

## **Влияние параметров самолета и окружающей среды на величину и положение «коридора выживания» при вероятностных критериях оценки эффективности самолета**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

Сопоставлены области оптимальных высот и скоростей для самолетов с разным уровнем развития САУ, преодолевающих системы ПВО различной эффективности. Составлены таблицы и соответствующие им графики для нахождения величины и положения «коридора выживания» с учетом влияния на самолет и экипаж турбулентности атмосферы на основе вероятностных критериев оценки эффективности самолета. Проведен анализ вероятности успешного преодоления зоны ПВО, сделаны выводы и даны рекомендации по ее увеличению.

**Ключевые слова:** вероятность выживания, коридор выживания, оценка эффективности, противовоздушная оборона (ПВО), рельеф местности, активная система управления с парированием возмущений атмосферной турбулентности (АКСУПАТ), скорость полета, высота полета.

### **1. Роль оценки эффективности самолетов гражданской категории**

Вероятностные критерии оценки эффективности самолета первоначально были разработаны и в настоящее время широко применяются для исследования эффективности военных самолетов различного назначения в самых разнообразных условиях их применения. Однако разработанный математический и методический аппараты могут быть с успехом использованы для целого ряда вполне «мирных» гражданских задач.

Чем, например, проблема поиска и оказания первичной помощи терпящим бедствие на суше или на море методически отличается от задачи уничтожения цели на территории противника? Необходимы та же высокая вероятность своевременного вылета, дальнее наведение, ближний поиск и обнаружение, по возможности точное «попадание» сбрасываемым грузом в группу потерпевших. Лишь множитель вероятности преодоления ПВО обращается в единицу.

Проблема поиска и подавления первичных очагов лесных пожаров таким замечательным самолетом, как Бе-200, еще более развита. Он способен заправляться водой, пролетая на бреющем полете над водоемом, размеры которого не позволяют осуществить посадку. Значит, добавляется задача дальнего наведения и ближнего обнаружения этого водоема. Но методически эти задачи аналогичны, разработка и отладка программного обеспечения обычно все же осуществляется на классических задачах поиска и уничтожения целей, как наиболее разнообразных по количеству подлежащих учету параметров, как самолета, так и окружающей его среды.

В качестве критерия выживаемости боевого самолета рационально использовать вероятность выживания одиночного самолета при преодолении зоны ответственности комплекса ПВО определенного типа:

$$P_{\text{выж}} = P_{\text{ПВО}} = e^{-\lambda p_1 t}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – количество пусков зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) или очередей зенитно-артиллерийского комплекса (ЗАК) в единицу времени;

$p_1$  – вероятность поражения самолета одной ракетой (одной очередью);  
 $t$  – время пребывания в зоне поражения, которое может быть выражено через протяженность зоны ПВО  $L_{ПВО}$  и скорость самолета  $V$ .

Данный критерий позволяет учитывать параметры, характеризующие функционирование системы ПВО, и особенности применяемых боевых самолетов, в том числе и оснащенность их системами активного управления (АКСУ) [1].

**Цель работы** – исследование влияния параметров самолета и окружающей среды на величину и положение «коридора выживания» с учетом влияния на самолет и его экипаж турбулентности атмосферы при вероятностных критериях оценки эффективности самолета; сопоставление областей оптимальных высот и скоростей для самолетов с различной степенью совершенства САУ при преодолении более и менее современных систем ПВО.

## 2. Постановка задачи

В данной статье рассматривается условный истребитель-бомбардировщик. Он примерно соответствует Су-37 с той оговоркой, что в расчете использованы приведенные в открытой литературе данные, которые не всегда точно соответствуют действительности, но вполне пригодны для методических исследований. Тем более условны данные об «окружающей военной самолет среде», основанные на имеющейся в открытой литературе информации о зарубежных комплексах противовоздушной обороны.

