УДК 656.7.086.1(045)

В. М. Воробьёв, д-р техн. наук, проф.,
М. Ф. Давиденко, канд. техн. наук,
В. А. Захарченко, канд. техн. наук,
С. В. Енчев, канд. техн. наук,
С. С. Ильенко,
В. В. Козуб

МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ ЭРГАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ЭКИПАЖ–ВОЗДУШНОЕ СУДНО–СРЕДА», ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СТАТИСТИКА И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР

Аэрокосмический институт НАУ, e-mail: esw@ukr.net

На основании статистического материала за длительный срок применения авиации обоснованно оценена эффективность авиационной транспортной системы и выявлены наиболее уязвимые места ее звеньев и всей архитектуры, включая человеческий фактор, для совершенствования структуры на базе новых отраслевых технологий.

Ключевые слова: эргатический комплекс, эксплуатация, человеческий фактор, безопасность полетов.

Постановка проблемы, анализ последних исследований и публикаций. В работах [1; 2] показано, что к концу 60-х годов наблюдался стремительный рост потребностей в авиационных перевозках в СССР и за рубежом, а темпы роста были примерно одинаковыми. Была создана единая авиационная транспортная система (АТС), все элементы которой работали в тесной взаимосвязи.

Количество перевезенных пассажиров с 16 млн в 1966 г. выросло до 137 млн в 1990 г. (с вводом Ту-154, Ил-86); объем работ достиг 235,2 млрд пассажиро-км. В 1992 г. количество пассажиров составляло 84,6 млн и к 1998 г. уменьшилось до 28,2 млн пассажиров. Некоторый подъём наблюдался в 2006 г. – 49,6 млн пассажиров и перевозки составляли 110 млрд пассажиро-км (по СНГ).

В работе [1] выполнен тщательный анализ эффективности АТС за 50 лет полётов воздушных судов (ВС) с газотурбинными двигателями (ГТД), а также выявлены причины аварийности в гражданской авиации после распада СССР (рис. 1 – 3).

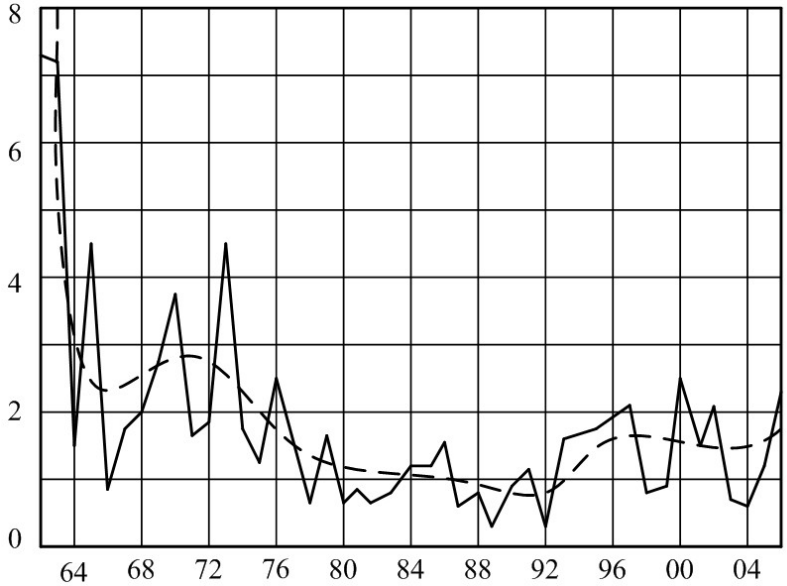


Рис. 1. Количество катастроф на самолетах с ГТД на 1 млн ч налета: ——— – параметр; — — — – аппроксимация

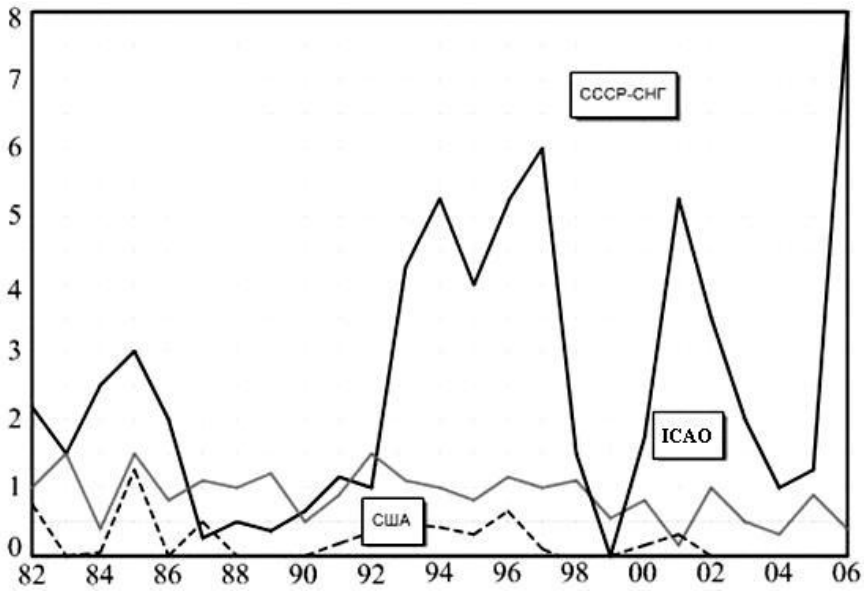


Рис. 2. Количество катастроф на 1 млн. часов налета самолётов при пассажирских перевозках в СССР–СНГ, США и ICAO (без СССР–СНГ, США) по годам: ── – СССР–СНГ; ---- – США; ····· – ICAO

