

Проблемы и оценка безопасности полетов

Ю.В. Попов, старший научный сотрудник, д-р техн. наук

Научно-исследовательский центр эксплуатации и ремонта авиационной техники, г. Люберцы, Московская область

e-mail: tov_popov@rambler.ru

Ключевые слова:

авиационная транспортная система, безопасность полетов, воздушное судно, авиационное происшествие, катастрофа, распределение Вейбулла.

Представлен анализ авиационной транспортной системы. Показаны причины авиационных происшествий. Приведены количественные показатели оценки безопасности полетов. Проведено сравнение зависимости числа катастроф на 100 тысяч часов налета с типовой зависимостью интенсивности отказов от времени. Зависимость показателя числа катастроф подразделяется на три интервала. Приведены статистические характеристики показателя числа катастроф по интервалам. Показатель числа катастроф по годам совпадает с распределением Вейбулла. Представлены оценки параметров распределения Вейбулла. Получены значения вероятности катастроф для каждого интервала. Проведен анализ полученных результатов. Представлены пути дальнейшего развития авиационной транспортной системы и повышения безопасности полетов.

1. Введение

Авиационная транспортная система (АТС) является сложной нелинейной динамической системой, которая обладает следующими свойствами: чрезвычайная сложность, наличие большого числа функциональных подсистем, иерархичность управления, нестационарность параметров, стохастичность поведения, адаптивность и самоорганизация. АТС состоит из ряда функциональных подсистем (рис. 1) [1].

Основным звеном АТС является система «экипаж — воздушное судно — среда». Эта система обеспечивает выполнение основной задачи — использование воздушного судна (ВС) по назначению.

АТС относится к открытым системам со слабыми обратными связями и, как следствие, является потенциально опасной. Требования к устойчивости и управляемости АТС высокие. Каждой подсистеме АТС соответствует свой процесс функционирования, который направлен на решение главной задачи по обеспечению эффективности и безопасности полетов. Управление процессами производится с помощью стратегий эксплуатации: летной, технической, коммерческой, аэродромной. При этом под стратегией эксплуатации понимается совокупность правил, обеспечивающих заданное управление процессом функционирования соответствующей службы для



Рис. 1. Структурная схема авиационной транспортной системы

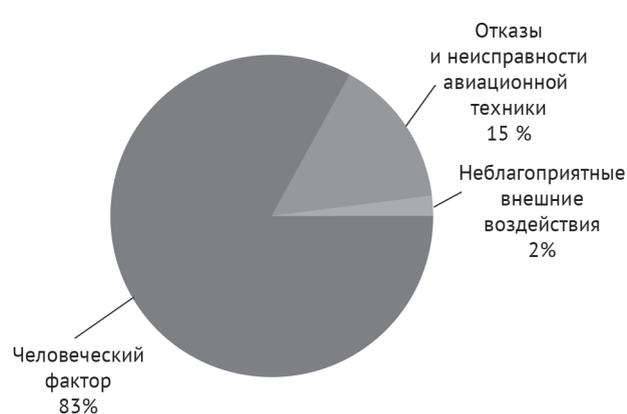


Рис. 2. Причины авиационных происшествий

поддержания оптимальных режимов работы. Сбой в любом звене АТС может привести к авиационному происшествию (АП). На основании статистических данных выявлены причины авиационных происшествий (АП) и произведено их ранжирование (рис. 2). Анализ причин АП показывает, что доминирующим фактором в них является человеческий.

2. Статистические показатели безопасности полетов

Для количественной оценки безопасности полетов и решения ряда практических задач по ее повышению применяются относительные статистические показатели. В практике стран — членов ИКАО¹ в основном используют следующие показатели:

K_K — показатель катастроф на 100 тыс. часов налета

$$K_K = \frac{N_K}{T_\Sigma} 10^5,$$

где: N_K — число катастроф, T_Σ — число часов налета;

K_L — показатель катастроф на 10^8 км налета

$$K_L = \frac{N_K}{L_\Sigma} 10^8,$$

где L_Σ — число км налета;

K_M — показатель катастроф на 1 млн вылетов

$$K_M = \frac{N_K}{M} 10^6,$$

где M — число вылетов;

\dot{m} — показатель числа погибших в катастрофах на 10^8 пассажиро-километров

$$\dot{m} = \frac{m}{p} 10^8,$$

где: $p = n l$ — число пассажиро-километров, n — количество пассажиров, l — количество км налета каждым пассажиром.