Самолет осуществляет прорыв системы ПВО на сверхмалых высотах полета в режиме следования рельефу местности. Тщательный анализ уровня развития противовоздушной обороны вероятных противников показал, что при увеличении высоты полета вероятность уничтожения самолета зенитно-ракетными комплексами быстро возрастает и для высот 300...400 м приближается к 100 %. В то же время при полете на высотах менее 50 м с транс- и сверхзвуковыми скоростями вероятность столкновения с землей значительно увеличивается. Практически приемлемая вероятность выполнения боевого задания обеспечивается только в случае создания самолета, способного лететь в узком «коридоре» высот 80...150 м с достаточно высокой скоростью.

Ограничения на скорость самолета при низковысотном полете накладывают не только его технические характеристики, но и психофизиологические данные летчика в условиях воздействия на самолет атмосферной турбулентности, которая имеет наибольшую интенсивность именно на малых высотах. Самолет Су-37 имеет высокоразвитую систему управления. Одна из ее подсистем носит название активной системы управления с парированием возмущений атмосферной турбулентности (АКСУПВАТ) и использует в качестве исполнительного органа флапероны. Ее функционирование существенно снижает утомляемость экипажа или, при том же максимально-допустимом уровне утомляемости, позволяет значительно повысить скорость преодоления зоны ПВО противника.

## 3. Исследование вероятности выживания самолета при выполнении боевого задания

Исследование выполнено с помощью разработанного на кафедре №103 программного обеспечения. При анализе очередного режима полета вводится высота полета, автоматически для нее определяется соответствующая вероятность утра-

ты самолета из-за столкновения с землей и вероятность утраты самолета из-за воздействия ПВО (рис 1).