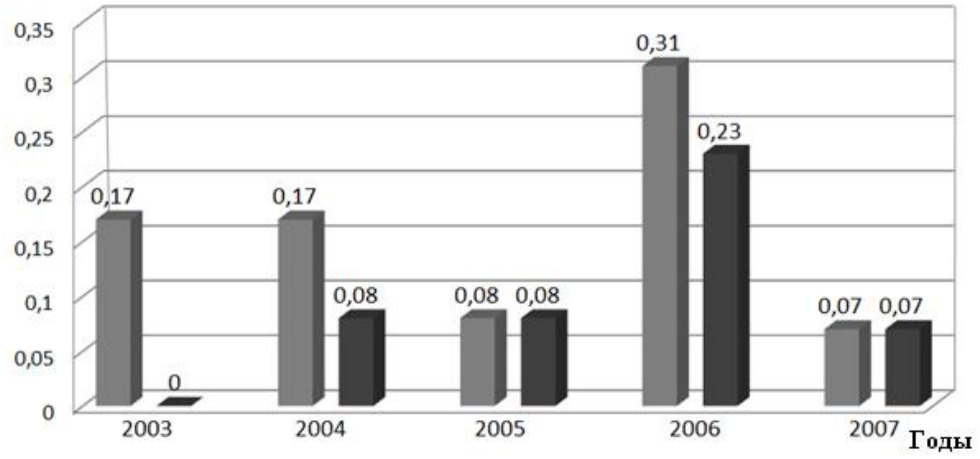


Рис. 3. Количество авиационных происшествий и катастроф на 100 тыс. ч налёта на самолётах 1–3 классов при регулярных пассажирских перевозках в гражданской авиации государств-участников соглашения: ▒ – авиационные происшествия; ▉ – катастрофы

Длительные исследования ICAO привели к выводу, что от 80 % и более возникающих авиационных происшествий (АП) ВС совершаются по вине человеческого фактора. Эргатические сложные системы доминируют в общей технической среде благодаря широким возможностям, самоорганизации, расширившимся степеням свободы действий, автоматической переработке массивов информации на длительном жизненном цикле (ЖЦ) наукоёмких изделий. Важнейшей задачей АТС являлось определение главных причин АП и совершенствование её структуры для локализации АП.

Автоматизированный интегрированный эргатический комплекс «экипаж–ВС–среда» – конечное звено в безопасности полетов, поэтому повышение его эффективности функционирования – суть снижения рисков, и ICAO призвала сообщество к поиску новых методологий и подходов. Современные проблемы и тенденции взаимодействия компонентов комплекса и автоматизация процессов решений задачи одновременно порождают новые неопределённости и ошибки в управлении ситуациями при отказах авиатехники, действиях среды и взаимодействии с техникой и персоналом.

Причинные факторы АП. *Темпы развития* наукоёмких технологий (информационных, машиностроительных, сертификационных испытаний, технологических), особенно в авиакосмической отрасли, существенно опережают *темпы развития качеств человека*, взаимодействующего с функциональными системами (ФС) авионики нового поколения и ВС в целом (планером, силовой установкой). Вследствие этого возникают конфликтные ситуации в эргатических системах. В работе [3] под *конфликтом* понимается способ взаимодействия сторон (компонент), в результате которого стороны разъединяются и противостоят, но в отдельных случаях объединяются, совместно функционируют и образуют новую сверхсистему с самостоятельными качествами, не присущими ни одной из компонент, но со значительным влиянием на объекты (ФС авионики, ВС).

При этом информационная неопределенность (энтропия) возрастает и субъективные представления (когнитивный диссонанс) могут превалировать в суждениях, образах и реализациях. Общность эргатических конфликтов характерна для особых ситуации полета (ОСП), т. е. эксплуатации ВС в экстремальных условиях применения (воздействия среды, дефицит времени, запредельные условия функционирования лица принимающего решения (ЛПР)). Процесс принятия решения распределен во времени и пространстве и носит интерактивный характер, непосредственно характеризующий психофизиологические возможности.

На современном этапе существования АТС в условиях *медленного ввода новой авиационной техники* (Ан-140, Ан-148, Ан-158) и одновременной эксплуатации значительного парка ВС прошлых поколений (Ан-24, Ан-124, Ан-12, ТУ-154, Як-42, Ил-76 и др.) безопасность полета приобретает новые значения как один из главных критериев качества функционирования АТС.

Создать абсолютно отказоустойчивые ФС авионики нового поколения теоретически едва ли возможно, как и бессмысленно по экономическим соображениям. Основной элемент обеспечения функции – эргатический комплекс, в котором человеческий потенциал (и/или уровень автоматизации «экипаж–ВС–среда» процесса авиационной деятельности) будет определять уровень отказобезопасности в условиях различных отказов техники ФС, неблагоприятных воздействий среды и парирования ОСП экипажем на различном уровне качества, т. е. неоптимальным способом. Наземный и лётный экипажи имеют право на ошибку, но не грубую, с возможностью её исправления за определённое время. Конструкторы должны, с одной стороны, создавать эргономически комфортное оборудование, а с другой – предусмотреть условия, предотвращающие нестандартные действия ЛПР (ограничение, предотвращение ОСП) и влияние на уровень безопасности полётов. То есть применяются отказоустойчивые компоненты авионики, современные методики профессиональной подготовки экипажей и локализации ОСП экономически выгодными и эффективными способами [4; 5; 10].