Приведенные показатели являются представительными и простыми.

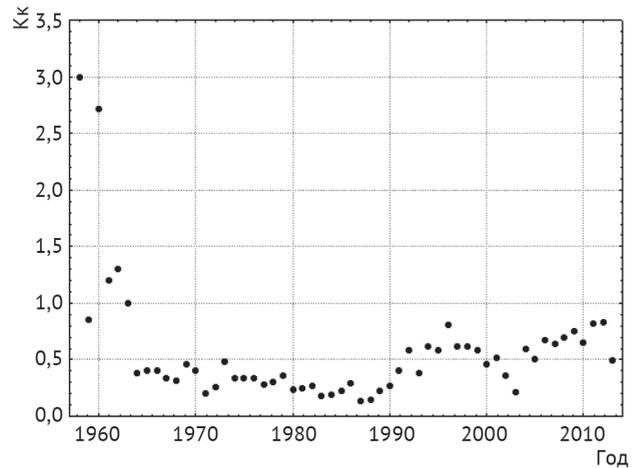


Рис. 3. Показатель K_K числа катастроф на 100 тыс. часов налета

Межгосударственный авиационный комитет (МАК)² в своих докладах о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации государств — участников Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства использует относительный показатель число катастроф на 100 тыс. часов налета (K_K). ИКАО в своих годовых докладах о состоянии безопасности полетов в мире использует показатель число катастроф на миллион вылетов. Это связано с трудностями определения налета мирового парка ВС. На рис. 3 представлен относительный показатель число катастроф на 100 тыс. часов налета (K_K) — в целом по парку ВС с газотурбинными двигателями (ГТД) за период 1958–2013 гг. для СССР и стран СНГ.

На рис. 4 приведена линеаризованная обобщенная зависимость относительного показателя числа катастроф на 100 тыс. часов налета, которая представляет собой кривую, несколько схожую с типовой зависимостью интенсивности отказов от времени (рис. 5).

Зависимость интенсивности отказов представляет собой сложную кривую с тремя характерными интервалами (I, II, III). Интервал I часто называют периодом приработки элементов. Величина интенсивности отказов на этом интервале во многом зависит от качества сборки схем сложных устройств, соблюдения требований монтажа и т.п. На интервале II

¹ ИКАО — Международная организация гражданской авиации (ИКАО от англ. ICAO — International Civil Aviation Organization) — специализированное учреждение ООН, устанавливающее международные нормы гражданской авиации и координирующее её развитие с целью повышения безопасности и эффективности. (Редакция).

² Межгосударственный авиационный комитет (МАК) — исполнительный орган СНГ по делегированным государствами функциям и полномочиям в области гражданской авиации и использования воздушного пространства. Учрежден на основании подписанного 30 декабря 1991 г. межправительственного «Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства». Занимается сертификацией воздушных судов, аэродромов и авиакомпаний. Ведёт Авиарегистр МАК (АР МАК). Занимается расследованием происшествий на воздушном транспорте. (Редакция)

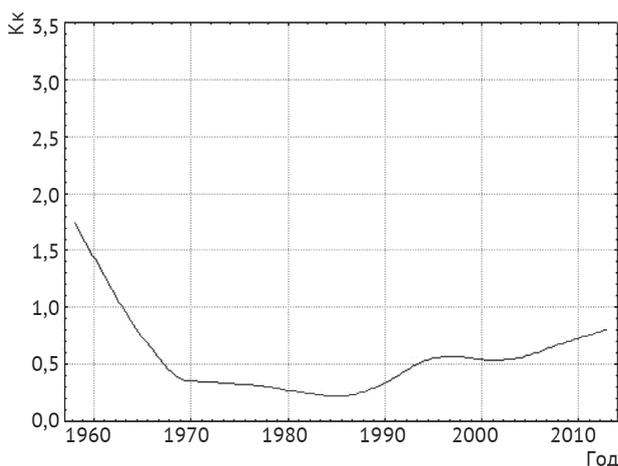


Рис. 4. Линеаризованная обобщенная зависимость показателя K_k числа катастроф

интенсивность отказов постоянна. На интервале III по причинам, обусловленным естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и т.д., интенсивность отказов резко возрастает, увеличивается число деградационных отказов. Интервал II соответствует экспоненциальной модели распределения вероятности безотказной работы. На этом интервале значительно упрощается расчет надежности, интенсивность отказов на нем наиболее часто используется как исходный показатель надежности элемента [2].

