнет эффект взрывного горения ТРТ.

В качестве характеристик уязвимости в этом случае дополнительно используются величина свободного объема камеры сгорания РДТТ, а также наименьшее и наибольшее критические значения удельной энергии ПЭ, при которых разрушается агрегат конструкции планера цели.

**Вероятность поражения агрегатов цели, поражаемых за счет разрыва корпуса работающего РДТТ.** Условная вероятность поражения агрегатов цели, поражаемых за счет разрыва корпуса работающего РДТТ  $P_{\bar{i}}$ , при действии ПЭ ( $\tau \leq \tau_{\text{max2}}^{\text{ТРТ}}$ ) определяется скоростью  $v_p'$ , необходимой для разрушения корпуса РДТТ цели с заданной величиной свободного объема камеры сгорания – W:

$$v_p' = 7500 \cdot W^{0,17} \cdot q_r^{-0,6}.$$

Условная вероятность принимается равной  $P_{r_i} = 0$ ,  $(P_{r_i}^\tau)_2^{\text{ТРТ}} = 0$ , если  $v_{B_r} < v_p'$ , и  $P_{r_i} = 1$ , если  $v_{B_r} > v_p'$ . Тогда вероятность поражения агрегатов цели, поражаемых за счет разрыва корпуса работающего РДТТ при действии ПЭ, при условии накрытия корпуса заданным потоком ПЭ равна:

$$(P_{r_i}^\tau)_2^{\text{ТРТ}} = P_{r_i} \cdot \frac{S_r^y}{S_r}$$

$(P_{r_i}^\tau)_2^{\text{ТРТ}} = 1$ ,  $(P_i^\tau)^{\text{ТРТ}} = 1$ , если в текущей реализации  $\eta \leq (P_{r_i}^\tau)_2^{\text{ТРТ}}$ , иначе  $(P_{r_i}^\tau)_2^{\text{ТРТ}} = 0$ .

**Вероятность поражения агрегатов цели, поражаемых за счет взрывного горения ТРТ при действии ПЭ.** При известных предельной толщине пробития оболочки и экрана и выполнении условия

$$h_{\text{пр}} \geq \frac{h_{\text{об}} + h_{\text{экp}}}{k_\alpha},$$

где  $k_\alpha$  – коэффициент, учитывающий угол подхода ПЭ к оболочке, для всех ПЭ, обладающих соответствующей энергетикой и попавших в исходный агрегат, рассчитывается энергия осколков данной весовой группы  $E_{N_r}$ :

$$E_{N_r} = \frac{q_r \cdot v_{B_r}^2}{2} \cdot 10^{-3}.$$

Для того чтобы рассчитать энергетический поток ПЭ, необходимо определить суммарную площадь поверхности агрегата, накрываемого этим потоком.

Пусть  $N_1$  – число осколков, попавших в заднюю или переднюю грани агрегата;  $N_2$  – число осколков, попавших в верхнюю или нижнюю грани агрегата;  $N_3$  – число осколков, попавших в левую или правую грани агрегата;  $N_{1\text{min}}$ ,  $N_{2\text{min}}$ ,  $N_{3\text{min}}$  – минимальное количество ПЭ, попавших в соответствующие грани с заданных направлений. Для всех случаев запоминаются координаты попадания ПЭ в соответствующие грани:  $x_{\mu}^\tau$ ,  $y_{\mu}^\tau$ ,  $z_{\mu}^\tau$ .

Тогда вероятность поражения агрегатов цели, поражаемых за счет взрывного горения ТРТ при действии ПЭ, равна:

$$(P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{уд}} - \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\min}}{\mathcal{E}_{\text{уд}}^{\max} - \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\min}},$$

$$(P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}} = 0, \text{ если } \mathcal{E}_{\text{уд}} \leq \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\min},$$

$$(P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}} = 1, (P_i^\tau)^{\text{ТРГ}} = 1, \text{ если } \mathcal{E}_{\text{уд}} \geq \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\max}.$$

Если  $\eta \leq (P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}}$ , то принять  $(P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}} = 1, (P_i^\tau)^{\text{ТРГ}} = 1$ , иначе  $((P_i^\tau)_3^{\text{ТРГ}} = 0)$ .

Модель оценки эффективности зажигательного действия ПЭ используется в **блоке 16**. Вероятность поражения агрегатов цели за счет воспламенения топлива или взрыва его паров при попадании ПЭ либо в жидкую, либо в паровоздушную фазы топливного агрегата (бака) ( $\tau \leq \tau_{\text{max}}^{\text{зд}}$ ), соответственно определяется их уязвимостью.

В качестве параметра уязвимости топливных агрегатов (баков) принят экспериментально определяемый параметр  $\aleph$ . Для различных фаз топлива и различных топливных баков (агрегатов) задаются граничные значения параметра  $\aleph$  ( $\aleph_{\text{min}}, \aleph_{\text{max}}$ ), характеризующего уязвимость топливных баков за счет зажигательного действия ПЭ.

Толщина обшивки агрегата задается в дюрелевом эквиваленте.

Вероятности поражения топливных агрегатов определяются с учетом вероятностей воспламенения топлива  $P_{\text{вр}}$ , развития пожара  $P_{\text{п}}$

и эффективности системы пожаротушения  $k_{\text{сп}}: (P_i^\tau)^{\text{зд}} = P_{\text{вр}} \cdot P_{\text{п}} \cdot k_{\text{сп}}$ .

Воспламенение жидкой или паровоздушной фаз возможно только при условии, что поток осколков обладает соответствующей удельной энергией.

Характеристикой, используемой для расчета критических значений удельной энергии потока осколков, вызывающей воспламенение, является коэффициент  $k(H) = f(H)$ . При расчетах  $k(H)$  можно воспользоваться его значениями, приведенными в табл. 13.5, или принять

$$k(H) = \frac{21 - H}{4}.$$

Таблица 13.5

$H, \text{ км}$	0-10	16	20	25	30
$k(H)$	0,80	0,67	0,35	-0,12	-0,60

Во всех случаях, если направление, с которого рассматривается уязвимая грань агрегата, – сверху ( $\mu = 4$ ),  $k(H) = 1$ , в других случаях  $k(H) = 1$ , если  $H < 17$ , и  $k(H) = 0$ , если  $H > 21$ .

