

Воробьев В.М., д-р техн. наук  
Захарченко В.А., канд. техн. наук  
Енчев С.В., канд. техн. наук  
Тихонов В.В., канд. техн. наук  
Ильенко С.С.

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОТКАЗОБЕЗОПАСНОСТИ КАБИННОГО ЭРГАТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА

Аэрокосмический институт

*Кабинный интегрированный интерфейс системы «экипаж – воздушное судно- среда» является ключевым комплексом в задачах реализации уровня безопасности полетов воздушных судов. Количество авиационных происшествий, совершаемых по вине «человеческого фактора», достигает 80 % от общего числа. Международная организация гражданской авиации ИКАО предложила всем странам создать систему управления безопасностью полета на новых принципах организации и качества*

### **Анализ безопасности полетов самолетов с ГТД**

В работе Р.А. Теймуразова и В.А. Полтавца [1] на основе анализа выполнения пассажирских перевозок на транспортных самолетах 1...3 классов с взлетной массой более 10 т (тяжелые самолеты), их аварийности за пятидесятилетний период (1957 – 2006 годы) обобщены данные и рассмотрена динамика показателей производительности и эффективности. При создании конкурентоспособных воздушных судов (ВС) авиационной промышленностью обеспечивается удовлетворение не только требований летной годности, включая требования к отказобезопасности, но и снижение аварийности, связанной «с человеческим фактором» летного и наземного персонала по причине несовершенства средств и методов его обучения и тренировки.

В настоящее время повышается значимость статистического анализа материалов по аварийности эксплуатируемых ВС за длительный период, так как он обеспечивает достоверность количественных достигнутых показателей безопасности полетов. Глубокий научный анализ предполагает необходимость системного подхода к управлению безопасностью полетов и жесткого надзора государственными органами.

Анализ причин авиационных происшествий (АП) за длительный период

эксплуатации ВС показал, что большинство АП обусловлено сочетанием нескольких причинных факторов, где каждый являлся необходимым (в пределах границы ожидаемых условий эксплуатации – ОУЭ), а вместе – создали условие неблагоприятного исхода полета. Предотвращение повторяемости АП характеризует эффективность авиационной транспортной системы (АТС), а оценка значимости каждого причинного фактора, выражаемая вероятностью проявления и степенью влияния на безопасность полетов, позволяет обосновать наиболее рациональное направление по суммарному эффекту. Таким образом, с позиции теории управления анализ обеспечивает реализацию принципа обратной связи при проверке достаточности мер при создании и эксплуатации самолетов.

Анализ аварийности ВС в СССР и странах СНГ за период (1957 – 2006 г.г.) показал [1], что если в начальный период освоения тяжелых самолетов с ГТД авиационные происшествия были связаны с конструктивно-технологическими недостатками ВС (53%) с долей на «человеческий фактор» – 47%, то с совершенствованием авиационной техники на период (1962...2006 г.г.) с отказами функциональных систем ВС связано 23% АП, а с «человеческим фактором» – 74%.

Влиянию «человеческого фактора» на безопасность полетов посвящено мно-

жество работ отечественных и зарубежных ученых и исследователей [1 – 3]. Без учета террористических актов, на исправной авиационной технике, при хорошей погоде на реактивных самолетах мира произошло в период с 1959 по 1995 год 64,4% АП по причине «человеческого фактора» (отчет фирмы Боинг). Анализ статистических данных в военной и гражданской авиации СССР и РФ за период (1959...1995 г.г.) показывает, что 70% всех АП произошло вследствие неадекватных действий, грубых ошибок экипажей и авиадиспетчеров [2]. Эти данные свидетельствуют о преобладающем причинном человеческом факторе в образовании АП.

Летная эксплуатация, все виды обслуживания и обеспечения полетов подвержены влиянию человеческого фактора. Цена операторских ошибок имеет тенденцию к повышению, поэтому ИКАО рекомендует всем странам-участникам

создать систему управления безопасностью на новых принципах организации и качества. На рис.1 показаны статистические зависимости универсального показателя ИКАО  $K_{\text{пог}}$  – количества погибших в катастрофах на 1 млрд пассажиро-километров на регулярных и нерегулярных авиалиниях США, ИКАО (без СССР), СССР-СНГ за период с 1982...2006 г.г. Показатель  $K_{\text{пог}}$  предполагает однозначное понимание своего значения, в отличие от других (количество АП на 1 млрд. часов налета и др.).