Авионика третьего поколения – это автоматизированное интегрированное, опосредствованное пространство автоматизации, ориентированной на человека и взаимодействия эргатического комплекса «экипаж–ВС–среда» с многофункциональными отказоустойчивыми комплексами: цифровой бортовой вычислительной системой с распределёнными ресурсами; функциональными системами стандартного и общесамолётного оборудования; кабинным интерфейсом и комплексом электронной индикации и сигнализации; бортовой системой технического обслуживания для решения задач самолётовождения/пилотирования, навигации, связи и контролирования вне и внутрикабинной обстановки; технического состояния планера, силовой установки, систем; психофизиологической напряжённости экипажа с целью минимизации рисков авиационной деятельности и обеспечения требований ICAO по уровню безопасности полётов с максимальной эффективностью.

При проектировании ВС предусматривается возможность безопасного завершения полёта при отказах ФС за счёт структурного, функционального и других видов резервирования, оцениваемых отказоустойчивостью и отказобезопасностью. Анализ причин

АП за длительный период эксплуатации показал, что большинство их обусловлены сочетанием нескольких причинных факторов, где каждый создает необходимые условия неблагоприятного исхода полёта. Исторически в СССР (СНГ) во время освоения тяжёлых ВС с ГТД распределение АП по факторам отказов ФС и ошибок экипажей распределялось следующим образом (рис. 4):

За период 1957–1970 гг:

– из-за недостатков ФС (технический фактор) – 53 %;

– из-за ошибок экипажа (человеческий фактор) – 47 %.

За период 1982–2007 гг:

– из-за недостатков ФС – 23 %;

– из-за человеческого фактора – 77 %.

Взаимодействие эргатических компонент «экипаж–ВС–среда» между собой (подобласти *A*, *B*, *C*) и взаимного влияния (подобласть *D*) и перераспределения видов отказов для ожидаемых и экстремальных условий эксплуатации изображены на рис. 5.

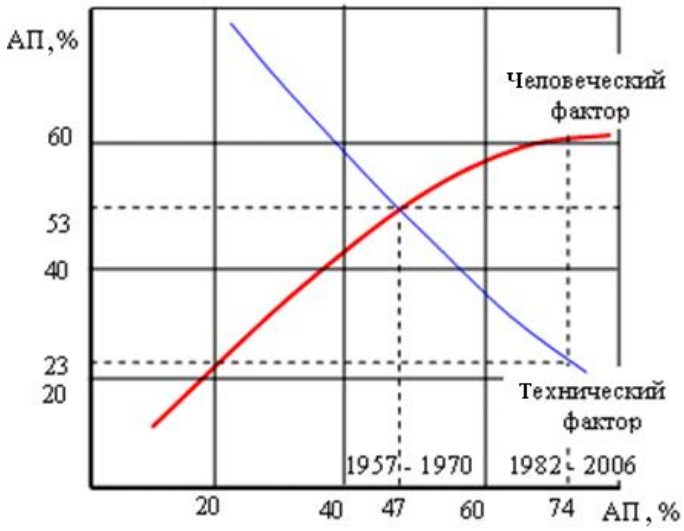


Рис. 4. Распределение факторов причин АП % во времени (технический и человеческий факторы)

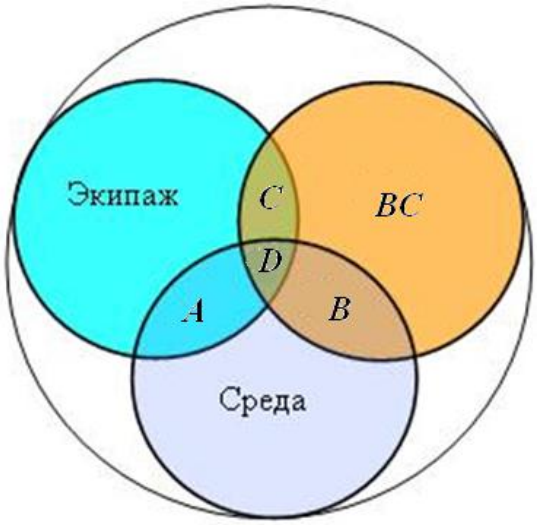


Рис. 5. Взаимодействие компонент комплекса «экипаж– ВС– среда»

В работе [2] предложена «веерная» модель анализа причин ошибок летного и наземного экипажей, где основное внимание уделено установлению *главной (системной) причины* ошибки (через непосредственные и промежуточные), которую порождают компоненты авиационной транспортной системы. Устранение изъянов в ее структуре и предотвращений повторений ошибок в будущем, т. е. в результате совершенствования компонентов АТС, осуществляется *профилактической* работой. Такой подход перспективен хотя бы потому, что устраняются недостатки «в большом» – путем совершенствования структуры АТС, и поэтому поиск и установление причин носит *обобщенный системный характер*, а не установление частного виновника события. Хотя этот результат – также немаловажен в конкретной ситуации, но главное – установить недостатки в структуре АТС, чтобы исключить их новое повторение.

Такой подход при анализе причин ошибок экипажей (при функционировании ВС и подготовке к полету) позволяет приближаться к установлению потенциальных угроз, которые невидимы и ничем себя не проявляют в конкретной ситуации полета. Потенциальные компоненты «возможных» человеческих ошибок представляют как бы «подводную» часть айсберга [2] в следующей последовательности системы «управление безопасностью полетов (УБП)»: <опасный фактор>→<опасность>→<риск>→<угроза>. Линия «водораздела» и «верхняя» конструкция «айсберга» представляет последовательность

событий динамического характера по обеспечению безопасности полетов (ОБП): <реализацию риска при различных возмущениях>→<предвестника события>→<авиационное происшествие> (для благоприятных и неблагоприятных действий экипажа и компонент организации воздушного движения) (рис. 6).