При условии, что поток осколков обладает соответствующей удельной энергией, вероятность воспламенения топлива

$$P_{B_0} = \frac{\aleph - \aleph_{\min}}{\aleph_{\max} - \aleph_{\min}}.$$

Текущее значение  $\aleph = S_M^{1/2} \cdot V_{B_r}$ .

Условные вероятности воспламенения топлива и соответственно вероятность поражения агрегата в  $i$ -й реализации принимаются равными нулю ( $P_{B_0} = 0$ ,  $P_{B_r} = 0$ ,  $(P_i^T)^{3Д} = 0$ ), если  $\aleph \leq \aleph_{\min}$ , и единице ( $P_{B_0} = 1$ ), если  $\aleph \geq \aleph_{\max}$ .

Приведенный подход необходимо применить для всех  $N < N_{\max}$ . Если в текущей реализации  $\eta \leq P_{B_0}$ , то  $P_{B_0} = 1$ , иначе

$$P_{B_0} = 0, \quad P_{B_r} = 0, \quad (P_i^T)^{3Д} = 0.$$

При условии, что поток осколков обладает соответствующей удельной энергией, вероятность поражения цели за счет зажигательного действия с учетом накрываемой потоком осколков площади и высоты подрыва БЧ равна:

$$P_{B_r} = P_{B_0} \cdot \frac{S_r^y}{S_r} \cdot K(H),$$

причем  $P_{B_r} = 0$ ,  $(P_i^T)^{3Д} = 0$ , если  $h_1/k_\alpha > h_{\text{пр}}$ . Если в текущей реализации  $\eta \leq P_{B_r}$ , то  $P_{B_r} = 1$ , иначе  $P_{B_r} = 0$ ,  $(P_i^T)^{3Д} = 0$ .

Во всех случаях, если направление, с которого рассматривается уязвимая грань агрегата, – сверху ( $\mu = 4$ ), вероятность возникновения пожара и вероятность срабатывания системы пожаротушения принимаются равными:  $P_{\Pi} = 1$ ,  $k_{\text{сп}} = 1$ . В других случаях вероятность возникновения пожара рассчитывается с учетом вероятности взрыва паровоздушной смеси при расходе поступающего воздуха  $G_B$ :

$$P_{\Pi} = P_{\Pi 0} + 5,6 \cdot G_B, \text{ если } G_B < \frac{1 - P_{\Pi 0}}{5,6}, \text{ или } P_{\Pi} = 1, \text{ если } G_B \geq \frac{1 - P_{\Pi 0}}{5,6},$$

где  $P_{\Pi 0}$  – вероятность возникновения пожара при отсутствии поступления воздуха;  $G_B = 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot N \cdot S_1 \cdot v_{\Pi}^{3/2} \cdot e^{-0,115 \cdot H}$ , если определено, что взрыв может произойти в агрегатах, принадлежащих фюзеляжу, крылу, центроплану, хвостовому оперению;  $G_B = 3,43 \cdot 10^{-6} \cdot N \cdot S_1 \cdot v_{\Pi}^{3/2} \cdot e^{-0,115 \cdot H}$ , если с каждым агрегатом, расположенным в отсеках, сопоставлена вероятность  $P_{\Pi 0}$ .

Значение вероятности  $P_{\Pi 0}$  задается в зависимости от принадлежности исходного агрегата фюзеляжу ( $\lambda_{\text{фкк}}=1$ ) или крылу, центроплану, хвостовому оперению ( $\lambda_{\text{фкк}}=2$ ).

Площадь пробоины в обшивке от одиночного осколка ( $S_1$ , см<sup>2</sup>):

$$S_1 = S_M, \text{ если } v_{Br} \leq 800 \text{ м/с},$$

$$S_1 = S_M \cdot \left[ 1 + 3,36 \cdot 10^{-3} \cdot (v_{Br} - 800) \cdot \frac{h_1}{h_{\text{пр}}} \right]^2, \text{ если } \frac{h_1}{h_{\text{пр}} \cdot k_{\alpha}} < 0,2,$$

$$S_1 = S_M \cdot \left[ 1 + 0,676 \cdot 10^{-3} \cdot (v_{Br} - 800) \right]^2, \text{ если } \frac{h_1}{h_{\text{пр}} \cdot k_{\alpha}} \geq 0,2,$$

$h_1$  – толщина первой преграды (обшивки исходного агрегата) в дюралевом эквиваленте. Если в текущей реализации  $\eta \leq P_{\Pi}$ , то принимается  $P_{\Pi} = 1$ , иначе  $P_{\Pi} = 0$ ,  $(P_i^{\tau})^{3\text{д}} = 0$ .

Если в беспилотном или пилотируемом ЛА предусмотрена система пожаротушения, то вероятность ее срабатывания рассчитывается по соотношению

$$k_{\text{СП}} = \frac{N \cdot S_1 - 3}{12},$$

причем если  $N \cdot S_1 \leq 3 \text{ см}^2$ , то принимается  $k_{\text{СП}} = 0$  и  $(P_i^{\tau})^{3\text{д}} = 0$ , а если  $N \cdot S_1 \geq 15 \text{ см}^2$ , то  $k_{\text{СП}} = 1$ . Если  $\eta \leq k_{\text{СП}}$ , то  $k_{\text{СП}} = 1$ , иначе  $k_{\text{СП}} = 0$  и  $(P_i^{\tau})^{3\text{д}} = 0$ .