### Человеческий фактор и безопасность полетов

Причин усиления влияния человеческого фактора на возникновение АП, в том числе на авиационном транспорте довольно много. По результатам исследований причины роста числа катастроф следующие:

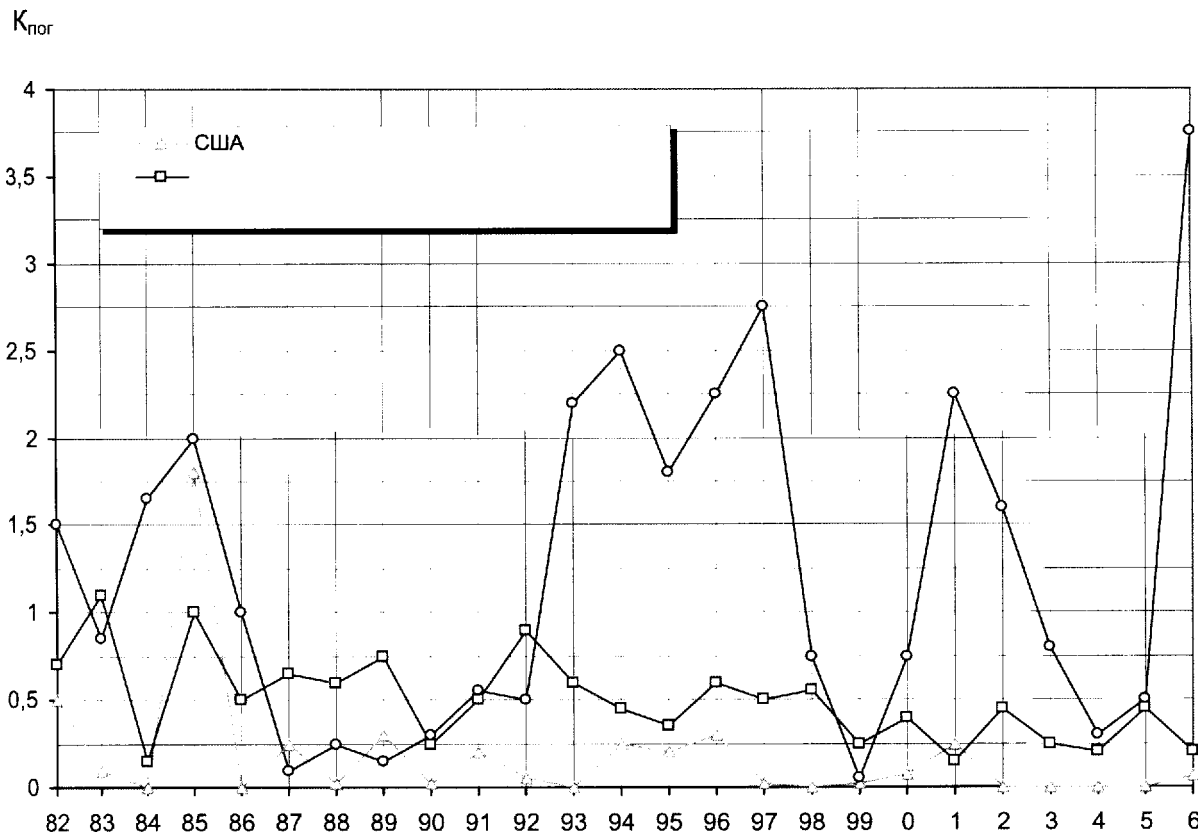


Рис. 1. Количество погибших в катастрофах на 1 млрд. пассажиро-км при регулярных и нерегулярных пассажирских перевозках тяжелыми самолетами с ГТД в СССР и государствах-участниках Соглашения, США, ИКАО (без США, СССР-СНГ) по годам

– вычислительная техника, расширив физические и интеллектуальные возможности оператора, вошла в противодействие с возможностями человека по парированию угроз;

– рост цены ошибки происходит из-за увеличения стоимости транспорта и процесса обучения оператора;

– привыкание человека к опасности, благодушие и притупление профессиональной бдительности при эксплуатации высоконадежных систем (отказоустойчивой авионики);

– мотивация действий оператора с экономическими стимулами.

