

Научная статья
УДК 623.45

Концепция приемлемого риска потери ударного беспилотного летательного аппарата за счёт поражения его осколками собственных бомб

Сергей Михайлович Мужичек, Андрей Александрович Скрынников,
Лариса Александровна Маслова

Аннотация. Для решения задачи обоснования безопасных условий бомбометания ударными беспилотными летательными аппаратами предложена концепция приемлемого риска потери носителя за счёт поражения осколками собственных авиационных бомб. В качестве фонового риска рассматривается риск потери ударного беспилотного летательного аппарата за счёт противодействия средствами ПВО противника. Для расчёта приемлемого риска используется марковская модель.

Ключевые слова: ударный беспилотный летательный аппарат; боевое применение; безопасные условия; критерий приемлемого риска

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23-29-00244.

Для цитирования: Мужичек С.М., Скрынников А.А., Маслова Л.А. Концепция приемлемого риска потери ударного беспилотного летательного аппарата за счёт поражения его осколками собственных бомб // Вооружение и экономика. 2024. №1(67). С. 9-17.

Original article

A Concept of Acceptable Risk of Unmanned Combat Aerial Vehicle Loss due to its Destruction by of Its Own Bomb Fragments

Sergej M. Muzhichek, Andrej A. Skry`nnikov, Larisa A. Maslova

Abstract. A concept of an acceptable risk of carrier loss due to the destruction by their own aviation bombs fragments is proposed to the problem solution of the safe conditions substantiation by unmanned aerial vehicles bombing. As a background risk, the risk of combat unmanned aerial vehicle loss due to counteraction by enemy air defense means is considered. The Markov model is used to calculate acceptable risk.

Keywords: combat unmanned aerial vehicle; combat use; safe conditions; acceptable risk criterion
The work was supported by the Russian Science Foundation, project No.23-29-00244.

For citation: Muzhichek S.M., Skrynnikov A.A., Maslova L.A. A Concept of Acceptable Risk of Unmanned Combat Aerial Vehicle Loss due to its Destruction by of Its Own Bomb Fragments // Armament and Economics. 2024. No.1(67). P. 9-17.

В состав вооружения ударных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) входят неуправляемые авиационные бомбы (АБ) калибра до 500 кг. Современные прицельно-навигационные комплексы позволяют применять свободнопадающие бомбы с большой точностью, что позволяет с высокой эффективностью решать задачи поражения стационарных и ограниченно подвижных наземных целей.

Полёт АБ осуществляется по баллистической траектории, поэтому при снижении высоты точность попадания в цель повышается. Снижение высоты полёта БПЛА уменьшает также и вероятность поражения БПЛА средствами ПВО противника. Но при бомбометании с малых и предельно малых высот возникает риск поражения БПЛА осколками собственных АБ.

В настоящее время разработан и широко применяется научно-методический аппарат обеспечения безопасности боевого применения авиационных боеприпасов по наземным целям с пилотируемых ЛА [1]. Безопасность бомбометания с малых высот обеспечивается ограничением минимальной высоты сбрасывания, ограничением интервалов между ЛА при групповом бомбометании и др. Эти ограничения определяются из условий абсолютной безопасности, обусловленных наличием экипажа – практическое исключение

поражения самолёта осколками собственных бомб. При этом в качестве критерия безопасности принимается одно из следующих условий¹:

осколки не накрывают самолёт-носитель;

осколки накрывают самолёт-носитель, но имеют нулевую относительную скорость в момент сближения;

осколки накрывают самолёт-носитель, но имеют малую скорость, при которой исключается возможность поражения самолёта.

При решении ряда практических задач третье условие формализуется следующим образом: исключить попадание в самолёт-носитель даже одного «опасного» осколка – осколка, способного пробить дюралевую обшивку толщиной 3 мм.

Применительно к БПЛА, на борту которого нет экипажа, предъявлять требования абсолютной безопасности нецелесообразно. Возникает необходимость определения допустимого риска потери ударного БПЛА при бомбометании с малых высот за счёт поражения осколками собственных авиационных средств поражения (АСП).