Зависимость показателя K_k (см. рис. 3) по аналогии с типовой зависимостью интенсивности отказов (см. рис. 5) можно разделить на три интервала. *Первый интервал* с 1958 по 1963 г. связан с началом эксплуатации ВС с ГТД. В это время началось формирование АТС под эксплуатацию ВС с ГТД. Элементы АТС были разрознены и мало связаны между собой. ВС с ГТД имели конструктивно-производственные недостатки. Эксплуатируемый в то время самолет Ту-104 на некоторых режимах полета и при определенных центровках обладал недостаточным запасом продольной устойчивости и даже был неустойчив. До первой катастрофы этого самолета в 1958 г. было шесть однотипных инцидентов, на которые не обращали внимание. После первой катастрофы было принято постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 1408-688 от 27.12.1958 «О катастрофах самолетов Ту-104 и мерах повышения безопасности полетов на этих самолетах». В этом постановлении ставилась задача устранить выявленные в процессе расследования АП недостатки, а Гидрометцентр СССР обязали более точно прогнозировать состояние атмосферы на трассах реактивных самолетов.

Второй интервал эксплуатации ВС с ГТД с 1964 по 1991 г. соответствует стабильному уменьшению показателя K_k . В данный период времени сформиро-

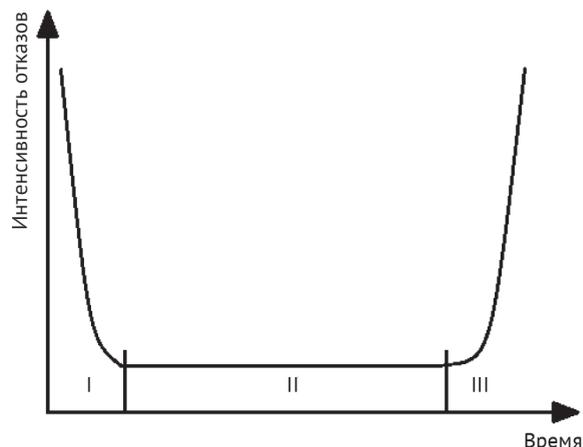


Рис. 5. Типовая зависимость интенсивности отказов от времени

валась АТС и осуществлялся постоянный контроль государства за безопасностью полетов [3].

Третий интервал связан со вступлением нашей страны в принципиально новый этап развития. Произошли коренные сдвиги, которые привели к долгосрочным и всеобъемлющим экономико-политическим последствиям. Произошло резкое снижение производства и потребления авиационных услуг. Падение объема перевозок происходило на фоне существенного роста числа авиакомпаний. До 1992 г. в стране была одна авиакомпания «Аэрофлот». На рис. 6 представлена динамика количества эксплуатантов воздушных судов за рассматриваемый период.

В этот период происходило ослабление государственного контроля над безопасностью полетов. Новые рыночные отношения подтолкнули к структурным изменениям в АТС. Эти изменения носили негативный характер, которые привели к общему упадку АТС. Количество катастроф возросло и пока-

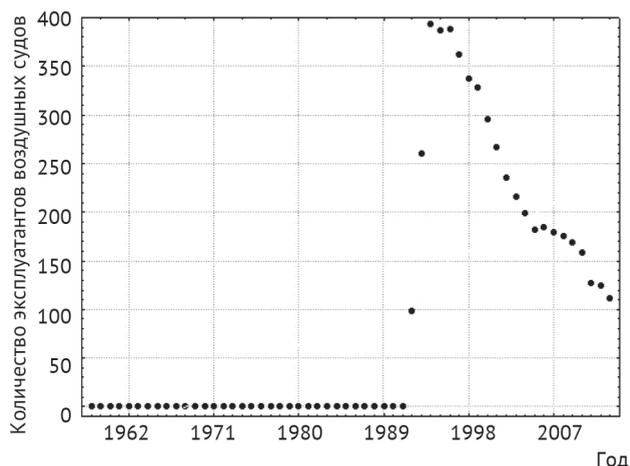


Рис. 6. Количество эксплуатантов воздушных судов

Таблица 1
Статистические характеристики показателя числа катастроф

Период	Математическое ожидание	Min значение	Max значение	Среднеквадратическое отклонение
с 1958 по 1963	1,678333	0,850000	3,000000	0,932747
с 1964 по 1991	0,297370	0,140000	0,480000	0,089377
с 1992 по 2013	0,582609	0,210000	0,830000	0,154720

затель K_k имеет хаотический характер. Показатель K_k является дискретной случайной величиной. В табл. 1 приведены статистические характеристики случайной величины показателя K_k для выделенных интервалов (периодов эксплуатации ВС с ГТД).