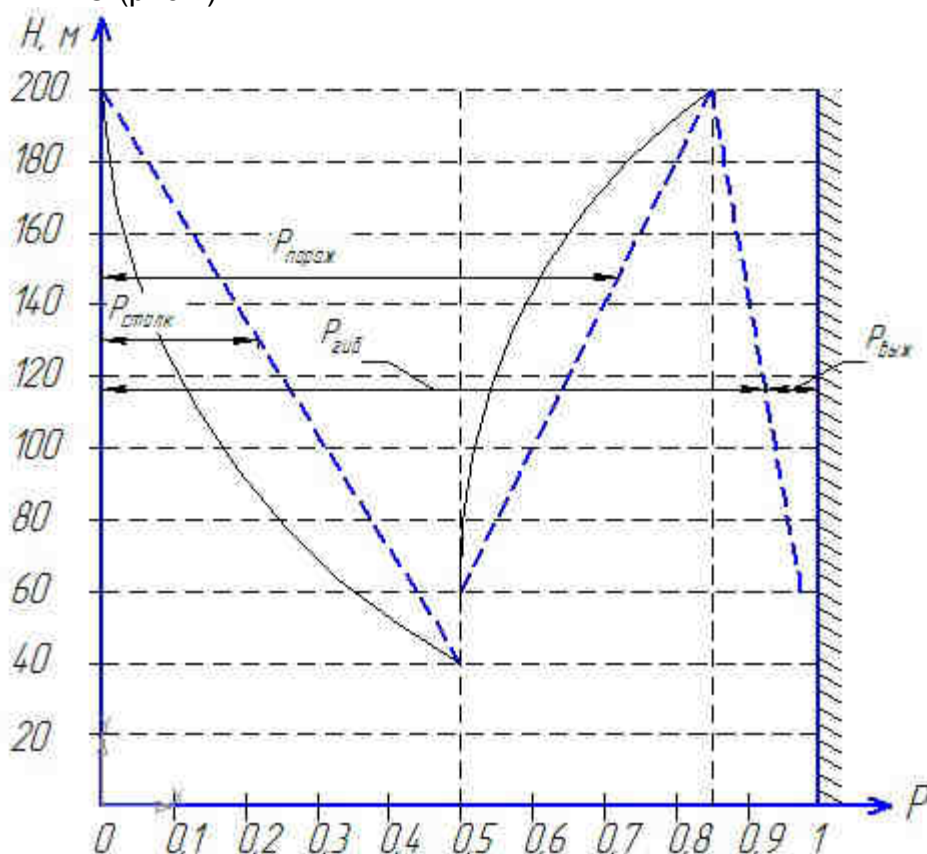


Рис. 1. Вероятностные характеристики самолета, выполняющего боевое задание:  $P_{\text{столк}}$  – вероятность утраты самолета из-за столкновения с землей;  $P_{\text{пораж}}$  – вероятность утраты самолета при одиночном пуске ракеты ПВО противника или одиночном залпе ЗАК;  $P_{\text{выжив}}$  – вероятность выживания самолета после преодоления ПВО;  $P_{\text{гиб}}$  – вероятность гибели самолета;  $H$  – высота полета самолета, м; сплошные линии соответствуют более совершенной системе управления самолета и менее совершенному комплексу ПВО

Обеспечена возможность ввести другое значение одной из этих вероятностей (или двух сразу), проанализировав ее влияние на вероятность выживания поврежденного и неповрежденного самолета. Кроме того, определяется скорость полета, максимально переносимая экипажем. Для этого использована математическая модель атмосферной турбулентности, основанная на принципе спектральной плотности энергии. В такой модели турбулентность представляется случайным процессом и включает в анализ порывы всех форм.

Отношение среднеквадратичного значения нормальной перегрузки, которая возникает от действия вертикальных порывов ветра, к среднеквадратическому значению вызывающей ее скорости является количественным критерием чувствительности самолета к турбулентной атмосфере и называется коэффициентом чувствительности самолета:

$$B = \sigma_{\Delta n} / \sigma_w, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\Delta n}$  – среднеквадратичное значение перегрузки;

$\sigma_w$  – среднеквадратичное значение скорости вертикальных порывов ветра.

Для оценки влияния турбулентности атмосферы на полет самолета используется формула Райса, которая позволяет определить среднее превышение  $N(\Delta n)$  заданного уровня перегрузки  $\Delta n$  гауссова стационарного случайного процесса  $\Delta n(t)$  в единицу времени по формуле

$$N(\Delta n) = \sum_{t=1}^2 N_0 \bar{t}_i e^{-\frac{\Delta n}{B b t}}, \quad (3)$$

где  $N_0$  – средняя частота пересечения случайной величины  $\Delta n$  нулевого уровня в единицу времени.

При значениях  $N(n)$  менее 0,5 влияние турбулентности на работу экипажа малозначительно. В диапазоне от 0,5 до 12,5 наблюдается существенное ухудшение состояния экипажа, однако выполнение полета и полетного задания возможно. При превышении 12,5 выполнение полета невозможно по причине чрезмерно интенсивного воздействия атмосферной турбулентности. В дальнейшей работе принимается  $N(\Delta n) = 12,5$  – граничное значение, которое определяет максимально допустимую по условиям воздействия атмосферной турбулентности скорость полета самолета [1].

При выполнении работы значение скорости самолета рассчитывают из соображения сохранения работоспособности летчика, и оно определяется программой, которая осуществляет расчет повышения скорости самолета до определения скорости, при которой условия полета становятся для пилота труднопереносимыми, то есть максимальными. Также такая скорость обеспечивает максимальную вероятность преодоления ПВО. Результаты определения скорости таким методом дают более точное значение предельно допустимой скорости полета в режиме следования рельефу местности.

Программа обеспечивает получение подробных данных (включая графики переходных процессов, характеризующих приспособленность управления самолетом к физиологическим возможностям летчиком) только для одного анализируемого режима полета. Проводимое исследование изменения с высотой полета выживаемости самолета при выполнении боевого задания потребовало многократных запусков программы и ее настройки на ряд высот из анализируемого диапазона. Параметры, вносимые в программу, представлены в табл. 1:

Таблица 1

Параметры, вносимые в программу

$V_{\text{нач}}$ , м/с	$V_{\text{кон}}$ , м/с	$V_{\text{доп}}$ , м/с	$N_{\text{max}}$	$L_{\text{ПВО}}$ , м	$N(\Delta n)$
100	500	450	12	7000	12,5

В этой таблице  $V_{\text{нач}}$  – это начальная скорость расчета, м/с;  $V_{\text{кон}}$  – конечная скорость расчета, м/с;  $V_{\text{доп}}$  – допустимая скорость полета, м/с;  $N_{\text{max}}$  – максимальное значение  $N(\Delta n)$ ;  $L_{\text{ПВО}}$  – протяженность зоны ПВО;  $N(\Delta n)$  – величина количества заданного уровня перегрузки.