При боевом применении ударных БПЛА риск потери БПЛА связан с двумя факторами: противодействие средств ПВО противника и поражающие факторы собственных АСП при бомбометании с малых высот. Целесообразно минимизировать риск потери БПЛА за счёт выбора оптимальной высоты боевого применения. В качестве критерия может быть выбрана вероятность выполнения боевой задачи при заданной вероятности непоражения БПЛА от собственных АСП, или же, другими словами, при заданном приемлемом риске потери БПЛА за счёт поражения осколками собственных АСП.

Общие подходы, связанные с анализом и управлением рисками, разработаны в теории риска². Под риском понимается сочетание вероятности опасного события и его последствия³. При решении задачи оценки опасности поражения БПЛА осколками собственных АБ под опасным событием будем понимать попадание осколков собственных АСП в БПЛА, последствиями которого является нанесение ущерба БПЛА. Тогда требование абсолютной безопасности (ни один осколок не должен попасть в БПЛА) характеризуется как достоверное отсутствие опасности (когда вероятность появления опасного события равна нулю), а требование условной безопасности (ни один «опасный» осколок не должен попасть в БПЛА) – достоверное отсутствие ущерба.

Исследование риска включает анализ риска и оценку риска. Анализ риска обеспечивает базу для оценки риска.

Очевидно, что источником риска является взрыв АБ, сброшенной с БПЛА-носителя или с другого БПЛА группы. При подрыве АБ формируются два поражающих фактора: ударная волна и осколочное поле поражения. Однако ударная волна не представляет опасности для БПЛА, находящегося на расстоянии нескольких сотен метров от точки подрыва.

Поэтому источником риска при подрыве собственных АБ остаются осколочные поражающие элементы. Осколки обладают большой кинетической энергией и способны разлетаться на достаточно большие расстояния и, соответственно, подниматься на большую высоту (сотни метров) и «висеть» в воздухе десятки секунд. Опасность заключается в возможности попадания высокоскоростных осколков в БПЛА и нанесении ему повреждений, приводящих к поражению БПЛА или к необходимости войскового или заводского ремонта.

Анализ риска попадания осколков собственных АСП требует рассмотрения широкого круга вопросов и проведения комплексного исследования в интересах обоснования безопасных условий бомбометания с БПЛА.

В первую очередь необходимо провести анализ неопределённостей, возникающих при решении задачи.

¹ Оценка эффективности и безопасности применения авиационных боеприпасов по наземным целям: учеб. пособие / Под ред. Р.С. Саркисяна. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1974. 171 с.

² Королёв В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2011. 620 с.; *с м. также* [2].

³ ГОСТ Р 51901-2002. Управление надёжностью. Анализ риска технологических систем. М.: Госстандарт России, 2002. 22 с.

К неопределённостям нестохастической природы можно отнести условия подрыва АСП, определяющие начальные условия разлёта осколков. Неопределённость условий подрыва обусловлена незнанием параметров подстилающей поверхности земли – при определённых условиях может быть рикошет, может быть изменено угловое положение АСП в течение времени замедления. В этой ситуации условия подрыва предлагается выбирать наилучшими для носителя, что обеспечивает гарантированную безопасность при наихудших условиях. При этом выбор наилучших условий подрыва является самостоятельной задачей, связанной со случайным разлётом и динамикой разлёта осколочных поражающих элементов.

К неопределённостям стохастической природы можно отнести: случайный характер осколочности АСП, что обуславливает даже при заданных условиях подрыва случайные начальные условия движения осколка (масса, вектор начальной скорости, баллистические характеристики); случайность событий «попадание» осколка в БПЛА и «поражение» БПЛА при условии попадания в него осколка. Для снятия неопределённостей стохастического характера ряд исходных данных задаётся случайными величинами с заданными законами распределения.

В условиях имеющихся неопределённостей необходимо решение основных задач: обоснование критериев безопасности БПЛА при бомбометании; разработка метода задания требований по безопасности БПЛА при бомбометании.

Критерием, в соответствии с которым условия бомбометания БПЛА считаются безопасными, является принадлежность значения показателя безопасности допустимой области. Под показателем безопасности будем понимать количественную меру риска потери БПЛА за счёт попадания осколков собственных АСП.