3. Определение вероятности катастроф

Анализ линеаризованной обобщенной зависимости показателя K_k (см. рис. 4) показывает, что данная зависимость представляет собой распределение Вейбулла. Указанные три интервала для показателя K_k можно описать, используя трехпараметрическое распределение Вейбулла [4]. Согласно этому, плотность распределения вероятности наступления АП описывается формулой:

$$f(t) = \frac{\beta \left(\frac{t-\delta}{b}\right)^{\beta-1}}{b} e^{-\left[\left(\frac{t-\delta}{b}\right)^\beta\right]}, t \gg \delta \gg 0,$$

где: β — параметр формы (определяется подбором в результате обработки эмпирических данных, $\beta > 0$); b — параметр масштаба; δ — параметр положения, эти величины всегда положительны. Можно показать, что для $t \geq \delta$ вероятность

$$R(t) = 1 - f(t) = e^{-\left[\left(\frac{t-\delta}{b}\right)^\beta\right]} \quad (1)$$

и, следовательно, интенсивность

$$h(t) = \frac{\beta(t-\delta)^{\beta-1}}{b^\beta}. \quad (2)$$

Отметим, что при параметре $\beta = 1$ распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное распределение. При $\beta < 1$ интенсивность отказов монотонно убывает (период с 1958 по 1963 г.), а при $\beta > 1$ — монотонно возрастает (период с 1992 по 2013 г.) (см. рис. 4). Следовательно, путем подбора параметра β можно получить на каждом из трех участков теоретическую кривую $K_k(t)$, которая достаточно близко совпадает с зависимостью относительного показателя числа катастроф

по годам, и тогда расчет требуемых показателей надежности АТС можно производить на основе известной закономерности. Для получения оценок параметров трехпараметрического распределения Вейбулла используются стандартные итерационные методы минимизации функций, которые связаны с рядом вычислительных трудностей и проблемами, возникающими при оценке параметра положения δ .

Степень обоснованности оценки параметров распределения Вейбулла в немалой степени зависит от метода, применяемого для их определения. Обоснованные оценки параметров позволяет устанавливать численный метод решения уравнения (2) для двух значений $K_k(T_1)$ и $K_k(T_2)$. В результате преобразования получается уравнение для определения параметра положения:

$$\delta = \frac{\theta T_1 - T_2}{\theta - 1},$$

$$\text{где } \theta = \left(\frac{K_k(T_2)}{K_k(T_1)}\right)^{\frac{1}{\beta-1}}.$$

В качестве входной величины для определения параметров распределения Вейбулла использован параметр формы β . По эмпирическим данным β_i (где $i = 1..n$) определялось n значений параметров формы и масштаба. Для каждого i значения параметров распределения Вейбулла определяется функция (2) и проверяется ее адекватность реальной зависимости $K_k(t)$. Оценка адекватности осуществляется при помощи выражения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((K_k(i) - h(i))^2)}{n-1}}. \quad (3)$$

Значения параметров приведены в табл. 2

Таблица 2
Значения параметров распределения Вейбулла

Параметр	β	b	δ	σ
I	0,4	366,77853	9,734E-09	0,7329304
	0,5	3000	5,556E-06	0,7266404
	0,6	5258,1062	0,0003492	0,7211637
	0,7	6945,7243	0,0063322	0,7199657
	0,8	7834,7107	0,0534441	0,7294939
	0,9	7999,3226	0,2740423	0,7538762
II	1	2616,711	0,487608	0,091
	1,05	7952,1349	3,0141972	0,1518682
	1,09	7025,3001	4,4279868	0,1556452
III	1,13	4749,6687	6,3556276	0,1604073
	1,17	1586,9705	8,944606	0,1657913

Анализ табл. 2 показывает, что для первого интервала оптимальными будут параметры при $\beta = 0,7$, а для третьего интервала — при $\beta = 1,05$, так как отклонение теоретических значений $h(t)$ от статистических $K_k(t)$ при таких параметрах β соизмерим с результатами расчета K_k . На рис. 7 приведено соотношение расчетных значений $h(t)$ и статистических показателей $K_k(t)$.