В триаде общения кабинного интерфейса системы «экипаж – ВС – среда» авиационному происшествию предшествует неблагоприятное сочетание причинных факторов: человеческих, технических, воздействий среды. Используя концепцию ИКАО [3] о влиянии факторов на успешность выполнения полета, авиационная безопасность подразумевает их взаимную корреляцию и увязку в рамках полетного задания (рис. 2,3).

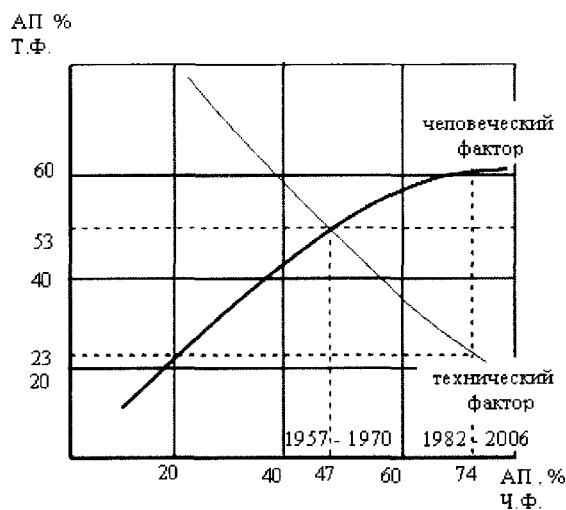


Рис 2. Число АП % на историческом пути развития ВС с ГТД в СССР и СНГ

Появление аварийного фактора в одном из элементов (рис.3) приводит к «цепной реакции» взаимодействующих элементов и образованию эффекта АП, перераспределяющего взаимосвязи. При локализации аварийного фактора в одном из элементов необходимо учитывать взаимокорреляцию в других.

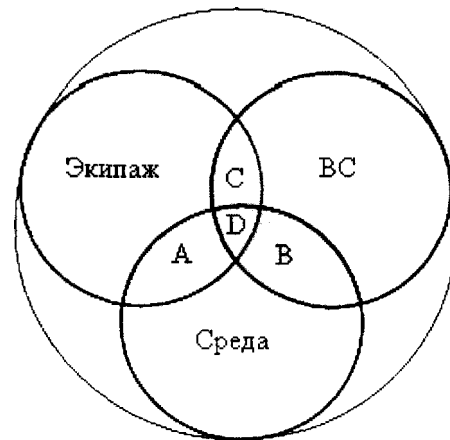


Рис. 3. Взаимодействие причинных факторов в полете

Понятие «человеческий фактор» включает в себя:

– психофизиологические параметры (характеристики) экипажа;

– их диапазон изменений (ресурсы) и предельные значения в конкретных условиях взаимодействия (тип ВС, полетная ситуация и т.д.).

Комплексной характеристикой качества и уровня взаимодействия эргатического комплекса «экипаж-ВС-среда» является *отказобезопасность*, которая количественно оценивает качество функционирования комплекса с учетом эффективности взаимодействия экипажа на конкретном участке траектории полета ВС в реальной среде.

*Отказобезопасность* – комплексная вероятность (статистическая) характеристика надежности системы «экипаж-ВС-среда» как конечного звена в безопасности полетов определяется конъюнкцией (логическим произведением): отказоустойчивости ФС; живучести ФС и ВС; надежности действий экипажа в полетных ситуациях; безотказности контакта с внекабинной обстановкой, диспетчером, руководителем полетов и ВПП [4]:

$$P_{\text{бип}}(t) = \sum_{a=1}^b P_{\text{фс}}(t) \sum_{m=1}^n P_{\text{овв}}(t) \sum_{l=1}^k P_{\text{эф}}(t) \sum_{q=1}^c P_{\text{соб}}(t), \quad (1)$$

где  $P_{\text{бип}}(t)$  – глобальный вероятностный критерий благополучного исхода полета;

$P_{\text{фс}}(t)$  – отказоустойчивость функциональных систем и планера;

$a, b$  – виды и сочетания отказов ФС;

$P_{\text{овв}}(t)$  – живучесть ФС и ВС, учитывающая вероятность непопадания в условия опасных внешних воздействий;

$m, n$  – виды и типы экстремальных условий эксплуатации («сдвиг» ветра, выкачивание ВС с ВПП, интенсивная грозовая деятельность «пыльные» бури и др.);

$P_{\text{эф}}(t)$  – отказобезопасность как вероятность парирования экипажем или автоматической системой возникших в полете ситуаций на определенном уровне качества (эргатический фактор);

$l, k$  – виды и типы парируемых полетных ситуаций;

$P_{\text{собр}}(t)$  – безотказность службы обеспечения безопасности полетов;

$q, c$  – виды и типы отказов диспетчера, состояния ВПП.