Рис. 6. «Айсберг» небезопасности: ОФ – опасный фактор; ОД – ошибочные действия

Постановка задачи исследований. Системный подход при исследовании автоматизированного интегрированного комплекса «экипаж – ВС – среда» имеет целью выработать обоснование направления методологии научного познания целостного рассмотрения взаимодействия компонент во всём многообразии связей для ожидаемых и экстремальных условий эксплуатации.

Системный анализ, понимаемый как совокупность методологических средств исследования сложных задач, предполагает построение *обобщённой модели*, отображающей взаимосвязи реальной ситуации на основе *обеспечения*: лингвистического, математического, программного, информационного (в том числе статистической информации), функционального, методологического, технического (ЭВМ, комплексы имитационного моделирования).

Поскольку количество полномасштабных натурных испытаний ВС в настоящее время жестко ограничено, то 90 % всего объема испытаний современных ВС (1350–1550 полётов) производятся «на земле» до первого испытательного полёта, что составляет 80–90 % всех затрат на разработку наукоёмкого изделия с применением имитационных комплексов моделирующих стендов (КСМ), натурного моделирования и т. д. Эти опережающие эксплуатационные стенды основываются на математических, полунатурных и физических моделях с инструментальными оценками и экспертных системах, т. е. на использовании «жёстких» и «мягких» оценок.

Общий подход в проблеме формирования облика ВС и авионики (подэтап «замысла» и маркетинга), комплексирования авионики, сертификации современного ВС заключается в *формировании вектора качества* в рамках гибких автоматизированных интеллектуальных технологий для минимизации рисков авиационной деятельности; учёте человеческого фактора и автоматизации процессов; разработке мероприятий профилактического плана с определением главной и непосредственных причин АП, а также использования статистической информации по результатам длительной эксплуатации ВС или его прототипов.

В качестве нового методологического подхода о влиянии человеческого фактора *безопасность полётов ВС* нужно рассматривать как *«состояние системы* (АТС), при котором риск причинения вреда лицам или нанесения ущерба имуществу снижен до приемлемого уровня и поддерживается на этом либо более низком уровне посредством непрерывного процесса *выявления источников опасности и контроля факторов риска»* [2]. Предупреждение АП и устранение опасных факторов в АТС, оцениваемых величиной риска, – основная составляющая процесса управления безопасностью полётов, а методика управления факторами риска включает такие этапы:

– поиск, выявление и учёт опасных факторов в компонентах АТС;

– экспертную оценку «весомости» опасных факторов на функционирование АТС;

– разработку мероприятий по профилактике ОСП.

В работе [2] В. В. Козлов убедительно обосновывает модель развития негативного события ОСП в компонентах АТС, содержащих факторы риска как предпосылки опасности в потенциальном состоянии. Кинетика фактора «оживает», будучи вовлечённой в производственный процесс. Возникновение ОСП определяется риском, когда профилактика недейственна. В процессе деятельности «риск» переходит в «угрозу» путём выполнения нестандартного действия, отказа авиатехники или опасным воздействием среды. С совпадением обстоятельств (благоприятное, неблагоприятное) прекращается развитие опасности или развитие осуществляется по логической цепочке: <инцидент> → <серьёзный инцидент> → <аварийная ситуация (АС)> → <катастрофическая ситуация (КС)>. Угроза выступает «водоразделом», когда необходимо действовать «правильно», а не с дефектами АТС. Алгоритм развития ОСП в работе [2] назван «айсбергом небезопасности» (рис. 6). «Веерная модель» определения причин ошибки показана на рис. 7.

С введением имитационного моделирования сложных систем и процессов при создании ВС с авионикой нового поколения появилась реально-достижимая возможность управлять вектором качества создаваемой наукоёмкой продукции на этапе проектирования; образовывать доказательную базу сертификации; обосновывать структуры функциональных систем; повышать достоверность результатов широким привлечением к экспериментам лётчиков-испытателей (фирмы и авиационного регистра) и разработчиков авионики. Конвертация исследовательского пилотажного стенда в тренажер расширяет существенную область ускоренной подготовки летного и наземного экипажей, позволяет оценить отказобезопасность и уровень риска.

Внедрение принципа «предусматривать и предотвращать», вместо «обнаруживать и исправлять» определяет особенности функционирования эргатической системы, а именно риск в принятии решения в виде средних потерь из-за некорректного решения функции

$$p(P,d)=\int_{\Omega} L(\omega,d)dP(\omega),$$

где $L(\omega,d)$ – известная функция потерь двух аргументов; ω – результат принятого решения; d – принятое решение $(d\in D)$; D – пространство возможных реализаций; Ω – пространство возможных реализаций решения $\omega\,(\omega\in\Omega)$; $P(\omega)$ – функция распределения вероятности случайного события.



Рис. 7. «Веерная» модель: алгоритм определения причин ошибки

Терминологические уточнения.

1. *Алгоритм развития ОСП*, т. е. «айсберг небезопасности»: < опасный фактор > → <опасность> → <риск> → <угроза> – потенциальный фактор риска. <Предвестник: ошибочные действия > → <предвестник> → <АП: инцидент, серьёзный инцидент, аварийная ситуация (АС), катастрофическая ситуация (КС)>.

2. *Человеческий фактор*

2.1. По определению ICAO: человеческий фактор – это наука о людях в той обстановке, в которой они живут и трудятся, о их взаимодействии с машинами, процедурами и окружающей обстановкой, а также о взаимодействии между собой».