Для определения адекватности зависимостей, приведенных на рис. 7, воспользуемся индексом детерминации, который определяется выражением [5]

$$I^2 = 1 - \frac{Q_e}{Q},$$

где $Q_e = \sum_{i=1}^n (K_k(i) - h(i))^2$, $Q = \sum_{i=1}^n (K_k(i) - \bar{K})^2$,

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_k(i).$$

Коэффициент детерминации, как и коэффициент корреляции, принимает значения от -1 до $+1$. Чем ближе значение коэффициента по модулю к 1, тем точнее оцениваемые зависимости. Коэффициент детерминации для зависимостей $K_k(t)$ и $h(t)$ составляет 0,745. Воспользуемся выражением (1) для определения вероятности катастрофы в течение года для трех интервалов. Полученные значения вероятности катастроф приведены в табл. 3.

Анализ табл. 3 показывает, что для современного, третьего, интервала времени вероятность катастрофы больше, чем для начального периода эксплуатации ВС с газотурбинными двигателями.

В [6] установлено, что для второго интервала эксплуатации ВС существует периодичность изменения количества катастроф на 100 тыс. часов налета и она составляет три года. Наличие регулярности в показателе K_k свидетельствует об управлении безопасностью полетов в этот период. Управление безопас-

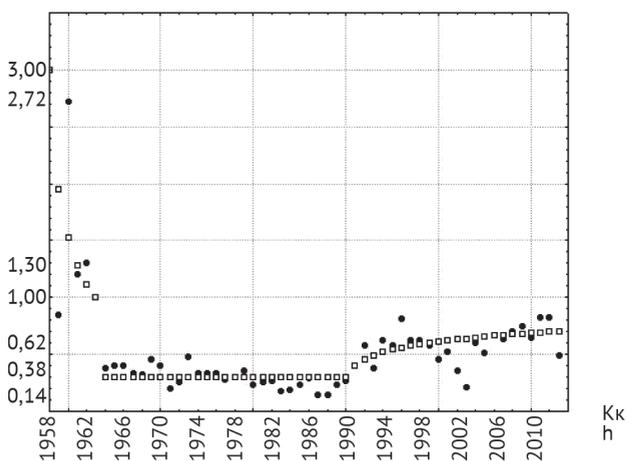


Рис. 7. Соотношение значений $h(t)$, рассчитанных по распределению Вейбулла, и статистических показателей $K_k(t)$

Таблица 3

Вероятность катастроф	
Интервал времени	Вероятность катастрофы
I	0,307
II	0,035
III	0,329

ностью полетов — это воздействие на АТС с целью предотвратить авиационные происшествия. Управляющие воздействия на АТС выбираются при анализе причин авиационных происшествий. Управление безопасностью полетов означает выявление факторов, снижающих расчетную безопасность полетов существующего парка ВС, и их устранение, а также организацию целенаправленной деятельности по повышению безопасности полетов ВС [7].

Основными управляющими воздействиями в этот период были искоренение недостатков в подходе к созданию авиационной техники и технологии ее создания, совершенствование требований к летной годности, к подготовке летного и наземного персонала, эксплуатирующего технику, создание АТС. После каждого авиационного происшествия разрабатывались и внедрялись эффективные мероприятия по устранению опасных отклонений в работе АТС.

Современный, третий интервал эксплуатации характеризуется хаотическим изменением показателя K_k . В 1990-е годы произошло ослабление государственного контроля над безопасностью полетов. Рыночные отношения подтолкнули к структурным изменениям в АТС. Изменились отношения в ее структурных подразделениях. Нарушилась система управления системой безопасностью полетов. Ослабло внимание к проблеме безопасности полетов со стороны государства. Поэтому вероятность катастрофы увеличилась почти в 10 раз по сравнению со вторым интервалом.