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2 – 5 и на рис. 2 – 5. На этих рисунках  $H$  – исследуемая высота полета, м;  $P_{\text{столк}}$  – вероятность утраты самолета из-за столкновения с землей;  $P_{\text{пораж}}$  – вероятность утраты самолета при одиночном пуске ракеты ПВО противника или одиночном залпе ЗАК;  $P_{\text{выжив}} = 1 - P_{\text{утраты}}$  – вероятность выживания самолета после преодоления ПВО.

Таблица 2 Самолет с современной САУ при преодолении современной системы ПВО противника				Таблица 3 Самолет с устаревшей САУ при преодолении современной системы ПВО противника			
Н	$P_{\text{столк}}$	$P_{\text{пораж}}$	$P_{\text{выжив}}$	Н	$P_{\text{столк}}$	$P_{\text{пораж}}$	$P_{\text{выжив}}$
40	0,5	0,5	0,41389	40	0,5	0,5	0,421389
50	0,439453	0,5	0,445026	50	0,40995	0,5	0,455492
60	0,382813	0,5	0,472301	60	0,33864	0,5	0,484445
70	0,330078	0,501786	0,496291	70	0,2804	0,501786	0,51287
80	0,28125	0,507143	0,51432	80	0,23186	0,507143	0,536196
90	0,236328	0,516071	0,530172	90	0,19087	0,516071	0,550893
100	0,195313	0,528571	0,543077	100	0,15596	0,528571	0,561404
110	0,15503	0,545643	0,552798	110	0,12613	0,544643	0,567955
120	0,125	0,564286	0,559157	120	0,1	0,564286	0,571071
130	0,0957031	0,5875	0,562033	130	0,07876	0,5875	0,5701121
140	0,0703125	0,614286	0,561372	140	0,06018	0,614286	0,566189
150	0,0488281	0,644643	0,557187	150	0,0447	0,644643	0,55913
160	0,03125	0,678571	0,549556	160	0,0313	0,678571	0,549533
170	0,0175781	0,716071	0,538622	170	0,0205	0,716071	0,537297
180	0,0078125	0,75743	0,524588	180	0,0118	0,75743	0,522826
190	0,0019531	0,80125	0,507706	190	0,005	0,80125	0,506403
200	0	0,85	0,492585	200	0	0,85	0,496585

Таблица 4 Самолет с усовершенствованной системой отслеживания местности при преодолении современной системы ПВО				Таблица 5 Самолет с современной системой отслеживания местности при преодолении перспективного комплекса ПВО противника			
Н	$P_{\text{столк}}$	$P_{\text{пораж}}$	$P_{\text{выжив}}$	Н	$P_{\text{столк}}$	$P_{\text{пораж}}$	$P_{\text{выжив}}$
40	0,5	0,5	0,421389	40	0,5	0,5	0,41389
50	0,439453	0,5	0,444026	50	0,439453	0,5	0,44026
60	0,382813	0,5	0,466301	60	0,382813	0,5	0,454301
70	0,330078	0,525	0,4827612	70	0,330078	0,593236	0,4563262
80	0,28125	0,55	0,496062	80	0,28125	0,648253	0,456613
90	0,236328	0,575	0,504467	90	0,236328	0,689436	0,458056
100	0,195313	0,6	0,511327	100	0,195313	0,7224613	0,461153
110	0,15503	0,625	0,516576	110	0,15503	0,749783	0,464975
120	0,125	0,65	0,520162	120	0,125	0,7726973	0,469027
130	0,0957031	0,675	0,522051	130	0,0957031	0,791976	0,473007
140	0,0703125	0,7	0,522223	140	0,0703125	0,808109	0,476715
150	0,0488281	0,725	0,520677	150	0,0488281	0,8214127	0,480015
160	0,03125	0,75	0,517425	160	0,03125	0,832031	0,482816
170	0,0175781	0,775	0,512508	170	0,0175781	0,840264	0,485061
180	0,0078125	0,8	0,505965	180	0,0078125	0,845985	0,486718
190	0,0019531	0,825	0,499863	190	0,0019531	0,8492513	0,487784
200	0	0,85	0,4926585	200	0	0,85	0,4896585