2.2. По В. В. Козлову [2]: человеческий фактор как учение о безопасности и эффективности функционировании авиационной системы, обеспечивающее гармонизацию взаимодействия разноприродных её компонентов («экипажа», «ВС» и «среды») на основе учёта при создании каждого из них психофизиологических возможностей и ограничений, присущих специалистам».

2.3. По мнению авторов для ВС с авионикой нового поколения: человеческий фактор – это наиболее существенный и значимый фактор науки и практики безопасности полётов ВС, характеризующий эффективность функционирования эргатического комплекса «экипаж–ВС–среда», оцениваемый *отказобезопасностью*, т. е. уровнем (степенью) пространственно-временного взаимодействия потенциала экипажа (его возможностей и ограничений) с бортовыми многофункциональными отказоустойчивыми системами авионики; электронной индикацией и сигнализацией в условиях кабинного интерфейса; автоматики, «ориентированной» на человека, и средой при выполнении задач с минимизацией рисков и максимальной эффективностью.

3. *Риск* – это возможность реализации системой своих фактических располагаемых свойств, при конкретных условиях и в конкретный момент времени или в течение срока эксплуатации.

4. *Оценка приемлемости риска* [3] – количественная мера показателя (уровня), выше значения которого риск не может быть оправдан за исключением экстраординарных обстоятельств. Деятельность экипажа обеспечивается здравым смыслом (ALARP):

– ниже предела приемлемости риск допускается только при значительных преимуществах деятельности, но при выполнении требований ALARP (As Low As Responsible Practicaly – до такой степени насколько это практически разумно);

– в процессе эксплуатации возможен момент, когда эксплуатационные затраты настолько высоки, что даже снижение риска сводят усилия считать их нецелесообразными.

5. *Опасность* – это такое расположение объектов и сочетание условий (ситуаций), которые могут нанести ущерб здоровью, среде обитания или ВС [3].

6. *Системная безопасность эргатического комплекса «экипаж – ВС – среда»* [3] и её обеспечение представляют задачу принятия многошагового пространственно-временного решения.

7. *Принятие решения* – нахождение такой совокупности комбинаций/входных параметров (оценка свойств, возможностей и ограничений эргатического комплекса «экипаж – ВС – среда», для которой риск будет минимальным, а задачей *системного подхода* эргатической системы является формирование множества характеристик, свойств и признаков процессов взаимодействия для управления вектором качества по снижению риска эксплуатации.

8. *«Безопасность полётов* рассматривается как состояние АТС, при котором риск причинения вреда лицам или ущерба имуществу снижен до приемлемого уровня и поддерживается на этом либо более низком уровне посредством непрерывного процесса выявления источников опасности и контроля факторов риска».

Современная философия эксплуатации ВС с авионикой нового поколения, т. е. высокоавтоматизированных ВС предопределила жизненность сокращения экипажа до двух пилотов.

Новая философия эксплуатации ВС базируется на реализации следующих принципов деятельности:

– распределении обязанностей по принципу «пилотирующий – не пилотирующий»;

– организации взаимодействия между пилотами;

– организации контроля в экипаже (табл. 1).

Появление и расширение функций высокоавтоматизированных интеллектуальных систем авионики и внедрение автоматики, «ориентированной на человека», существенно снизило уровень психофизиологической напряженности экипажа, в том числе при парировании ОСП. Однако это и явилось причиной появления новых ошибок, обусловленных неоднозначностью отношения к новшествам человеческого фактора. К ним можно отнести следующие:

1. Каждый пилот должен не только выполнять свои функции, но и контролировать действия другого («перекрестный контроль»).

2. Принцип «Командир всегда прав» должен быть перестроен и решение принимается обоюдно, т.е. более взвешенно.

3. Изменения в деятельности пилотов привело к дифференциации их в историческом аспекте, т. е. на тех, кто правильно понимает особенности функционирования экипажа из двух пилотов и тех, кто не понимает изменений. Первая группа – это пилоты-интеллектуалы с постоянной заботой о контроле за режимами и этапами полета, техническим состоянием автоматики; оптимизацией взаимодействия (взаимоконтроль, взаимопомощь, отношения партнеров) и т. д. Другая группа – упрощённо понимает роль автоматики и подчинения ей, лишь периодически контролируя техническое состояние. Понятие «взаимопомощь», «взаимоконтроль», «партнерские отношения» им чужды не уровне абстракции, т. е. чужды уму и сердцу. Отсюда невысокая надежность этой группы пилотов.

Изменения психофизиологических особенностей при высокой автоматизации авиации и деятельности пилотов произошло не только во внешних формах (моторная деятельность), но и в психических и физиологических системах пилотов:

– изменение содержания образа полета (автоматизация управления ВС, навигации, развитие осмотрительности в деятельности инструментальными методами TCAS, СРППЗ и др.);

– постоянной готовности пилота к переходу от автоматики к пилотированию по приборам (директорное управление);

– обеспечение высокого уровня бдительности;

– сохранение преобразования информации с дисплеев в более конструктивный образ полета и достойное отношения к связи.