При действии плотного потока ПЭ поражение агрегатов (отсеков) конструкции цели может возникнуть за счет аэроудара (блок 17). Эффект аэроудара определяется конструктивными параметрами поражаемого агрегата (отсека) планера цели и, в частности, его геометрическими размерами, материалом и толщиной обшивки планера и параметрами потока ПЭ.

В качестве энергетической характеристики воздействия используется средняя удельная энергия поля ПЭ, полностью или частично покрывающего уязвимый отсек, приходящаяся на единицу площади грани уязвимого отсека.

В качестве энергетического критерия разрушения уязвимого отсека принимается удельная (критическая) энергия поля ПЭ, определяемая максимальным и минимальным значениями критического параметра уязвимости  $C_0$ , характеризующего прочностные свойства отсека.

Эффект аэроудара определяется сравнением требуемых и располагаемых энергетических характеристик поля ПЭ.

Тогда вероятность поражения исходного отсека за счет аэроудара при действии потока осколков в общем случае с трех уязвимых направлений  $(P_i^\tau)^{AY}$  будет равна:

$$(P_i^\tau)^{AY} = \begin{cases} 0 & \text{при } \mathcal{E}_{уд\Sigma} \leq \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}^{\min}, \\ \frac{\mathcal{E}_{уд\Sigma} - \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}^{\min}}{\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\max}^{\min} - \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}^{\min}} & \text{при } \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}^{\min} < \mathcal{E}_{уд\Sigma} < \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\max}^{\min}, \\ 1 & \text{при } \mathcal{E}_{уд\Sigma} \geq \mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\max}^{\min}, \end{cases}$$

где  $\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}^{\min} = \min\{\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}\}_{\nabla_1}$  Дж/м<sup>2</sup> – наименьшее критическое значение удельной энергии потока осколков, при которых разрушается отсек конструкции планера, с учетом минимальных действующих на него в полете нагрузок:  $\{\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\min}\}_{\nabla_1}$  Дж/м<sup>2</sup>;

$\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\max}^{\min} = \min\{\mathcal{E}_{уд}(n_\ominus)_{\max}\}_{\nabla_1}$  Дж/м<sup>2</sup> – наибольшее критическое значение удельной энергии потока осколков, при которых разрушается отсек конструкции планера, с учетом максимальных действующих на

него в полете нагрузок:  $\{\mathcal{E}_{уд}(n_э)_{\max}\}_{\nabla_1}$ , Дж/м<sup>2</sup>;  $\mathcal{E}_{уд\Sigma} = \sum_{\nabla_1=1}^3 k_{\nabla_1} \cdot \mathcal{E}_{уд\nabla_1}$  –

суммарная энергия потока осколков, приходящаяся на агрегат со всех возможных направлений.

Величина удельной энергии, вносимой потоком осколков в отсек конструкции планера (в общем случае неравнопрочного с различных уязвимых направлений) с  $\nabla_1$ -го уязвимого направления, зависит от площади отсека  $S_{н\nabla_1}$ , приведенной к  $\nabla_1$ -му уязвимому направлению, числа осколков  $N_{\nabla_1}$  и количества кинетической энергии  $r$ -го осколка  $E_{r\nabla_1}$ , попавшего в площадь  $S_{н\nabla_1}$ :

$$\mathcal{E}_{уд\nabla_1} = \frac{1}{S_{н\nabla_1}} \cdot \sum_{r\nabla_1=1}^{N_{\nabla_1}} E_{r\nabla_1}.$$

Весовой коэффициент  $k_{\nabla_1}$ , характеризующий относительную стойкость исходного отсека к воздействию потока осколков с  $\nabla_1$ -го уязвимого направления, определяется как

$$k_{\nabla_1} = \frac{\bar{\mathcal{E}}_{уд}(n_э)_{\min}}{(\bar{\mathcal{E}}_{уд}(n_э))_{\nabla_1}},$$

где  $\bar{\mathcal{E}}_{уд}(n_э)_{\min} = \min_{\nabla_1} (\bar{\mathcal{E}}_{уд}(n_э))_{\nabla_1}$ ;

$$(\bar{\mathcal{E}}_{уд}(n_э))_{\nabla_1} = \frac{(\mathcal{E}_{уд}(n_э)_{\min})_{\nabla_1} + (\mathcal{E}_{уд}(n_э)_{\max})_{\nabla_1}}{2} \text{ – среднее значение}$$

удельной энергии потока осколков, попавших в площадь  $S_{н\nabla_1}$ ;

$$(\mathcal{E}_{уд}(n_э)_{\min(\max)})_{\nabla_1} = \begin{cases} (\mathcal{E}_{уд}(0)_{\min(\max)})_{\nabla_1} & \text{– для отсеков фюзеляжа,} \\ \left(1 - \frac{n_э}{n_{ц}}\right) \cdot (\mathcal{E}_{уд}(0)_{\min(\max)})_{\nabla_1} & \text{– для отсеков крыла и} \end{cases}$$

хвостового оперения,

$$\text{где} \quad \left( \mathcal{E}_{\text{уд}}(n_{\text{э}})_{\min(\max)} \right)_{\nabla_1} = \left( C_{0\min(\max)} \right)_{\nabla_1} \cdot \frac{10 \cdot (q_{\nabla_1})_{\text{ср}}}{k_{\text{др}\nabla_1} \cdot S_{\text{м}} \cdot k_{\text{эш}\nabla_1}} \cdot A_{\text{в}\nabla_1};$$