Вероятностный критерий благополучного исхода полета (1) носит глобальный характер и может быть скорректирован на участках полета дополнительными требованиями. Он вполне может быть выражен временной функцией, которая определяет его привязку ко времени всего полета и этапам взлета, полета по маршруту и посадке

$$P_{\text{бип}}(t) = P_{\text{бип}}(t_{\text{взл.}}, t_{\text{пол.}}, t_{\text{пос.}}); \quad (2)$$

$$P_{\text{бип}}(t) = P_{\text{бип}}(K_{P_{\text{взл.}}} t_{\text{взл.}}, K_{P_{\text{пол.}}} t_{\text{пол.}}, K_{P_{\text{пос.}}} t_{\text{пос.}}), \quad (3)$$

где  $K_{P_{\text{взл.}}}$ ,  $K_{P_{\text{пол.}}}$ ,  $K_{P_{\text{пос.}}}$  – коэффициент риска деятельности экипажа на этапах соответственно взлета, полета по маршруту и посадке.

Анализ типовых ошибок экипажей, проведенный с применением системного подхода в процессе функционирования авиационной системы «экипаж – ВС – среда» показывает, что в зависимости от этапа и условий полета изменяются в широких пределах: интенсивность и характер деятельности экипажа, психофизиологические нагрузки, эмоциональное состояние, временные и пространственные ограничения. Показательно в этом случае поведение коэффициента риска деятельности экипажа [2], определяемого как отношение количества ( $n_i$ ) АП ко времени данного этапа ( $\Delta t_i$ ) в процентном выражении (табл.). При этом изменяется вероятность образования грубых ошибок экипажа.

Таблица Параметры этапов полета и распределения АП и коэффициента риска

Этапы полета	Продолжительность этапа полета		Распределение АП		Коэффициент риска деятельности экипажа $K_{\text{ррз}}$
	Обозначение $\Delta t_i$	мин	Количество $n_{\text{АП}}$	АП в %	
Взлет	$\Delta t_1$	1	5	12,5	4,55
Начальный набор высоты	$\Delta t_2$	1	4	7,5	4,1
Набор высоты	$\Delta t_3$	12	2	6,3	0,17
Полет по маршруту	$\Delta t_4$	51	15	9,9	0,3
Снижение	$\Delta t_5$	10	4	6,0	0,36
Начальный этап захода	$\Delta t_6$	11	4	6,8	0,35
Конечный этап захода	$\Delta t_7$	3	8	18,2	2,49
Посадка	$\Delta t_8$	1	28	32,8	28,05