Риск R объединяет вероятность P опасного события (попадание осколков в БПЛА) и его последствия (ущерб U).

Обозначим: ϑ – вектор, описывающий условия накрытия осколками БПЛА (число осколков; для каждого осколка – масса, скорость, угол подхода, коэффициент формы, координаты точки попадания). Заранее неизвестно, какие условия накрытия будут реализованы; закон распределения вектора ϑ определяется условиями подрыва АСП. В свою очередь условия подрыва – вектор α , определяющий скорость АСП в момент подрыва, его пространственную ориентацию (с учётом возможного рикошета) – зависят от условий боевого применения. Условия боевого применения БПЛА описываются вектором H , включающим высоту сброса, скорость БПЛА в момент сброса, угол пикирования и др.

Ущербом U является поражение БПЛА вследствие накрытия осколками БПЛА. Поражение БПЛА – событие A – является случайным, тогда мерой ущерба U является вероятность наступления события A при заданных условиях накрытия.

Но исходя из принципа гарантированного обеспечения требуемого уровня безопасности в наихудших для БПЛА условиях, мерой ущерба будем считать максимально возможную вероятность наступления события A во всём диапазоне реализуемых при заданных условиях боевого применения H условиях подрыва α , т.е.:

$$U = \max_{\alpha} P(A|\vartheta, \alpha, H) = P^*(A|\vartheta, H).$$

Риск R поражения БПЛА осколками собственных АСП определяется произведением:

$$R(H) = P(\vartheta|H)P^*(A|\vartheta, H).$$

Обозначим: $R_{пр}$ – приемлемый риск. Тогда задача определения безопасных условий бомбометания с БПЛА сводится к нахождению такого множества H^* условий бомбометания, при которых выполняется условие $R(H^*) < R_{пр}$.

Ключевым вопросом при оценке безопасности БПЛА при бомбометании с малых высот является понятие «поражения». В соответствии с возможными состояниями БПЛА можно выделить два типа поражения осколками собственных АСП:

повреждения, которые приводят к безвозвратной потере БПЛА (БПЛА не способен вернуться на свой аэродром или же БПЛА получил такие повреждения, при которых ремонт нецелесообразен) – поражение по типу A ;

повреждения, которые приводят к необходимости ремонта после возвращения на аэродром базирования – поражение по типу B .

Введённые по аналогии с типами поражения воздушных целей при действии зенитных и авиационных средств поражения [3; 4] понятия поражения БПЛА позволяют, во-первых, определять количественные оценки вероятности случайного события «поражение» БПЛА осколками собственных АСП как показателя опасности и, во-вторых, определять уровни повреждения конструкции планера, элементов силовой установки и бортового оборудования.

Таким образом, опасность заключается в поражении БПЛА по типу A или по типу B . Риск как мера опасности характеризуется вероятностью реализации опасности, т.е. вероятностью поражения БПЛА по типу A или по типу B .

Безопасные условия боевого применения АСП определяются исключительно расчётным путём. Допустимый риск может быть определён на больших моделях боевых операций с применением ударных БПЛА в условиях противодействия ПВО различной интенсивности. Более простым и легко реализуемым способом оценки допустимого риска поражения БПЛА осколками собственных боеприпасов является использование теоретико-вероятностных моделей, в частности, моделей, основанных на теории марковских случайных процессов с дискретным временем.

В рамках данной модели принимаются допущения, что в каждый момент времени БПЛА может находиться в одном из возможных состояний, а переходы из состояния в состояние возможны только в дискретные моменты времени $k = 1, 2, \dots$, где k – номер вылета. Состояние s_1 соответствует исправному состоянию БПЛА, состояние s_2 – БПЛА поражён по типу A , s_3 – БПЛА поражён по типу B . Последовательность смены состояний представляет собой простую марковскую цепь, граф состояний которой приведён на рисунке 1. Состояние s_2 является поглощающим.

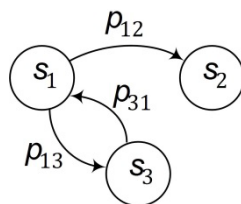


Рисунок 1 – Граф состояний марковской цепи

Рассмотрим эволюцию распределения вероятностей в рассматриваемой марковской цепи, когда поражение БПЛА (переход в состояния s_2 и s_3) возможно только за счёт противодействия ПВО противника (риск поражения осколками собственных АБ пока не учитывается).