$\mathcal{E}_{\text{уд}}(0)_{\min}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{уд}}(0)_{\max}$  – наименьшее и наибольшее критические значения удельной энергии потока осколков, при которых разрушается отсек конструкции планера, без учета действующих на него в полете нагрузок;  $n_{\text{э}}$  – эксплуатационная перегрузка цели в момент воздействия по ней поражающих факторов взрыва ОФБЧ;  $n_{\text{ц}}$  – разрушающая перегрузка;  $C_{0\min\nabla_1}$ ,  $C_{0\max\nabla_1}$ , Дж/кг – наименьшее и наибольшее значения параметра, характеризующего прочностные свойства отсека, поражаемого за счет аэроудара, приведены в таблицах характеристик уязвимости. Параметр  $C_0$  характеризует прочностные свойства отсека – так называемый ЭКР (энергетический критерий разрушения), который пропорционален величине критического удельного импульса и при параметрах осколков, вызывающих аэроудар, в основном определяет значение удельной критической энергии потока осколков. Параметр определяется по результатам экспериментальных исследований;  $(q_{\nabla_1})_{\text{ср}}$  – средняя масса осколка, попавшего в агрегат с  $\nabla$ , уязвимого направления:

$$k_{\text{др}\nabla_1} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{\text{вр}} \leq 800, \\ \frac{(k_{\text{др}}^* - 1) \cdot \left( \left( v_{\text{вр}\nabla_1} \right)_{\text{ср}} - 800 \right)}{v_{\text{др}} - 800} & \text{при } 800 < v_{\text{вр}} < v_{\text{др}} \text{ – коэффициент,} \\ k_{\text{др}}^* & \text{при } v_{\text{вр}} \geq v_{\text{др}}, \end{cases}$$

учитывающий влияние ударной вязкости материала осколка на интенсивность аэроудара;

$$k_{\text{др}}^* = \begin{cases} 1 & \text{– для осколков из стали, ВНЖ;} \\ 2,8 & \text{– для осколков из дюралю;} \\ 2,4 & \text{– для осколков из циркония;} \end{cases}$$

$S_{\text{м}}$ , см<sup>2</sup> – площадь мишени осколка.

$$k_{\text{эш}\nabla_1} = \begin{cases} 1 & \text{при } L_{\text{эш}} \leq C, \\ \frac{C}{L_{\text{эш}}} & \text{при } L_{\text{эш}} > C, \end{cases} \text{ – коэффициент, учитывающий влияние}$$

эшелонирования осколков в потоке на интенсивность аэроудара;  $L_{\text{эш}}$ , м – глубина (в потоке) поля осколков, накрывающего исходный отсек;  $C=L_x$  или  $L_y$  или  $L_z$ , м – глубина отсека с рассматриваемого уязвимого направления.

Величина  $A_{V_{\nabla_1}}$  в выражении расчета энергии осколков учитывает влияние основных параметров осколочного потока:

$$A_{V_{\nabla_1}} = \frac{v_{H_{\nabla_1}} \cdot k_{q_{\nabla_1}}}{(k_{\alpha_{\nabla_1}})_{\text{ср}} \cdot k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}, H\right)_{\nabla_1}},$$

где  $k_{q_{\nabla_1}} = \frac{1}{1 - \frac{0,3 \cdot 10^6}{S_m \cdot (v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}^2}}$  – коэффициент, учитывающий влия-

ние массы и скорости осколка;

$(k_{\alpha_{\nabla_1}})_{\text{ср}} = \frac{\sum_{r_{\nabla_1}=1}^{N_{\nabla_1}} k_{\alpha_{\nabla_1}}}{N_{\nabla_1}}$  – среднее значение коэффициента, учитыва-

ющего влияние угла подхода осколка к грани агрегата с  $\nabla_1$ -уязвимо-го направления на его пробивную способность;  $k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}, H\right)_{\nabla_1}$

– коэффициент, учитывающий влияние высоты и скорости встречи ПЭ с целью;

$$k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}, H\right)_{\nabla_1} = 1, \text{ если } (v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}} < v_{\text{др}},$$

$$k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}, H\right)_{\nabla_1} = 1 + k(H) \cdot \left( \frac{(v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}}^2}{v_{\text{др}}^2} - 1 \right)^{1/3}, \text{ если } (v_{Br_{\nabla_1}})_{\text{ср}} \geq v_{\text{др}},$$

$$k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{cp}, H\right)_{\nabla_1} = 0,2, \text{ если } k\left((v_{Br_{\nabla_1}})_{cp}, H\right)_{\nabla_1} < 0,2,$$

$v_{H_{\nabla_1}}$  характеризует степень накрытия отсека осколочным полем:

$$v_{H_{\nabla_1}} = \begin{cases} 1 & \text{— при } \mu_{H_{\nabla_1}} = 1,0; \\ 1 & \text{— при } L_H \geq 1 \text{ м; } \mu_{H_{\nabla_1}} < 1,0, \text{ но перекрыт} \\ & \text{хотя бы один из параметров грани отсека;} \\ \frac{1}{L_H} & \text{— при } L_H < 1 \text{ м; } \mu_{H_{\nabla_1}} < 1,0, \text{ но перекрыт} \\ & \text{хотя бы один из параметров грани отсека;} \\ \frac{1,1}{\mu_{H_{\nabla_1}} \cdot \sqrt{\bar{L}_{x,y,z}}} & \text{— при совместном выполнении условий} \\ & 1,0 > \mu_{H_{\nabla_1}} > 0,2; \quad 1,0 > \bar{L}_{x,y,z} > 0,5. \end{cases}$$

Здесь  $\bar{L}_{x,y,z}$  – степень перекрытия (наибольшая) одного из характерных размеров отсека  $L_x, L_y, L_z$  осколочным полем;  $\mu_H = S_H/S_{\Gamma}$  – степень накрытия поверхности исходного отсека осколочным полем;  $S_H, \text{ м}^2$  – площадь части поверхности исходного отсека, накрытая осколочным полем;  $S_{\Gamma}, \text{ м}^2$  – наибольшее значение проекции уязвимой площади исходного отсека на плоскость, перпендикулярную вектору скорости  $\bar{v}_B$  потока осколков;  $L_H = S_H/L, L=L_x$  или  $L_y$  или  $L_z, \text{ м}$  – один из линейных размеров грани отсека, полностью перекрываемого осколочным полем.