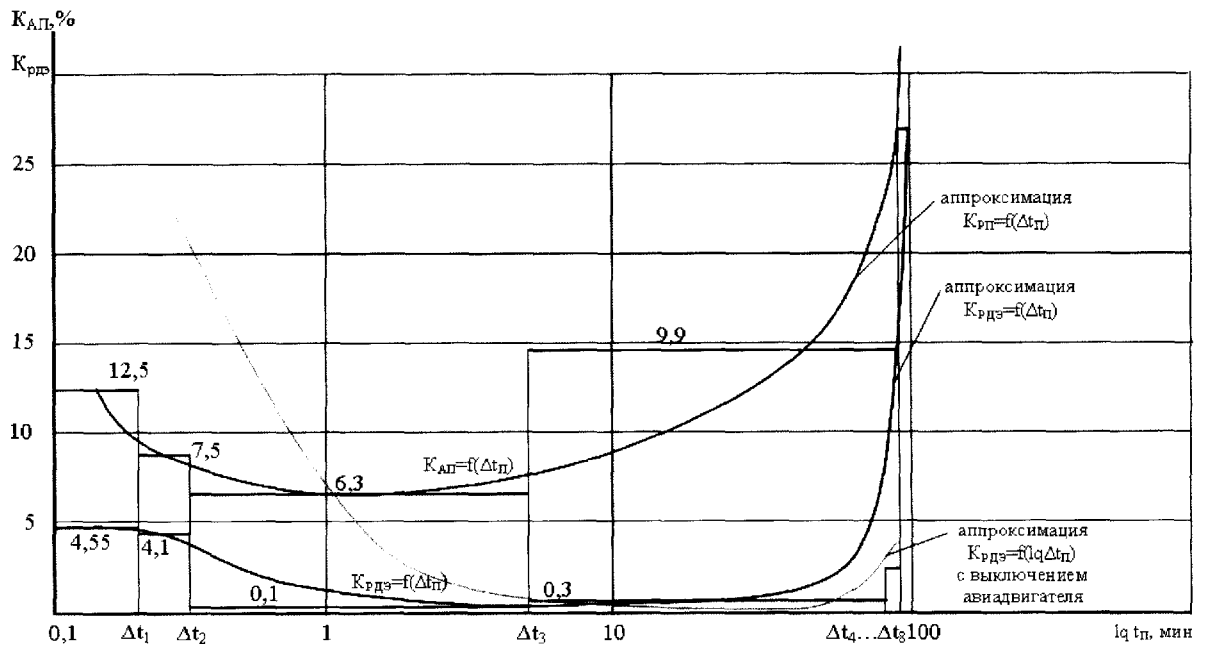


Рис.4. Значения распределения АП в % и  $K_{рдз}$  по этапам полета

Коэффициент риска деятельности экипажа изменяет значения по этапам полета в широких пределах от 0,3 до 28,05. Параметры среды оказывают существенное значение на вероятность ошибки экипажа: полетная видимость, давление и температура воздуха, составляющие скорости ветра, превышение рельефа местности, радиотехнические средства обеспечения безопасности полетов.

Существенное влияние на действие экипажа оказывают конструктивные и аэродинамические характеристики самолета, расположение приборов и органов управления.

#### Постановка задачи исследования

Анализ динамических процессов влияния взаимодействующих аварийных факторов на безопасность полетов целесообразно осуществлять с использованием вероятностной оценки отказобезопасности. В основу модели положена схема взаимодействия системы „экипаж-ВС-среда“, имеющая взаимокоррелирующую схему влияния элементов этой системы.

Область А (рис. 3) рассматривается как вероятностное пространство воздействия среды только на пилота (ограниченная полетная видимость, неадекватные команды диспетчера, неудовлетворительная освещенность ВПП и др.). Эти факто-

ры не оказывают воздействия на работоспособность функциональных систем и планера.

Область В определяет воздействия среды только на воздушное судно и косвенно на экипаж (температура, влажность, давление воздуха, турбулентность). При этом всегда существует вероятность попадания в опасную среду „сдвига“ ветра, „пыльную“ бурю, сильное обледенение, встреча с птицами и др.

Область С соответствует случаям, когда ошибки экипажа, вызванные различными причинами, накладываются на конструктивные и эргономические несовершенства конкретного типа ВС.

Область Д рассматривается как объединенные воздействия отказов функциональных систем и планера, ошибок экипажа и одновременные воздействия среды на экипаж и ВС. Точки Д формируют пространство наиболее сложных, но редких полетных ситуаций, когда скачкообразно возрастает вероятность авиационного происшествия.

Важно то, что при этом каждая компонента авиационной транспортной системы и среды не превышает допустимых пределов и не создает угрозу безопасности полетов. Сочетание усложняющих факторов можно объяснить проявлением системного эффекта синергетического характера, приводящим к результату не-

гитивного характера – *тяжелому авиационному происшествию*.

Вероятностная модель оценки отказобезопасности системы «экипаж-ВС-среда», с учетом разбивки на подэтапы характеристики полета ВС, должна быть динамической и универсальной. Основные допущения: случайные события в системе «экипаж-ВС-среда» независимы и сочетания взаимодействия системы происходят „по цепочкам”: А(Э-ОС), В(С-ВС), С(Э-ВС) и Д(Э-ВС-С), где А,В,С,Д, - области взаимодействия элементов, а Э, ВС,С - элементы триады соответственно экипажа, воздушного судна и среда.