Матрица переходных вероятностей будет иметь вид:

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ p_{31} & 0 & p_{33} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Вероятности переходов p_{ij} – перехода системы из состояния в состояние могут быть определены следующим образом. Введём случайную величину X – число вылетов БПЛА, совершённых до его поражения средствами ПВО противника (до поражения по типу A) при заданной интенсивности ПВО. Будем считать, что по результатам моделирования (или экспертного опроса) известно среднее число $M[X]$ вылетов до поражения ударного БПЛА средствами ПВО противника (поражения по типу A). Тогда, принимая допущение о том, что условия боевого применения в целом не меняются, т.е. вероятность поражения БПЛА от вылета к вылету постоянна, можно считать, что случайная величина X подчиняется геометрическому распределению. Тогда:

$$p_{12} = 1/M[X]. \quad (2)$$

Вероятность p_{13} перехода в состояние s_3 может быть задана из анализа частоты боевых повреждений БПЛА, требующих его ремонта. По мнению экспертов, для тяжёлых

БПЛА $p_{13} > p_{12}$, для средних $p_{13} \approx p_{12}$, а для лёгких $p_{13} < p_{12}$. Рассмотрим для примера тяжёлый БПЛА и примем в первом приближении $p_{13} \approx 2p_{12}$. Вероятность p_{31} будем считать гораздо меньшей, чем p_{13} . Примем $p_{31} \approx 0,1p_{13} = 0,2p_{12}$, т.е.:

$$p_{13} = 2p_{12}; \quad p_{31} = 0,2p_{12}; \quad p_{33} = 1 - p_{31} = 1 - 0,2p_{12}. \quad (3)$$

Тогда:

$$\|p_{ij}\| = \begin{vmatrix} 1 - 3p_{12} & p_{12} & 2p_{12} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,2p_{12} & 0 & 1 - 0,2p_{12} \end{vmatrix},$$

т.е. все элементы матрицы переходных вероятностей можно представить через вероятность p_{12} .

В начальный момент времени БПЛА находится в неповреждённом состоянии, т.е. $p_1(0) = 1; p_2(0) = p_3(0) = 0$.

Задача описания динамики рассматриваемой системы сводится к вычислению распределения вероятностей $p_i(k)$ – вероятностей того, что система после k -го шага (боевого вылета) будет находиться в состоянии s_i . Эти вероятности могут быть вычислены с использованием рекуррентной формулы:

$$p_j(k) = \sum_{i=1}^3 p_i(k-1)p_{ij}.$$

На рисунке 2 приведены результаты расчётов распределения вероятностей $p_i(k)$ при $M[X] = 20$ и при $M[X] = 50$.

В связи с тем, что среди состояний рассматриваемой системы существует поглощающее состояние s_2 , то в установившемся режиме система будет находиться в этом состоянии. Предлагается рассматривать распределение вероятностей после k_M вылетов, где $k_M = [M[X]]$ – среднее число вылетов, округлённое до ближайшего большего целого числа (так как $M[X]$ может быть дробным), $[\cdot]$ – операция округления до ближайшего большего числа. Целесообразность выбора момента k_M обусловлена устойчивостью получаемого решения при изменении $M[X]$ в широком диапазоне (см. рисунок 2).