Явление аэроудара имеет смысл учитывать, если предельная толщина пробиваемой осколками обшивки будет больше или равна толщине обшивки с учетом свойств ее материала и угла подхода ПЭ:

$$h_{пр} \geq \frac{k_d \cdot \delta_{общ}}{k_a}, \text{ где } k_d \text{ – коэффициент дюралевого эквивалента, ха-}$$

рактеризующий материал обшивки по вероятности;

$$k_d = \begin{cases} 0,4 - \text{ для углепластиков (КМ), оргстекла;} \\ 1,0 - \text{ для обшивок из алюминиевых сплавов;} \\ 1,5 - \text{ для обшивок из титановых сплавов;} \\ 2,0 - \text{ для стальных обшивок.} \end{cases}$$

При действии плотного потока ПЭ возможно поражение агрегатов (отсеков) конструкции ЛА за счет гидроудара (**блок 18**), возникающего в отсеках ЛА, заполненных жидкостью.

Эффект гидроудара рассчитывается с использованием тех же критерильных параметров уязвимости конкретного отсека, что и при оценке эффективности аэроудара, и, в основном, того же алгоритма.

Так же как и ранее, явление гидроудара имеет смысл учитывать, если предельная толщина пробиваемой осколками обшивки

$$h_{гр} \geq \frac{k_d \cdot \delta_{общ}}{k_\alpha}.$$

Основным поражающим фактором при фугасном действии БЧ ЗУР по цели (**блок 19**) будет воздушная ударная волна (ВУВ). Эффективность ее действия характеризуется избыточным давлением во фронте ( $\Delta p_f$ , Па) и полным удельным импульсом ( $I$ , Па·с) фазы сжатия (импульсом, воспринимаемым поверхностью исходного отсека конструкции планера в процессе нагружения ВУВ).

Избыточное давление фронта ВУВ, действующее на конструкцию, зависит от кривизны фронта волны и высоты, на которой срабатывает БЧ:

$$\begin{cases} \frac{\Delta p_f}{p_H} = 0,15 \cdot \xi^3 + 0,21 \cdot \xi^2 + 0,23 \cdot \xi & \text{при } 0,1 \leq \frac{\Delta p_f}{p_H} \leq 10; \\ \frac{\Delta p_f}{p_H} = 0,232 \cdot \xi^2 + 5,673 \cdot \xi - 12,882 & \text{при } 10 < \frac{\Delta p_f}{p_H} \leq 100, \end{cases}$$

где  $p_H$ , Па – атмосферное давление на высоте  $H$ ;  $\xi = \frac{1}{R_f} \cdot \left( \frac{Q_*}{p_H} \right)^{1/3}$  – приведенная кривизна фронта;  $R_f$ , м – радиус ВУВ в зоне контакта с гра-

нью исходного отсека;  $Q_* = Q_{БЧ} \cdot \eta_{БЧ} \cdot q \cdot \left[ 1 - 1,4 \cdot \eta_{БЧ} \cdot (1 - \eta_{БЧ}) + \frac{v_p^2}{2 \cdot q} \right]$  Дж –

часть энергии взрыва ОФБЧ, обеспечивающая его фугасное действие;  
 $q = \psi_{\text{ВВ}} \cdot q_{\text{ТНТ}}$  – удельная теплота взрыва заряда ОФБЧ, Дж/кг;  $Q_{\text{БЧ}}$  – масса ОФБЧ, кг;  $\eta_{\text{БЧ}}$  – коэффициент наполнения ОФБЧ;  $\psi_{\text{ВВ}}$  – удельный тротильный эквивалент ВВ ОФБЧ;  $q_{\text{ТНТ}} = 4,2 \cdot 10^6$  – удельная теплота взрыва, Дж/кг;

$$I = k_1 \cdot I_1 \cdot \sin(k_0 \cdot \alpha_f) + k_2 \cdot I_2 \cdot \cos^2(k_0 \cdot \alpha_f),$$

$$\begin{cases} \frac{I_1}{I_H} = 0,053 \cdot \xi - 0,001 \cdot \xi^2 - 0,001 \cdot \xi^3 & \text{при } 0,1 \leq \frac{\Delta p_f}{p_H} \leq 10; \\ \frac{I_1}{I_H} = (0,048 \cdot \xi - 0,422)^3 + 0,1467 & \text{при } 10 < \frac{\Delta p_f}{p_H} \leq 100; \\ \frac{I_2}{I_H} = 0,105 \cdot \xi + 0,024 \cdot \xi^2 & \text{при } 0,1 < \frac{\Delta p_f}{p_H} \leq 100. \end{cases}$$

Здесь  $I_1$  – составляющие импульса избыточного давления в фазе сжатия ВУВ с учетом кривизны фронта, Па·с;  $I_2$  – импульс избыточного давления на преграде при нормальном отражении от преграды, Па·с;  $I_H = \frac{p_H}{C_H} \cdot \left( \frac{Q^*}{p_H} \right)^{1/3}$  – импульс избыточного давления в фазе сжатия ВУВ на высоте  $H$ ;

$k_0 = 1 - 0,73 \cdot \frac{V_{\text{ц}}}{D_f} \cdot \sin \psi \cdot \cos \omega$ ;

$k_1 = \left( 1 - \frac{V_{\text{ц}}}{D_f} \cdot \cos \varphi \right)^{-1}$ ;  $D_f = C_H \cdot \sqrt{1 + 0,8 \frac{\Delta p_f}{p_H}}$  – скорость фронта ВУВ;

$k_2 = 1 - 0,67 \cdot M \cdot \cos \varphi \cdot \text{exx} \left( -0,09 \frac{\Delta p_f}{p_H} \right)$ ;  $\varphi$ , град – угол между векторами  $\bar{D}_f$  и  $\bar{V}_{\text{ц}}$  в зоне контакта поверхности отсека цели с ВУВ (при лобовом соударении  $\varphi = 180^\circ$ );  $\alpha_f$ , град – угол между вектором  $D_f$  и нормалью к поверхности исходного отсека в зоне контакта с фронтом ВУВ;  $\psi$ , град – острый угол между вектором  $\bar{V}_{\text{ц}}$  и плоскостью грани исходного отсека;  $\omega$ , град – острый угол между внешней

нормалью к грани исходного отсека в зоне контакта с ВУВ и плоскостью, в которой лежат векторы  $\overline{D}_f$  и  $\overline{V}_ц$ ;  $M$  – число маха полета цели.