**Вероятностная динамическая модель оценки отказобезопасности системы «экипаж-ВС-среда»**

Введем обозначения:

$Q_{\text{Э}}$  – условная вероятность ошибок экипажа, вызванных совокупностью негативных факторов;

$Q_{\text{С}}$  – условная вероятность негативных воздействий окружающей среды;

$Q_{\text{ВС}}$  – условная вероятность отказов функциональных систем и планера ВС в полете;

$Q_{\text{Д}}$  – условная вероятность совместного воздействия ошибочных действий экипажа, негативного воздействия среды и отказов ФС и планер, т.е. системы «экипаж-ВС-среда».

Условная вероятность возникновения события ошибочных действий экипажа и негативных воздействий среды.

$$Q_{A(\text{Э+ВС})} = Q_{\text{Э}}Q_{\text{С}} - Q_{\text{Э}}Q_{\text{С}}Q_{\text{ВС}} = Q_{\text{Э}}Q_{\text{С}}P_{\text{ВС}}. \quad (4)$$

Условная вероятность совместного события негативного воздействия окружающей среды и отказов ФС и планера.

$$Q_{B(\text{С+ВС})} = Q_{\text{С}}Q_{\text{ВС}}P_{\text{Э}}. \quad (5)$$

Условная вероятность возникновения совместного события ошибочных действий экипажа и отказа ФС и/или планера.

$$Q_{C(\text{Э+ВС})} = Q_{\text{Э}}Q_{\text{ВС}}P_{\text{С}}. \quad (6)$$

Сложная полетная ситуация (СС) при совместных воздействиях в элемен-

тах (Э-ВС-С) и возможно тяжелые авиационные происшествия (аварийные, катастрофы). Условная вероятность возникновения ситуаций: СС, АС или КС при сочетании всех отказов „цепочки” (Э-ВС-С)

$$Q_{\text{Д}} = Q_{\text{Э}}Q_{\text{ВС}}Q_{\text{С}}.$$

Переходя к вероятностям возникновения событий А,В,С,Д, используем выражение  $Q_i = 1 - P_i$ :

$$A \quad 1 - P_A = (1 - P_{\text{Э}})(1 - P_{\text{С}})P_{\text{ВС}};$$

$$1 - P_A = P_{\text{ВС}} - P_{\text{Э}}P_{\text{ВС}} - P_{\text{С}}P_{\text{ВС}} + P_{\text{Э}}P_{\text{С}}P_{\text{ВС}};$$

$$P_A = 1 - P_{\text{ВС}} + P_{\text{Э}}P_{\text{ВС}} + P_{\text{С}}P_{\text{ВС}} - P_{\text{Э}}P_{\text{С}}P_{\text{ВС}}.$$

$$B \quad 1 - P_B = P_{\text{Э}} - P_{\text{ОС}}P_{\text{Э}} - P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}} + P_{\text{С}}P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}};$$

$$P_B = 1 - P_{\text{Э}} + P_{\text{ОС}}P_{\text{Э}} + P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}} - P_{\text{С}}P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}}.$$

$$C \quad 1 - P_C = (1 - P_{\text{Э}})(1 - P_{\text{ВС}})P_{\text{С}}; \quad (7)$$

$$1 - P_C = P_{\text{С}} - P_{\text{Э}}P_{\text{С}} - P_{\text{ВС}}P_{\text{С}} + P_{\text{Э}}P_{\text{ВС}}P_{\text{С}};$$

$$P_C = 1 - P_{\text{С}} + P_{\text{Э}}P_{\text{С}} + P_{\text{ВС}}P_{\text{С}} - P_{\text{Э}}P_{\text{ВС}}P_{\text{С}}.$$

$$D \quad 1 - P_D = (1 - P_{\text{Э}})(1 - P_{\text{ВС}})(1 - P_{\text{С}});$$

$$1 - P_D = (1 - P_{\text{Э}} - P_{\text{ВС}} + P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}})(1 - P_{\text{С}});$$

$$P_D = P_{\text{Э}} + P_{\text{ВС}} - P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}} + P_{\text{С}} - P_{\text{Э}}P_{\text{С}} - P_{\text{ВС}}P_{\text{С}} + P_{\text{С}}P_{\text{ВС}}P_{\text{Э}}.$$