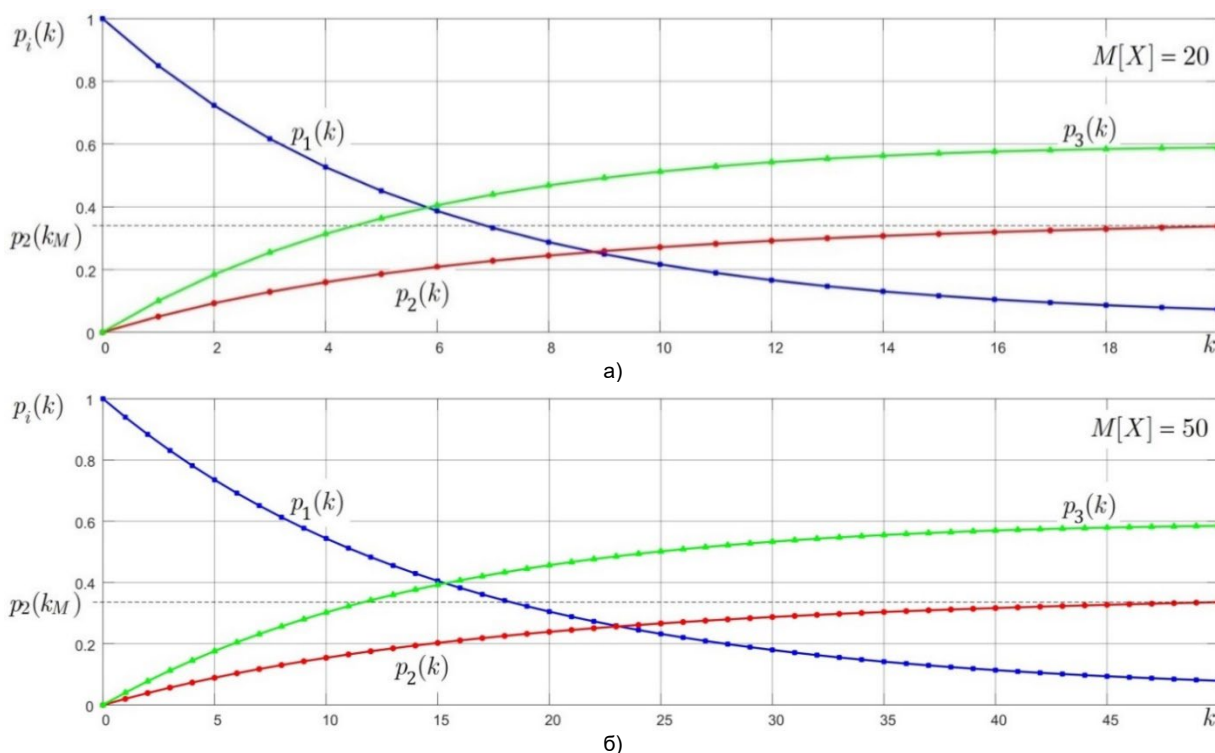


Рисунок 2 – Распределение вероятностей состояний системы при $M[X] = 20$ (а) и при $M[X] = 50$ (б)

Особый интерес представляет вероятность нахождения системы именно в состоянии s_1 (БПЛА не поражён). Так, например, при заданных в (3) соотношениях вероятность того, что через 20 вылетов БПЛА останется в непоражённом состоянии, равна $p_1(k_M) = 0,0791$ (при $k_M = M[X] = 20$).

Для оценки уровня приемлемого риска поражения БПЛА осколками собственных АСП можно воспользоваться подходом, применяемым при обосновании безопасности опасных производственных объектов [5]. Допустимый риск определяется относительно некоторого так называемого фонового риска. Так, например, риск гибели персонала должен быть на несколько порядков ниже риска аварии (задаётся конкретно), риск гибели населения – ещё на несколько порядков ниже.

Тогда в рассматриваемой задаче в качестве фонового риска можно рассматривать риск потери БПЛА за счёт противодействия средствами ПВО противника за k_M вылетов. Риск потери БПЛА за счёт попадания осколков собственных БПЛА должен быть на несколько порядков ниже риска потери за счёт противодействия ПВО противника.

Предлагаемая концепция приемлемого риска потери БПЛА за счёт поражения осколками собственных АБ заключается в том, что безопасными условиями бомбометания с БПЛА будем считать такие условия, при которых в течение k_M вылетов риск поражения БПЛА осколками собственных АБ был бы на два порядка меньше, чем риск поражения БПЛА средствами ПВО противника.

Тогда приемлемый риск поражения БПЛА осколками собственных АБ при бомбометании (в одном вылете) может быть найден с помощью рассматриваемой марковской модели.