Время прихода ВУВ взрыва ОФБЧ ( $t$ , с) и кривизна фронта  $\xi$  связаны соотношением

$$\xi = \frac{T_H}{t} \cdot \frac{t + 0,1 \cdot T_H}{t + 0,72 \cdot T_H},$$

где  $T_H = \frac{I}{C_H} \cdot \left( \frac{Q_*}{p_H} \right)^{1/3}$ ,  $\xi(0)$  – в момент подрыва БЧ;  $\xi(t)$  – в момент прихода фронта ВУВ к грани цели;  $C_H$  – атмосферная скорость звука на высоте  $H$ , м/с.

Исходный отсек конструкции планера считается пораженным, если хотя бы на одной из его граней в результате фугасного воздействия выполняется условие  $I \geq I_0$  на площади не менее 50% от площади грани или не менее  $1 \text{ м}^2$ .  $I_0$  – минимальный полный удельный импульс, разрушающий исходный отсек конструкции планера при действии воздушной ударной волны (ВУВ), Па·с.

При выполнении этих условий вероятность поражения исходного отсека определяется по формуле

$$(P_i^t)^{\text{ФД}} = \begin{cases} 0 & \text{при } I < I'_0 \\ 1 & \text{при } I \geq I'_0 \end{cases}, \text{ где } I'_0 = 0,316 \cdot I_0 \cdot Q_{\text{БЧ}}^{0,25}.$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Предложите алгоритм, отражающий весь цикл функционирования ПЗРК, включая этап поражения цели.
2. Перечислите возможные способы задания законов распределения входных характеристик и параметров внешней среды, определяющие вид показателя эффективности ПЗРК.
3. Как организуется вычислительный процесс, определяющий вид показателя эффективности ПЗРК?
4. Что является результатом моделирования функционирования каждого этапа работы комплекса ПЗРК?
5. Перечислите основные модели, описывающие конкретные этапы работы комплекса ЗУР.

6. Перечислите факторы, подлежащие учету при оценке эффективности действия боевого снаряжения ЗУР при использовании метода статистических испытаний.
7. Чем определяется распределение случайных значений параметров, характеризующих положение ракеты относительно цели?
8. Как решается задача поражения ЗУР цели как объемного объекта?
9. Как учитываются возможные направления подлета ракеты к цели?
10. В чем суть процедуры определения принадлежности координат точек попадания ЗУР в какой-либо отсек СВН?
11. Что значит толщина обшивки в дюралево эквиваленте?
12. Как учитывается рикошет при поражении СВН?
13. Как оценивается вероятность заглупления БЧ при условии пробития преграды?
14. Как оценивается предельная толщина пробития монолитной дюралево преграды?
15. В чем суть механического действия ПЭ и как оно оценивается?
16. В чем суть инициирующего действия ПЭ и как оно оценивается?
17. В чем суть зажигательного действия ПЭ и как оно оценивается?
18. В чем суть действия ПЭ по зарядам РДТТ и как оно оценивается?
19. В чем суть аэрогидроударного действия ПЭ и как оно оценивается?
20. В чем суть фугасного действия ПЭ и как оно оценивается?

### 13.4. Определение условной вероятности поражения цели боевым снаряжением ЗУР

По информации, полученной из блоков 8,10,12-19, в каждой реализации определяется условная вероятность поражения цели  $P_{BC_i}$  по каждому типу поражения ( $A$ ,  $B$  или  $C$ ):

$$P_{BC_i}^{A(B,C)} = 1 - \left[ 1 - \left( P_{BC_i}^{кп} \right)^{A(B,C)} \right] \cdot \left[ 1 - \left( P_{BC_i}^{дп} \right)^{A(B,C)} \right] \cdot \left[ 1 - \left( P_{BC_i}^{нп} \right)^{A(B,C)} \right],$$

где  $\left( P_{BC_i}^{кп} \right)^{A(B,C)}$ ,  $\left( P_{BC_i}^{дп} \right)^{A(B,C)}$ ,  $\left( P_{BC_i}^{нп} \right)^{A(B,C)}$  характеризуют степень поражения цели ( $\chi_i$ ) соответственно при контактном подрыве БЧ, при подрыве БЧ в зоне достоверного поражения и за счет действия различных поражающих факторов БЧ при неконтактном подрыве вне

зоны достоверного поражения. При этом  $(\chi_i)=1$  соответствует поражению по типу  $C$ ,  $(\chi_i)=2$  – по типу  $B$ ,  $(\chi_i)=3$  – по типу  $A$ .

Поскольку тип поражения  $A$  включает в себя поражение по типам  $B$  и  $C$ , то при  $(\chi_i)=3$  принимается также  $(\chi_i)=2$  и  $(\chi_i)=1$ , а тип поражения  $B$  включает в себя  $C$ , поэтому при  $(\chi_i)=2$  принимается также  $(\chi_i)=1$ .