Условная вероятность суммарного эффекта  $Q_A, Q_B, Q_C, Q_D$ :

$$Q_{\Sigma} = Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = 4 - P_A - P_B - P_C - P_D.$$

Вероятность благополучного исхода полета при выполнении задания:

$$P_{\text{вып}} = 1 - P_{\text{Э}} - P_{\text{ВС}} - P_{\text{С}} + P_A + P_B + P_C + 3P_D, \quad (8)$$

где  $P_A$  – вероятность того, что событие А {ошибочных действий экипажа и негативного воздействия среды при выполнении полетного задания не произойдет};

$P_B$  – вероятность того, что событие В {совместного события негативного воздействия окружающей среды и отказов ФС и/или планера} при выполнении полетного задания не произойдет;

$P_C$  – вероятность того, что событие С {совместного события ошибок экипажа и отказов ФС и/или планера} при выполнении полетного задания не произойдет.

Переходя в выражении (8) к вероятностной форме функции времени для участков  $\Delta t_i$ , можно получить аналитическое выражение вероятности благополучного исхода полета в форме времени эксплуатации. Это позволяет при известной статистической оценке событий А, В, С и Д осуществлять статистическое моделирование комплексного показателя отказобезопасности ВС:

$$P_{\text{бип}}(\Delta t_n) = 1 - P_A(\Delta t_n) - P_{BC}(\Delta t_n) - P_C(\Delta t_n) + P_A(\Delta t_n) + P_B(\Delta t_n) + P_{CD}(\Delta t_n) + 3P_D(\Delta t_n), \quad (9)$$

$$\text{где } t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i.$$

### Выводы

1. Анализ причин возникновения АП показал, что большинство АП обусловлено сочетанием нескольких причинных факторов, где каждый фактор находился в пределах границы ожидаемых условий эксплуатации, а вместе создали неблагоприятный суммарный эффект (область Д).

2. Вероятностная модель (9) является универсальной для оценки отказобезопасности ВС и может быть приведена к известной форме для комплексного показателя отказобезопасности (1) при независимых событиях системы «экипаж – ВС – среда», когда области А, В, С и Д вырождаются в пустые множества.

3. Анализ статистической информации по этапам полета  $(\Delta t_i) t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$  позволяет сделать конструктивный вывод о повышении отказобезопасности системы «экипаж – ВС – среда» и выявить напряженные динамические участки этапов полета ВС, численным показателем этих режимов и работоспособности ВС может служить коэффициент риска деятельности экипажа.

4. Автоматизация и взаимодействие элементов системы «экипаж – воздушное

судно – среда» кабинного интерфейса ВС являются теми ключевыми основами повышения уровня безопасности полетов и эффективности авиатранспортной системы, когда многообразие процессов может быть обусловлено рассматриваемой вероятностной динамической моделью отказобезопасности и количественными результатами исследований.

### Список литературы

1. Теймуразов Р.А., Полтавец В.А. Анализ безопасности полетов самолетов с газотурбинными двигателями за 50 - летний период (1957...2006 г.г.) эксплуатации в гражданской авиации СССР и государствах -участниках соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства (пассажирские перевозки)/Воздушный транспорт. – М.: Воздушный транспорт, 2007. – №48-51.
2. Шишкин В.Г. Безопасность полетов и бортовые информационные системы. Иваново: МИК, 2005. – 240 с.
3. Руководство по предотвращению авиационных происшествий. М.: ИКАО, 1984. – 18 с.
4. ДСТУ 3589-97. Системи та комплекси авіаційного обладнання. Надійність та експлуатація. Терміни та визначення. К.: Держстандарт України, 2000. – 18 с.
5. Воробьев В.М., Киселев А.Д., Захарченко В.А., Вашку О.Ж., Воробьев А.В. Системная эффективность функционирования авионики/Кибернетика и вычислительная техника. 2000. – Вып.126, – С. 48 – 76.
6. Воробьев В.М., Киселев А.Д., Захарченко В.А., Семида В.С., Енчев С.В. Современные проблемы и тенденции автоматизации и взаимодействия кабинного интерфейса комплекса «экипаж – воздушное судно – среда» / Кибернетика и вычислительная техника. – 2008. – 26 с.