Таблица 1

Реализация философии ВС с авионикой нового поколения в формировании экипажа

№ п/п	Характеристики деятельности пилотов	ВС старого поколения	ВС с авионикой нового поколения
1	Роль командира ВС (КВС)	Командир ВС	Руководитель
2	Структура взаимодействия экипажа	Иерархическая	Партнерская
3	Стиль взаимоотношения и общения в экипаже	Директивный	Уведомительный
4	Роль второго пилота	Пассивная («дело правого – не мешать левому»)	Активный участник полёта
5	Взаимоконтроль	Допускается	Перекрестный
6	Принятие решения	Индивидуальное («командир всегда прав»)	Совместное (обоюдное)
7	Разделение функций при управлении	«Не пилотирующий – пилотирующий»	«Пилотирующий – не пилотирующий»
8	Критика в адрес КВС	Исключается	Приветствуется
9	Характер труда в экипаже	Индивидуальный	Совместный
10	Выполнение операций при отказах авионики, действиях среды и т.д.	Используется книга РЛЭ самолёта: при достаточном времени для парирования ситуации	Парирование отказов производится по «электронному» РЛЭ в случае наличия времени
		При дефиците времени парирование отказа осуществляется «по памяти»	При дефиците времени парирование отказа осуществляется «по памяти» с последующим уточнением правильности по РЛЭ
11	Психофизиологические противоречия при пилотировании ВС старого и нового поколения	1. Высокий уровень рутинных умственных и моторных функций	1.Базовое противоречие заключается в сохранении и поддержании психической активности при одновременном снижении рутинных умственных и материальных функций
		2.Сохранение интеллектуальной составляющей во всем полёте	2.Поддержание высокой интеллектуальной составляющей
		3.Высокий уровень моторных функций	3.Оптимизация взаимодействия при вводе информации и высокая целостность
		4.Постоянный контроль из-за недостаточной надёжности ФС	4.Высокий уровень контроля при интеллектуальных отказоустойчивых системах (притупление бдительности)
		5.Активаная деятельность в штатных ситуациях и при ОСП	5.Снижение активности в штатных ситуациях и скачкообразная активность при ОСП
		6. Активная деятельность во всех случаях полёта	6. Высокий уровень автоматизации и действия «по памяти» при ОСП (ручное управление)
		7.Однозначность информации и образа полёта. Ограничение возможностей связи	7.Преобразование информации с дисплеев в образ полёта и уважительное отношение к связи

Произошло смещение акцента с моторной активной деятельности на интеллектуальный с возросшей ответственностью за точность восприятия информации, её переработку и принятие решений. Это требует высокой активности ума. Изменения двигательных реакций привело к смещению психического состояния в сторону пассивных состояний, т. е. усилению тормозных процессов, что требует специальной подготовки. Существенно возросла цена ошибки, поэтому необходимо осознавать и контролировать надписи постоянно, не отвлекаясь на другие мысли. Жёсткая стандартизация процедур требует высокой психологической дисциплины, самоконтроля, взаимодействия в экипаже как стимуляторов профилактики.

На роль второго пилота ВС с авионикой нового поколения могут «претендовать» КВС эксплуатируемых ВС, когда их прежние заслуги не учитываются в процессе переучивания и возникают существенные психические противоречия.

Основные психологические противоречия в пилотировании высокоавтоматизированных ВС сводятся к следующим:

1. Базовые противоречия заключаются в том, что при эксплуатации высокоавтоматизированных ВС пилоты должны сохранять и поддерживать психическую активность при снижении рутинных умственных и моторных управляющих движений.
2. Следствием первого противоречия является необходимость поддержания высокой интеллектуальной работоспособности (зачастую невостребованной).
3. Упрощение моторных операций при вводе информации и высокой цене отсроченной ошибки. Отсюда – осознание каждого действия пилота и контроля другим, т. е. оптимальное взаимодействие.
4. Отказоустойчивая автоматика притупляет бдительность пилотов, что требует выработки установки пилотов на постоянный контроль.
5. Снижение активности в штатной ситуации с резким повышением её в ОСП.
6. Высокая надежность автоматики и потребность держать в памяти пилотов действия при отказах (ручное управление; дефицит времени требуют управления «по памяти»).

Системный анализ причин ошибок экипажа. В процессе функционирования эргатического комплекса «экипаж–ВС–среда» экипаж может совершать нестандартные действия, которые разделятся на ошибочные действия и нарушения.

Причины возникновения ошибочных действий сгруппированы в следующие шесть основных характеристик: ПМС, ПР, ПГ, ПВК, ЭХВС и ЭХС.

1. *Потребностно-(профессионально) мотивационная сфера (ПМС).* Причины ПМС обусловлены следующими факторами: искажением картины потребности, снижением мотивации на лётную профессию, искажением мотивации текущей деятельности и целевой функции. В свою очередь ПМС подразделяются на внутренние и внешние причины.

1.1. Внутренние причины ПМС включают следующие составляющие: негативные социально-психологические профессионально важные качества (ПВК) из-за несовершенства АТС (система профотбора и медицинского обеспечения); заболевание; утомление; стресс; потеря пространственного ориентирования (система профотбора, система обучения и подготовки).

1.2. Внешние причины ПМС включают составляющие употребление лекарств и алкоголя; длительное пребывание в командировках; наступление особой даты; социальные проблемы; проблемы отбытия из аэропорта; наличие на борту несанкционированных грузов и пассажиров; профессиональные факторы.

2. *Профессиональная работоспособность (ПР).* Проявлением ПР могут быть снижение работоспособности и потеря её. Промежуточные причины ошибок от ПР могут быть и внутренними и внешними.

2.1. Внутренние причины ПР: возникновение в полёте обострения здоровья; нарастающий процесс утомления и стресса; потеря пространственного ориентирования; проявления десинхроза; нарушение суточных ритмов; употребление лекарств.

2.2. Внешние причины ПР: воздействие факторов полёта (болтанка, перегрузки, гипоксия); неоптимальные условия обитаемости на рабочем месте; нерациональная профессиональная нагрузка; нерациональный режим труда, отдыха и питания.