Обозначим:

$p_{\text{ПВО}}(k_M)$ – вероятность поражения БПЛА средствами ПВО противника за k_M вылетов:

$$p_{\text{ПВО}}(k_M) = p_2(k_M) + p_3(k_M) = 1 - p_1(k_M); \quad (4)$$

$p_{\text{оск}}(k_M)$ – приемлемая вероятность поражения БПЛА осколками за k_M вылетов;

$p_{\text{оск}}^{\text{пр}}$ – приемлемая вероятность поражения БПЛА осколками за один вылет.

Суть методики оценки приемлемого риска поражения БПЛА осколками собственных АБ при применении предлагаемой концепции приемлемого риска заключается в следующем. На моделях верхнего уровня (или по оценкам экспертов) определяется значение $M[X]$ – среднее число боевых вылетов БПЛА, выполненных к моменту его безвозвратной потери. Определяются значения вероятности p_{12} по формуле (2), а также значения всех вероятностей матрицы (1). С использованием марковской модели рассчитывается распределение вероятностей $p_i(k_M)$ через k_M вылетов, на основании чего по формуле (4) определяется вероятность $p_{\text{ПВО}}(k_M)$. Затем рассчитывается вероятность $p_{\text{оск}}(k_M)$:

$$p_{\text{оск}}(k_M) = p_{\text{ПВО}}(k_M) \cdot 0,01$$

и проводится моделирование с использованием той же марковской модели. В ходе моделирования определяется такое значение вероятности $p_{\text{оск}}^{\text{пр}}$, при которой за k_M вылетов вероятность поражения БПЛА за счёт обоих рассматриваемых факторов риска будет равна значению $p_{\text{ПВО}}(k_M) + p_{\text{оск}}(k_M) = 1,01 \cdot p_{\text{ПВО}}(k_M)$. Вероятность $p_{\text{оск}}^{\text{пр}}$ и является искомой приемлемой вероятностью поражения по типу А БПЛА осколками собственных АСП (за один вылет).

Так, например, при $M[X] = 20$ вероятность поражения БПЛА (по типу А) средствами ПВО противника за один вылет равна $p_{12} = 0,05$. Вероятность поражения БПЛА средствами ПВО за k_M вылетов равна $p_{\text{ПВО}}(k_M) = 1 - p_1(k_M) = 1 - 0,0791 = 0,9209$. Приемлемая вероятность поражения БПЛА осколками собственных АБ за k_M вылетов равна $p_{\text{оск}}(k_M) = 0,01 \times 0,9209 = 0,0092$. Тогда суммарная (за счёт ПВО и за счёт осколков) вероятность поражения за k_M вылетов не должна превышать значения $p_{\text{ПВО}}(k_M) + p_{\text{оск}}(k_M) = 0,9209 + 0,0092 = 0,9301$. Такая вероятность достигается при вероятности поражения БПЛА в одном вылете, равной 0,0539, откуда допустимая (приемлемая) вероятность поражения по типу А БПЛА осколками собственных АБ равна $0,0539 - 0,05 = 0,0039$.

Результаты моделирования по определению приемлемого риска $R_{пр}$ поражения осколками собственных АБ за один вылет в зависимости от значения среднего числа боевых вылетов БПЛА, выполненных к моменту его безвозвратной потери, при заданных в (3) соотношениях приведены на рисунке 3.

Полученные результаты легко интерпретируются – в случае малой интенсивности противодействия ПВО противника требования по безопасности ужесточаются. Так, при $M[X] = 10$ (мощная ПВО противника, среднее число вылетов до безвозвратной потери равно 10) приемлемая вероятность поражения осколками собственных АБ за один вылет равна 0,0079. При слабом противодействии ПВО противника (например, при $M[X] = 75$) приемлемая вероятность гораздо меньше: 0,0010.

Результаты расчётов получены для заданного соотношения вероятностей переходов (3).

Соотношение вероятностей p_{12} и p_{13} определяется характеристиками уязвимости БПЛА, в частности, площадями уязвимых отсеков, поражаемых по типам A и B , и схемой уязвимости БПЛА. Так, отношение $p_{13} = 2p_{12}$ определяет, что в заданных условиях поражение по типу B происходит в два раза чаще, чем по типу A .