В свою очередь  $(R_{BC_i}^{нп})^{A(B,C)}$  определяется как

$$(P_{BC_i}^{нп})^{A(B,C)} = 1 - \prod_{\tau=1}^{\tau=\tau_k} \left[ 1 - (P_{1_i}^{\tau})^{A(B,C)} \right] \cdot \prod_{\tau=\tau_{k+1}}^{\tau_{\ell}} \left[ 1 - (P_{2_i}^{\tau})^{A(B,C)} (P_{2_i}^{\tau+1})^{A(B,C)} \right] \times \\ \times \prod_{\tau=\tau_{\ell+1}}^{\tau_{\max}} \left[ 1 - (P_{3_i}^{\tau})^{A(B,C)} (P_{3_i}^{\tau+1})^{A(B,C)} (P_{3_i}^{\tau+2})^{A(B,C)} \right],$$

где  $(P_{1_i}^{\tau})^{A(B,C)}$  характеризует степень поражения  $\tau$ -х агрегатов ( $\tau=1, \dots, \tau_k$ ), входящих в последовательную схему, т.е. поражение любого из агрегатов приводит к безусловному поражению цели;  $(P_{2_i}^{\tau}, P_{2_i}^{\tau+1})^{A(B,C)}$  характеризуют степень поражения агрегатов ( $\tau = \tau_{k+1} \dots \tau_{\ell}$ ), входящих в параллельную схему, составляющую поражаемую комбинацию из двух агрегатов;  $(P_{3_i}^{\tau}, P_{3_i}^{\tau+1}, P_{3_i}^{\tau+2})^{A(B,C)}$  характеризуют степень поражения агрегатов ( $\tau = \tau_{\ell+1} \dots \tau_{\max}$ ), входящих в параллельную схему, составляющую поражаемую комбинацию из трех агрегатов.

По аналогичной формуле в каждой реализации определяется вероятность поражения цели при действии каждого из поражающих факторов:

$$(P_{BC_i}^{мд1}, P_{BC_i}^{мд2}, P_{BC_i}^{мд3}, P_{BC_i}^{ин}, P_{BC_i}^{трт1}, P_{BC_i}^{трт2}, P_{BC_i}^{трт3}, P_{BC_i}^{зд}, P_{BC_i}^{ау}, P_{BC_i}^{гу}, P_{BC_i}^{фл})^{A(B,C)}.$$

Для каждого рассматриваемого типа поражения каждому агрегату ( $\tau$ ) в исходных данных в соответствующих таблицах ставится в соответствие признак  $\Theta_{\tau}$ , несущий следующую информацию в виде шестизначного числа: первая цифра означает тип поражения (1, 2 или 3), вторая – схему поражения (1 – последовательная схема, 2 – параллельная схема из двух агрегатов, 3 – параллельная схема из трех агре-

гатов), третья, четвертая, пятая, шестая цифры означают, с какими агрегатами исходный агрегат составляет поражаемую комбинацию.

Поскольку тип поражения цели определяется построением схемы уязвимости, то можно сформировать любые произвольные типы поражения исходя из требуемых гипотез. Методически это будет зависеть от подбора и связи между отдельными поражаемыми агрегатами.

В случае построения координатного закона поражения расчет проводится вдоль относительной траектории ЗУР с заданным шагом. Кроме того, в каждой реализации фиксируется попадание ЗУР в цель и соударение корпусом, если оно имеется.

Результаты расчета запоминаются, осуществляется переход к следующей реализации.

После набора статистики определяется условная вероятность поражения по типам  $A$ ,  $B$  или  $C$ :

$$P_{BC}^{A(B,C)} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} P_{BC_i}^{A(B,C)}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}},$$

где  $J_{\text{нес}}$  – количество неучитываемых реализаций, полученных, например, из-за неправильно заданных исходных данных.

При этом если величина остатка топлива ДУ ( $\omega_r$ ) находится в интервале заданных значений, то проводится двукратный счет для этих значений (в случае контактного подрыва БЧ и подрыва в зоне достоверного поражения), затем определяется истинное значение показателя эффективности методом линейной интерполяции.

Кроме того, определяются составляющие эффективности ( $P_{BC}$ ):

- в случае контактного подрыва

$$(P_{BC}^{\text{кп}})^{A(B,C)} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} (P_{BC_i}^{\text{кп}})^{A(B,C)}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}};$$

- в случае дистанционного подрыва

$$(P_{BC}^{\text{дп}})^{A(B,C)} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} (P_{BC_i}^{\text{дп}})^{A(B,C)}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}};$$

- в случае неконтактного поверхностного подрыва

$$(P_{\text{BC}}^{\text{нп}})^{\text{A(B,C)}} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} (P_{\text{BC}_i}^{\text{нп}})^{\text{A(B,C)}}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}};$$

а также такие показатели, как:

- вероятность прямого попадания в цель  $P_{\text{пп}} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} P_{\text{пп}_i}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}}$ , где

$R_{\text{пп}_i}$  определяется по признаку  $\chi_{i1}=1$ ;

- вероятность заглобленного подрыва БЧ:

$$P_{\text{зп}} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} P_{\text{зп}_i \text{ при } v=0}}{(J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}) P_{\text{пп}}};$$

- вероятности поражения агрегатов цели за счет действия различных поражающих факторов БЧ ( $P_{\text{BC}}^{\text{мд}1}, P_{\text{BC}}^{\text{мд}2}, P_{\text{BC}}^{\text{мд}3}, P_{\text{BC}}^{\text{ин}}, P_{\text{BC}}^{\text{трт}1}, P_{\text{BC}}^{\text{трт}2}, P_{\text{BC}}^{\text{трт}3}, P_{\text{BC}}^{\text{зд}}, P_{\text{BC}}^{\text{ау}}, P_{\text{BC}}^{\text{гу}}, P_{\text{BC}}^{\text{фд}}$ )<sup>A(B,C)</sup>:

$$(P_{\text{BC}}^{\text{xx}})^{\text{A(B,C)}} = \frac{\sum_{i=1}^{J_{\text{зад}}} (P_{\text{BC}_i}^{\text{xx}})^{\text{A(B,C)}}}{J_{\text{зад}} - J_{\text{нес}}},$$

где индекс «xx» соответствует одному из поражающих факторов БЧ.

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Что является результатом моделирования функционирования каждого этапа работы комплекса ЗУР?
2. Сколько опытов необходимо провести, чтобы сделать выборку репрезентативной и получить состоятельную оценку показателя эффективности?
3. Перечислите основные модели, описывающие конкретные этапы работы комплекса ЗУР.