3. *Профессиональная готовность (ПГ)*. Недостаточная ПГ экипажа объясняется причинами: слабые теоретические знания, в том числе в ОСП; несформированность комплекса профессионального умения и навыков (особенно при ОСП); несоответствие уровня подготовки ранга сложности задач.

Значимыми признаками недостаточно высокого уровня ПГ являются: неправильная оценка полётной ситуации; принятие неправильного решения (особенно при ОСП); отсутствие адекватного поведения экипажа; проявление ОД экипажа в ранее выполненных полётах; моделирование ОСП на ИПС, тренажерах выявило неэффективные действия пилотов; существенные замечания экспертов о ПГ экипажа.

4. *Профессионально-важные качества (ПВК)*. Оценка ПВК весьма сложна по следующим причинам: недостаточность развития методологии ПВК и ПГ; большая совокупность характеристик ПВК.

В работе [2] выделены наиболее уязвимые у экипажа ПВК:

– сенсомоторная координация (особенно у курсантов);

– эмоциональная устойчивость;

– характеристики внимания (объём, переключение);

– характеристики памяти (запоминание, хранение, воспроизведение);

– развитие мышления;

– устойчивость к факторам полёта;

– тренинг глазомера;

– совершенство физических качеств;

– способность к пространственной тренировке.

Достаточность ПВК чаще проявляется при ОСП, вследствие чего тестовая их проверка может характеризоваться следующими проявлениями:

– характерность (выраженность) психогенного воздействия ОСП на человека;

– скачкообразное изменение реакции поведения при ОСП, обоснованное проявлением эффекта динамического стереотипа;

– динамика семантики и физиолого-акустических характеристик речи на этапах полёта, при ОСП по сравнению со штатными ситуациями;

– изменение характера управляющих движений в штатных ситуациях и при ОСП (амплитуда, частота, температура);

– увеличение времени реакции на значительные сигналы в штатных режимах и ОСП или воздействии факторов;

– особенности функционирования глазомера при оценке пространственных соотношений (H посадки, L до ведущего);

– особенности поведения пилота при ОСП и моделировании полёта;

– мнение членов экипажа;

– послеполётные психологические обследования (по возможности);

– изменение ранее проведённых обследований здоровья.

Социально-психологические ПВК характеризуют недоработки АТС при отборе, особых личностных чертах человека. Сюда относятся такие особенности пилота: низкая мотивация на лётную профессию; недисциплинированность и неуважение к нормативно-технической документации; чрезмерная самоуверенность и беспечность; неуверенность в себе, нерешительность, повышенная тревожность; склонность к браваде и риску; агрессивность; конфликтность; неуживчивость; несдержанность; неспособность к толерантности и прогнозу событий; недостаточность самоконтроля, планирования действий, рассеянность.

5. *Оценка эргономических характеристик ВС.* Несовершенство этих характеристик может стать непосредственной причиной ошибочных действий экипажа.

Эргономичность ВС оценивается следующими характеристиками:

– эргономичностью рабочего места, исключающей случайные воздействия;

– эргономичностью системы отображения информации, отсутствием «ложных» срабатываний сигнализаторов;

– эргономичностью органов управления;

– эргономичностью образа пространства;

– обоснованным распределением обязанностей автоматизации и экипажа;

– эргономичностью информационной и физической моделей с учётом «недогруза» и «перегруза»;

– недостаточностью учёта эргономических требований при проектировании, что может привести к ОД.

6. *Оценка эргономических характеристик среды.* Несовершенство этих характеристик проявляется в следующем:

– недостаточной освещенности аэродрома;

– неудовлетворительной подготовке ВПП;

– неэффективном функционировании радиотехнических средств;

– нарушении мер безопасности при использовании технических средств;

– неудовлетворительной орнитологической обстановке.

Динамическая вероятностная модель эргатического комплекса «экипаж–ВС–среда» в особых случаях полёта. 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 вероятностная (статистическая) характеристика надежности системы «экипаж–ВС–среда» как конечного звена в безопасности полетов определяется коньюнкцией (логическим произведением): отказоустойчивости ФС; живучести ФС и ВС; надежности действий экипажа в полетных ситуациях; безотказности контакта с внекабинной обстановкой, диспетчером, руководителем полетов и ВПП [9; 6; 8]:

$$P_{\text{б. и. п}}(t) = \sum_{a=1}^{b} P_{\text{ФС}}(t) \sum_{m=1}^{n} P_{\text{о. в. в}}(t) \sum_{l=1}^{k} P_{\text{э. ф}}(t) \sum_{q=1}^{c} P_{\text{с. о. б}}(t), \quad (1)$$

где $P_{\text{б. и. п}}(t)$ – глобальный вероятностный критерий благополучного исхода полета; $P_{\text{ФС}}(t)$ – отказоустойчивость функциональных систем и планера; *a, b* – виды и сочетания отказов ФС; $P_{\text{о. в. в}}(t)$ – живучесть ФС и ВС, учитывающая вероятность непопадания в условия опасных внешних воздействий; *m*, *n* – виды и типы экстремальных условий эксплуатации («сдвиг» ветра, выкатывание ВС с ВПП, интенсивная грозовая деятельность, «пыльные» бури и др.); $P_{\text{э. ф}}(t)$ – 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; $P_{\text{с. о. б}}(t)$ – безотказность службы обеспечения безопасности полетов; *q*, *c* – виды и типы отказов диспетчера, состояние 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, полёта по маршруту и посадки:

$$P_{\text{б. и. п}}(t) = P_{\text{б. и. п}}(t_{\text{взл}}, t_{\text{пол}}, t_{\text{пос}});$$

$$P_{\text{б. и. п}}(t) = P_{\text{б. и. п}}(K_{p_{\text{взл}}} t_{\text{взл}}, K_{p_{\text{пол}}} t_{\text{пол}}, K_{p_{\text{пос}}} t_{\text{пос}}),$$

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 посадки.