4. Мероприятия, направленные на повышение безопасности полетов

В настоящее время в Воздушный кодекс РФ Федеральным законом от 25.12.2012 № 260-ФЗ введено положение, по которому «реализация государственной системы управления безопасностью полетов гражданских воздушных судов обеспечивается в Российской Федерации в соответствии с международными стандартами Международной организации гражданской авиации». Новая идеология предотвращения АП и инцидентов предполагает разработку и применение систем управления безопасностью полетов (СУБП) [8] воздушных судов следующими лицами:

- разработчиками и изготовителями гражданских воздушных судов;
- юридическими лицами, осуществляющими коммерческие воздушные перевозки;

- юридическими лицами, осуществляющими техническое обслуживание гражданских воздушных судов и аэронавигационное обслуживание полетов;
- образовательными учреждениями, осуществляющими подготовку пилотов гражданских воздушных судов.

СУБП должна обеспечивать систематический подход к управлению безопасностью полетов, включать необходимые организационные структуры и распределять ответственность между всеми участниками АТС.

Советом ИКАО 25 февраля 2013 г. принят Международный стандарт и Рекомендуемая практика «Управление безопасностью полетов» (Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации), которые начали действовать с 14 ноября 2013 г. в государствах — членах ИКАО [9]. В документе указано, что «Принятие Приложения 19 отражает глобальную стратегию ИКАО в области обеспечения безопасности полетов, которая предусматривает повышение уровня стандартизации, более тесное сотрудничество между заинтересованными участниками авиационной системы, новые процедуры обмена информацией и приоритетные инвестиции в оборудование и в авиационный персонал, необходимые для обеспечения безопасности полетов в будущем».

Согласно Приложению 19, государство принимает Государственную программу по безопасности

полетов (ГосПБП) в целях достижения приемлемого уровня эффективности обеспечения безопасности полетов гражданской авиации. ГосПБП включает следующие компоненты:

- а) государственная политика и цели обеспечения безопасности полетов;
- б) управление рисками для безопасности полетов на государственном уровне;
- в) обеспечение безопасности полетов на государственном уровне;
- г) популяризация вопросов безопасности полетов на государственном уровне.

Принимаемая государством ГосПБП должна соответствовать масштабам и сложности авиационной деятельности. Концептуальные рамки для принятия и выполнения ГосПБП изложены в дополнении А, а инструктивный материал, касающийся государственной программы по безопасности полетов, содержится в [8].

Подлежащий достижению приемлемый уровень эффективности обеспечения безопасности полетов устанавливается государством. В данной статье предложен метод определения вероятности катастроф с использованием распределения Вейбулла. Его можно применять для определения приемлемого уровня эффективности обеспечения безопасности полетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безопасность полетов / Под ред. Р. В. Сакач. — М.: Транспорт, 1989. — 239 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надёжности. — СПб.: БХВ Петербург, 2006. — 704 с.
3. Попов Ю.В. Расследование авиационных происшествий — безопасность полетов в исторической ретроспективе // Проблемы безопасности полетов. — 2012. — № 1. — С. 4–22.
4. Крамер Г. Математические методы статистики. — М.: Мир, 1975. — 648 с.
5. Эконометрика / Под ред. И.И. Елисейевой. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.
6. Попов Ю.В. О выделении периодической компоненты из временного ряда показателя количества катастроф // Проблемы безопасности полетов. — 2008. — № 8. — С. 10–17.
7. Голубев И.С. Основные принципы и функции управления безопасностью полетов // Проблемы безопасности полетов. — 1984. — № 3. — С. 3–9.
8. Руководство по управлению безопасностью полетов. Дос 9859. Издание третье. ИКАО. 2013.
9. Приложение 19. Управление безопасностью полетов / Издание первое. ИКАО. 2013.

Flight Safety Challenges and Assessment

Yu.V. Popov, Doctor of Technical Sciences (Safety of flights), Senior Researcher, Research Centre for Aircraft Maintenance and Repair, Lyubertsy, Moscow region

The article analyses air transport system and presents reasons of air incidents and flight safety estimation score. Dependence of air accidents amount per 100 000 flight hours is compared to typical time dependent behavior of failure rate and divided into three intervals. The intervals are analyzed and the reasons of change of parameter score are submitted. Statistical characteristics of the number of accidents per interval parameter are provided. Parameter of air accidents per year matches the Weibull distribution; estimations of Weibull distribution parameters are submitted. Probability of accidents is calculated for each interval; obtained results are analyzed. Ways for furthering flight safety and air transport system are suggested.

Keywords: air transport system, safety of flights, aircraft, air incident, air accident, Weibull distribution.