Рассмотрим влияние коэффициента k в соотношении $p_{13} = kp_{12}$. С увеличением значения коэффициента k при неизменной вероятности поражения БПЛА в одном вылете по типу A растёт вероятность поражения БПЛА по типу B , т.е. вероятность поражения БПЛА по тому или иному типу поражения растёт. А как было показано выше, при увеличении вероятности потери БПЛА требования по безопасности при бомбометании снижаются. Это иллюстрируют результаты моделирования, проведённые при $k = 1,0 \dots 2,5$ (см. рисунок 4).

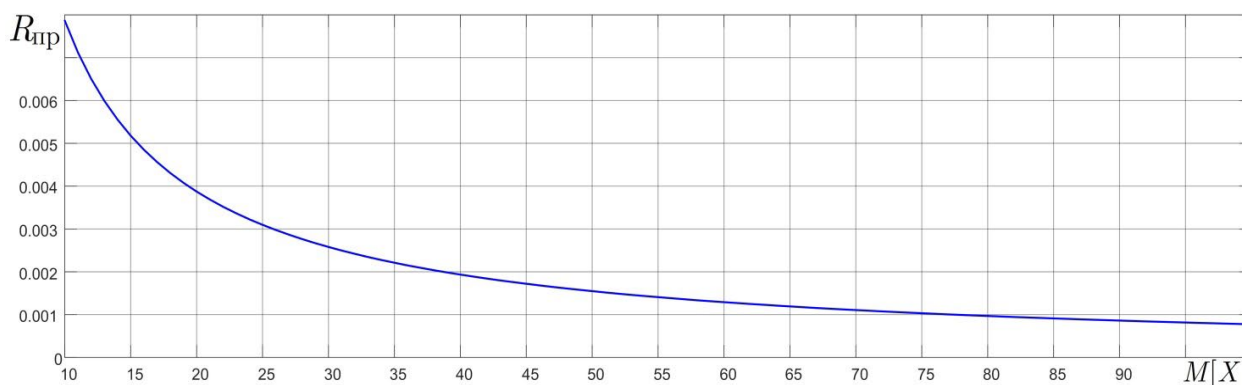


Рисунок 3 – Зависимость значения приемлемого риска от среднего числа боевых вылетов БПЛА

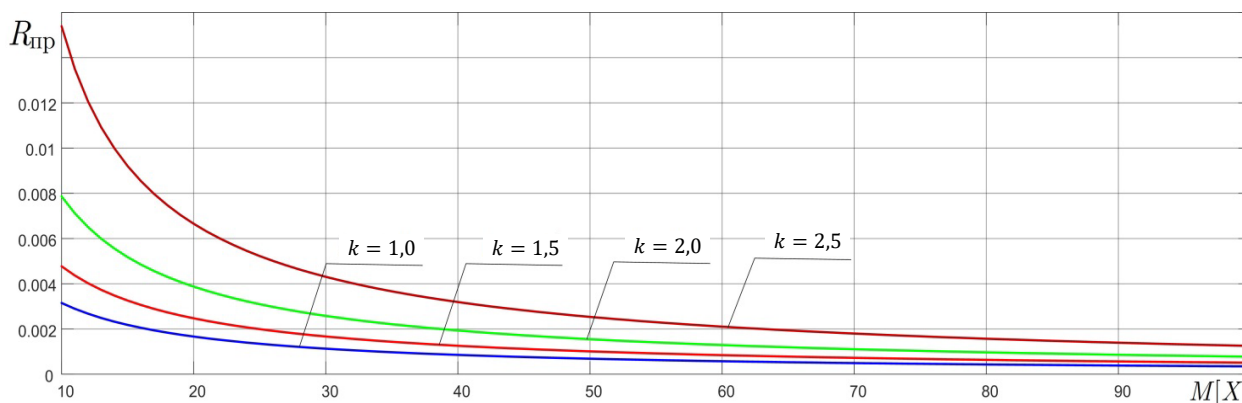


Рисунок 4 – Зависимость значения приемлемого риска от среднего числа боевых вылетов БПЛА при различном соотношении вероятностей поражения осколками собственных АБ БПЛА по типам A и B

Конкретные соотношения вероятностей p_{12} и p_{13} могут быть определены при проведении сквозного моделирования бомбометания БПЛА при заданных условиях, в ходе которого проводится моделирование полёта БПЛА и АБ, разлёта осколков, поражающего действия осколков.