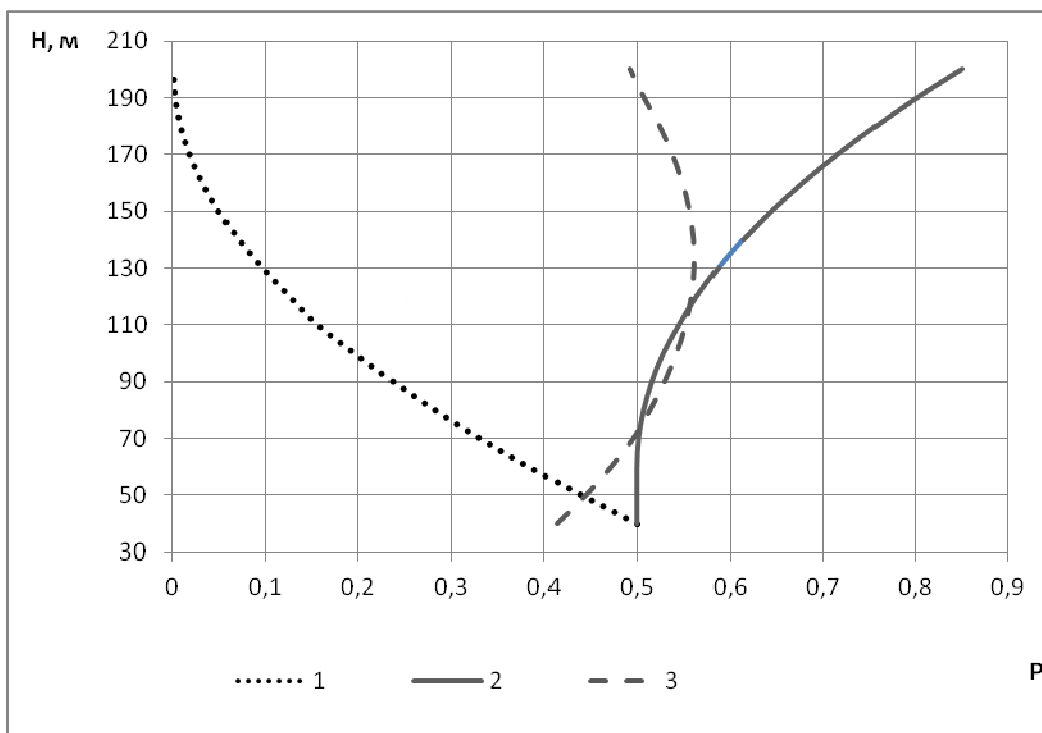


Рис. 2. Самолет с современной САУ при преодолении современной системы ПВО противника:  
 1 –  $P_{\text{столк}}$ , 2 –  $P_{\text{пораж}}$ , 3 –  $P_{\text{выжив}}$ .