4. Чем заканчивается оценка эффективности действия боевого снаряжения ЗУР при использовании метода статистических испытаний?
5. Перечислите факторы, подлежащие учету при оценке эффективности действия боевого снаряжения ЗУР при использовании метода статистических испытаний.
6. Как определяется условная вероятность поражения цели по каждому типу поражения ( $A$ ,  $B$  или  $C$ ) в каждой реализации при использовании метода статистических испытаний?
7. Какова вероятность прямого попадания ЗУР в цель?
8. Какова вероятность заглобленного подрыва БЧ ЗУР?
9. Каковы вероятности поражения агрегатов цели за счет действия различных поражающих факторов БЧ ЗУР?

### **Библиографический список**

1. *Абчук В.А.* и др. Справочник по исследованию операций/ Под общ. ред. Ф.А. Матвейчука. М.: Воениздат, 1979. 368 с.
2. *Белов А.Г.* и др. Методы оценки эффективности действия боеприпасов на стадии проектирования: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 1996. 138 с.
3. *Великанов В.Д.* и др. Радиотехнические средства в ракетной технике. М.: Воениздат, 1974.
4. *Ельцин С.Н.* Эффективность ракетного оружия и принципы ее оценки: учебное пособие / Ленингр. мех. ин-т. Л., 1982. 127 с.
5. *Ельцин С.Н.*, Анисимов В.Н. Зенитная ракетная система С300В. Ракета 9М83, устройство и функционирование: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2008. 78 с.
6. *Ельцин С.Н.* Устройство и функционирование головных частей баллистических ракет: учебное. пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2017. 55 с.
7. *Ельцин С.Н.* Устройство и функционирование зенитной ракеты 9М331 «ТОР М1»: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 55 с.
8. *Запорожец В.И.* Боевая эффективность средств поражения и боеприпасов: тексты лекций / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006. 159 с.
9. Иницилирующее и зажигательное действие боевых частей зенитных ракетных комплексов/ В.М. Кашин и др.; под ред. В.М. Кашина; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2009. 246 с.
10. *Лебедев А.А.*, Герасюта Н.Ф. Баллистика ракет. М.: Машиностроение, 1970. 244 с.
11. *Михайлов Н.П.* Основы физики взрыва: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 144 с.
12. *Козин В. П.* Национальная оборона / Главная тема / «Иджис» – прямая угроза России. oborona.ru

13. *Неупокоев Ф.К.* Стрельба зенитными ракетами. 3-е изд., испр. и доп. М.: Воениздат, 1991. 343 с.
14. *Николаев Ю.М., Соломонов Ю.С.* Инженерное проектирование управляемых баллистических ракет с РДТТ. М.: Воениздат, 1979. 240 с.
15. *Никольский М.* Боевые части зенитных управляемых ракет / Техника...xliby.ru>Транспорт и авиация>...\_2001\_03/рб.php
16. *Оценка эффективности переносных зенитных ракетных комплексов / С.Н. Ельцин [и др.]; под ред. В.М. Кашина; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2007. 236 с.+3 вкл.*
17. *Покровский Г.И.* Взрыв. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 190 с.
18. *Проектирование и испытания баллистических ракет / Под ред. В.И. Варфоломеева и М.И. Копытова. М.: Воениздат, 1970. 392 с.*
19. *Проектирование зенитных управляемых ракет/ И.И. Архангельский [и др.]; под ред. И.С. Голубева и В.Г. Светлова: учебник. М.: Изд-во МАИ, 1999. 728 с.*
20. *Российская газета.* Военная доктрина Российской Федерации.<http://rg.ru/2014/12/30/doktrina-dok.html>.
21. *Синюков А.М.* и др. Баллистическая ракета на твердом топливе. М.: Воениздат, 1972 . 224 с.
22. *Соколов А.* "Боевое пространство" и ... - Оружие России <http://www.arms-expro.ru> > Статьи, интервью.
23. *Сравнение СЯС России и США.* Военное обозрение. [topwar.ru](http://topwar.ru) 53757-sravnenie syas rossii-i-ssha. html.
24. *США против России. Доктрина 2050.* <http://hroniki-mira.com>.
25. *Технические основы эффективности ракетных систем / Е.Б. Волков и др.; под ред. Е.Б. Волкова. М.: Машиностроение, 1989. 250 с.*
26. *Усолкин Ю.Ю.* Проектирование головных частей баллистических ракет: учебное пособие. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. 41 с.
27. *Фендриков Н.М., Яковлев В.И.* Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

10. МОДЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ БОЕВЫХ СРЕДСТВ .....	3
11. СИСТЕМЫ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ И ПРОТИВОРАКЕТНОЙ ОБО- РОНЫ .....	8
11.1. Характеристики систем ПВО и ПРО .....	8
11.2. Модель движения ракеты к зоне обороны .....	10
11.3. Вероятность прорыва ГЧ через систему ПРО .....	18
12. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРЕЛЬБЫ ЗЕНИТНЫМИ РАКЕТАМИ .....	30
12.1. Характеристики системы ПВО .....	30
12.2. Модели функционирования ЗРК .....	33
12.3. Поражающее действие БЧ ЗУР .....	40
12.4. Боевые части ЗУР с готовыми поражающими элементами .....	46
12.5. Стержневые боевые части .....	61
12.6. Мультикумулятивная боевая часть .....	69
13. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ .....	71
13.1. Сущность метода статистических испытаний .....	71
13.2. Алгоритм оценки эффективности действия боевого снаряжения ЗУР ..	73
13.3. Пример использования метода статистических испытаний .....	75
13.4. Определение условной вероятности поражения цели боевым снаряжением ЗУР .....	111
<i>Библиографический список</i> .....	115

*Ельцин Станислав Николаевич*

## **Эффективность ракетных комплексов**

### **К н и г а 2**

Редактор *Г.М. Звягина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *С.В. Кашуба*

Подписано в печать 08.10.2018. Формат 60x84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 6,8. Тираж 100 экз. Заказ № 141.

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1