Таким образом, проведение сквозного моделирования позволит определить приемлемый риск $R_{пр}$ потери БПЛА за счёт поражения осколками собственных АСП. Зная $R_{пр}$ можно определить множество H^* условий бомбометания, при которых выполняется условие $R(H^*) < R_{пр}$.

Для реализации такого подхода необходима разработка системы имитационных моделей, включающей:

модели баллистики АБ и динамики полёта БПЛА при атаке и выходе из атаки;

модель осколочности АБ;

модель определения условий подрыва АБ;

модель баллистики осколочных поражающих элементов;

модель уязвимости БПЛА к действию одиночных осколков;

модель для оценки вероятности попадания осколков собственных АББ в БПЛА.

Программная реализация системы моделей позволит путём имитационного моделирования провести обоснования безопасных условий бомбометания БПЛА при одиночном и при групповом применении ударных БПЛА. По результатам расчётов могут быть предложены практические рекомендации в руководящие документы (в том числе и в «Руководство по боевому применению ударных БПЛА»).

Заключение

Требование абсолютной безопасности при бомбометании с БПЛА в связи с отсутствием экипажа нецелесообразно. Обоснование безопасных условий бомбометания с БПЛА на основе концепции приемлемого риска позволит в значительной мере расширить условия боевого применения БПЛА. Снижение минимальной высоты бомбометания повысит выживаемость БПЛА в условиях противодействия ПВО противника.

Оценка опасности поражающих факторов взрыва АБ показала, что осколки собственных АСП способны нанести ущерб БПЛА-носителю, который может привести к поражению БПЛА.

С использованием теории риска проведены анализ риска и оценка риска. Предложена концепция приемлемого риска потери БПЛА за счёт поражения осколками собственных АБ, которая заключается в том, что безопасными условиями бомбометания с БПЛА считаются такие условия, при которых риск поражения БПЛА осколками собственных АБ был бы на два порядка меньше, чем риск поражения БПЛА средствами ПВО противника. Марковская модель смены состояний БПЛА позволяет оценить численные значения приемлемого риска, что даёт возможность с использованием сквозного моделирования определить безопасные условия бомбометания с БПЛА при их одиночном и групповом применении. Приведена структура системы имитационных моделей, необходимых для решения поставленной задачи.

Список источников

1. Дорофеев А.Н., Морозов А.П., Саркисян Р.С. Авиационные боеприпасы. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978. 445 с.

2. Быков А.А., Порфирьев Б.Н. Об анализе риска, концепциях и классификации рисков // Проблемы анализа риска. 2006. Т.3. №4. С. 319-337.

3. Желязков Е.П., Комраков Н.Ю., Крысин А.В. Методические основы определения исходных данных по уязвимости воздушных целей для оценок эффективности стрельбы по ним малогабаритными ЗУР. Тверь: 2 ЦНИИ МО РФ, 2002. 68 с.

4. Комраков И.М., Желязков Е.П., Дмитриевич Д.Г., Коростелёв С.Ю., Крысин А.В., Лексюткин В.В., Лопин Г.А., Маркова Л.И., Осмоловский Э.Ю., Скрынников А.А., Смагин П.В.,

Старостин С.В., Тузиков Л.В., Федосов Ю.А., Цурков М.Л., Чуваев В.Н. Характеристики уязвимости воздушных целей при действии осколочно-фугасных боеприпасов. Методы исследования: монография. Тверь: Полипресс, 2021. 499 с.

5. Гражданкин А.И., Печёркин А.С., Николаенко О.В. Об установлении допустимых уровней риска аварии для оценки достаточности компенсирующих мероприятий в обосновании безопасности опасного производственного объекта нефтегазового комплекса // Безопасность труда в промышленности. 2017. №12. С. 51-57.

Информация об авторах

С.М. Мужичек – доктор технических наук, профессор;

А.А. Скрынников – кандидат технических наук, старший научный сотрудник.