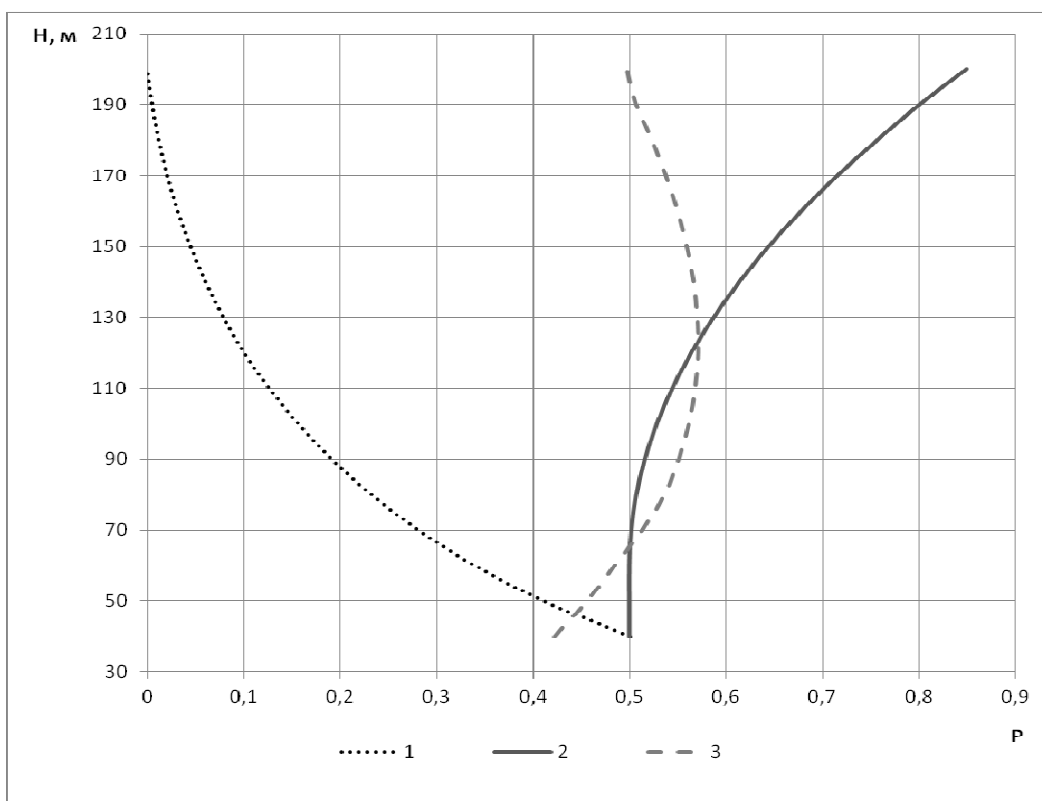


Рис. 3. Самолет с устаревшей САУ при преодолении современной системы ПВО противника:  
 1 –  $P_{\text{столк}}$ , 2 –  $P_{\text{пораж}}$ , 3 –  $P_{\text{выжив}}$ .

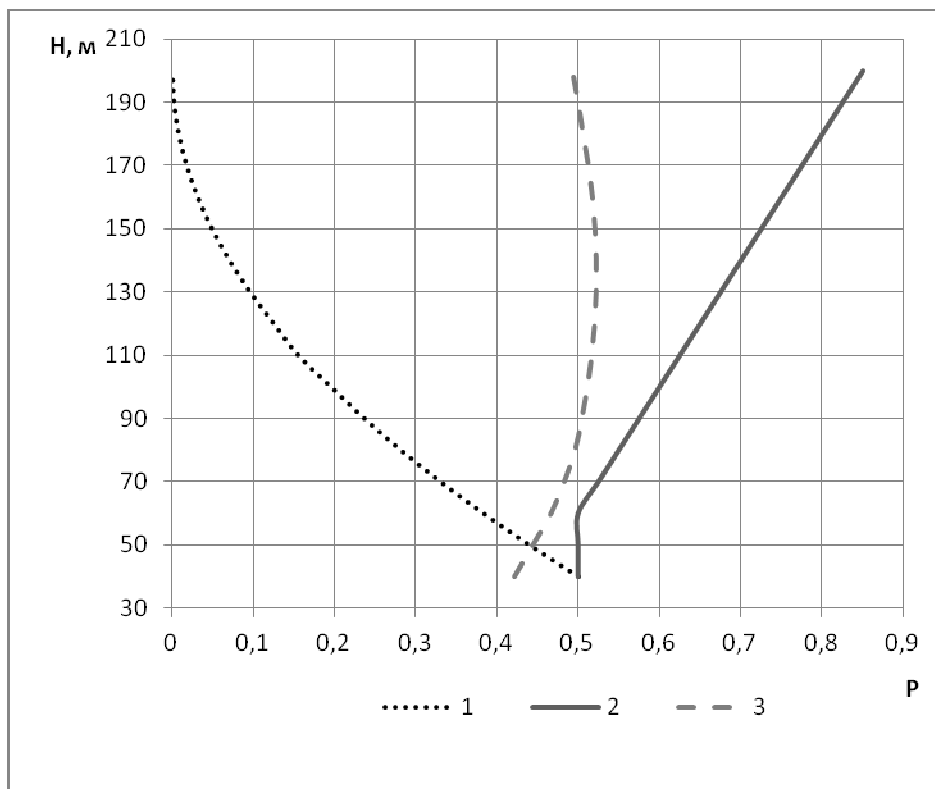


Рис. 4. Самолет с усовершенствованной системой отслеживания местности преодолении современной системы ПВО противника:  
 1 –  $P_{\text{столк}}$ , 2 –  $P_{\text{пораж}}$ , 3 –  $P_{\text{выжив}}$ .

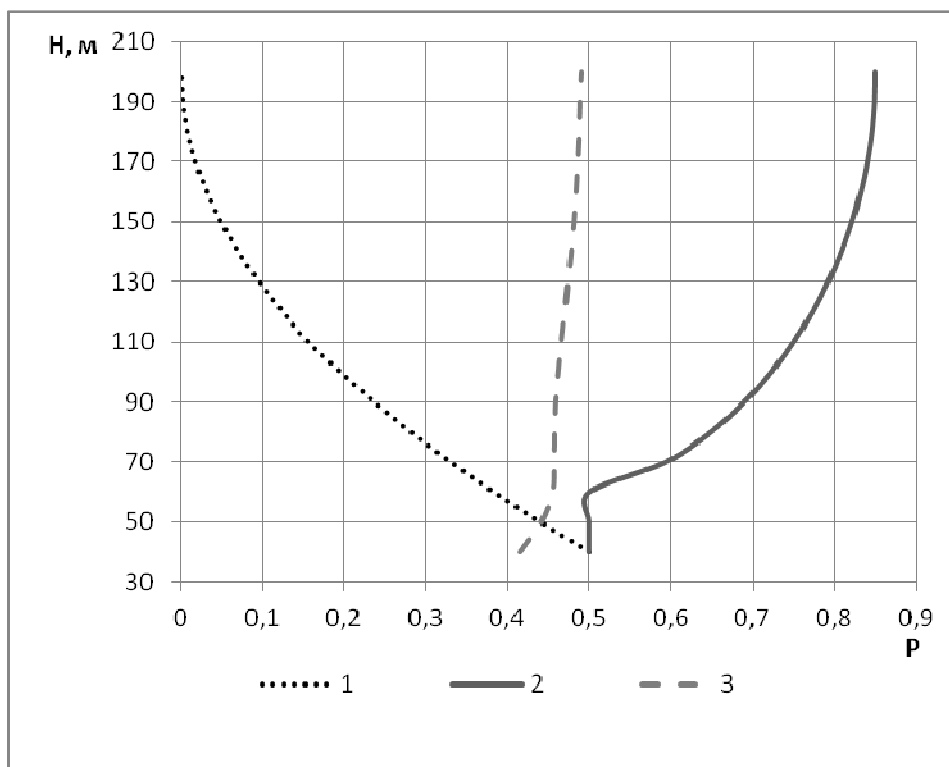


Рис. 5. Самолет с современной системой отслеживания местности при преодолении усовершенствованного комплекса ПВО противника:  
 1 –  $P_{\text{столк}}$ , 2 –  $P_{\text{пораж}}$ , 3 –  $P_{\text{выжив}}$ .

На графиках четко виден «коридор выживания». В данном случае это диапазон высот 120...160 м, в котором вероятность выживания самолета максимальна.

У некоторых вызывает удивление, почему все же при такой высокой эффективности одиночного пуска или залпа удастся обеспечить приемлемую вероятность выживания самолета. Однако этот залп или пуск еще надо осуществить! Ни один оператор переносного ЗРК Stinger не сможет его использовать против самолета, летящего на высоте 100 м со сверхзвуковой скоростью. Просто не хватит времени его реакции.

Самостоятельный интерес представляет исследование надежности работы всей сложной системы преодоления ПВО. Подсистема парирования возмущений атмосферной турбулентности как компонент активной системы управления низковысотного самолета не является «жизненно важным агрегатом» (ЖВА), поскольку самолет способен продолжать полет как при отказе (боевом повреждении) электронной части системы, так и при выходе из строя ее исполнительных механизмов (аэродинамических рулевых поверхностей). Однако прекращение ее функционирования существенно ухудшает тактико-технические данные самолета, значительно снижая вероятность успешного преодоления зоны ответственности комплекса ПВО противника. В дальнейшем желательно проанализировать как последствия отказа АкСУПВАТ, так и наиболее эффективные решения для повышения ее живучести.

#### **4. Заключение**

Сопоставление полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Преодоление современной системы ПВО — задача очень сложная и рискованная даже для такого высокоразвитого самолета, как Су-37. Вероятность ее успешного выполнения даже на оптимальном режиме едва превышает 55 %.

2. Шансы успешного преодоления ПВО самолета с менее совершенной системой управления становятся существенно меньше и едва превышают 50 %, что можно считать недопустимым. Экстремум смещается вверх (в соответствии с возможностями САУ) и становится более размытым.

3. Обратный процесс происходит при анализе полета самолета с усовершенствованной системой отслеживания местности при преодолении современной системы ПВО. Экстремум остается четким, величина вероятности выживания даже увеличивается до 57 % и оптимальная высота – 110-120 м.

4. Рассчитать выживаемость самолета при преодолении усовершенствованных комплексов ПВО данное программное обеспечение не позволяет.

5. В дальнейшем желательно проанализировать последствия отказа АкСУПВАТ и, таким образом, определить надежность рассмотренного способа повышения выживаемости самолета.



### Список литературы

1. Рыженко, А. И. Исследования выживаемости современных самолетов методами математического моделирования [Текст]: учеб. пособие по дипл. проектированию и лаб. практикуму по курсу «Надежность и живучесть самолетов и вертолетов»/ А.И. Рыженко, В. И. Рябков, С. В. Шевченко – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1999. – 83 с.

Поступила в редакцию 11.11. 2015

### **Вплив параметрів літака і навколишнього середовища на величину і положення «коридору виживання» при ймовірнісних критеріях оцінювання ефективності літака**

Зіставлено області оптимальних висот і швидкостей для літаків з різним рівнем розвитку САУ, що долають системи ППО різної ефективності. Складено таблиці й відповідні їм графіки для знаходження величини і положення «коридору виживання» з урахуванням впливу на літак і екіпаж турбулентності атмосфери на основі ймовірнісних критеріїв оцінювання ефективності літака. Проведено аналіз імовірності успішного подолання зони ППО, зроблено висновки і подано рекомендації для її збільшення.

**Ключові слова:** імовірність виживання, коридор виживання, оцінювання ефективності, протиповітряна оборона (ППО), рельєф місцевості, активна система керування з парируванням збурень атмосферної турбулентності (АКСУПЗАТ), швидкість польоту, висота польоту.

### **Influence of Airplane Parameters and Ambient Environment on Value and Location of the “Survival Tunnel” at Probabilistic Criteria of Airplane Effectiveness Evaluation**

The ranges of optimum altitudes and speeds for airplanes with different development level of ACS are compared. The airplanes of this type overcome ADS area of different effectiveness. The tables and corresponding diagrams for calculation of “survival tunnel” with account of the atmospheric turbulence influence on airplane and crew based on probabilistic criteria of airplane effectiveness evaluation are given. The analysis of probability of successful overcome of ADS area is made conclusion and recommendations for increase of its probability are given.

**Keywords:** probability of survival, survival tunnel, effectiveness evaluation, air defense system (ADS), terrain relief, active control system with function of atmospheric turbulence parrying, flight speed, flight altitude.