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 [6; 7], определяемого как отношение количества (n_i) АП ко времени данного этапа (t_i) в процентном выражении (табл. 2). При этом изменяется вероятность образования грубых ошибок экипажа.

Коэффициент риска деятельности экипажа изменяет значения по этапам полета в широких пределах – от 0,3 до 28,05. Параметры среды оказывают существенное влияние 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.

Таблица 2

Распределение АП и $K_{\text{р. д. э}}$ по этапам полёта

Этапы полета	Продолжительность этапа полёта		Распределение АП		Коэффициент риска деятельности экипажа
	Обозначение t_i	мин	Количество $n_{\text{АП}}$	АП, %	$K_{\text{р. д. э}}$
Взлет	Δt_1	1	5	12,5	4,55
Начальный набор высоты	Δt_2	1	4	7,5	4,1
Набор высоты	Δt_3	12	2	6,3	0,17
Полет по маршруту	Δt_4	51	15	9,9	0,3
Снижение	Δt_5	10	4	6,0	0,36
Начальный этап захода	Δt_6	11	4	6,8	0,35
Конечный этап захода	Δt_7	3	8	18,2	2,49
Посадка	Δt_8	1	28	32,8	28,05

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 (рис. 8).

Область А (см. рис. 5) рассматривается как вероятностное пространство воздействия среды только на пилота (ограниченная полетная видимость, неадекватные команды диспетчера, неудовлетворительная освещенность ВПП и др.). Эти факторы не оказывают воздействия на работоспособность функциональных систем и планера.

Область B 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, встречи с птицами и др.

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

Область D рассматривается как объединенные воздействия отказов функциональных систем и планера, ошибок экипажа и одновременные воздействия среды на экипаж и ВС. *Точки множества D* 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 негативного характера – *тяжелому авиационному происшествию.*

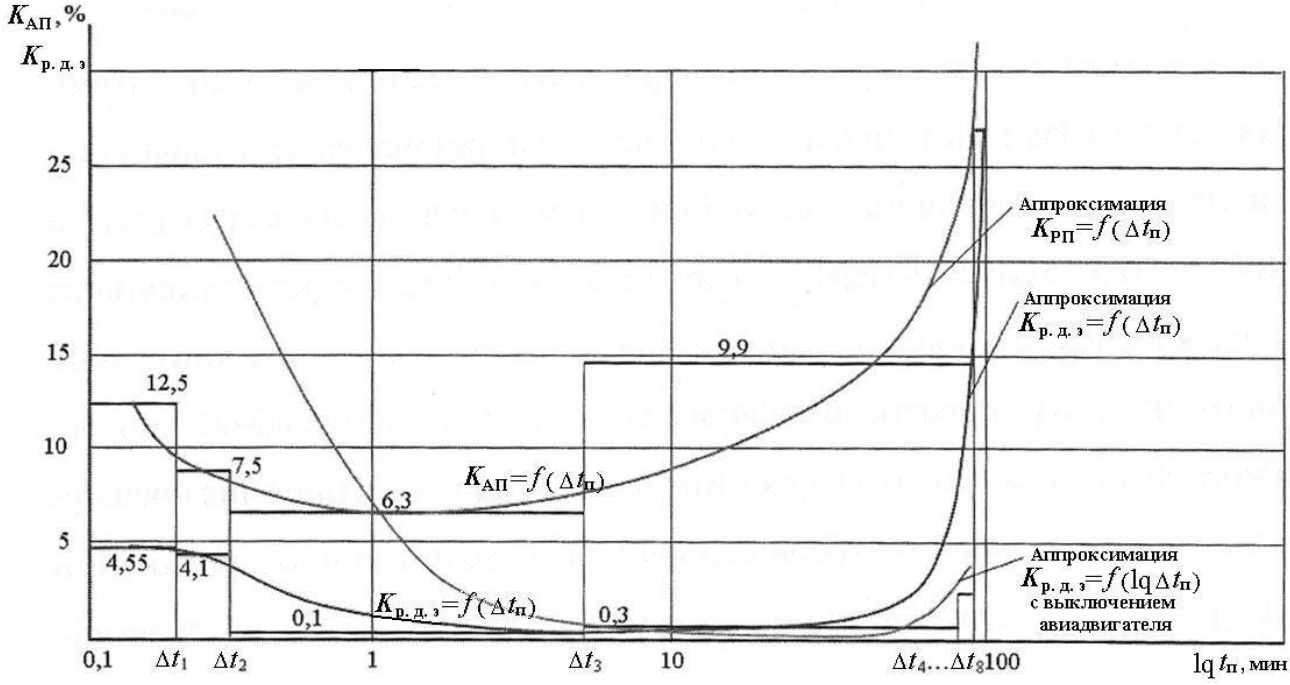


Рис. 8. Значения распределения АП (%) и $K_{р.д.э}$ по этапам полёта

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»: *A*(Э–ОС), *B*(С–ВС), *C*(Э–ВС) и *D* (Э–ВС–С), где *A*, *B*, *C*, *D* – области взаимодействия элементов, а Э, ВС, С – элементы триады соответственно экипажа, воздушного судна и среды.

Введем обозначения:

$Q_э$ – условная вероятность ошибок экипажа, вызванных совокупностью негативных факторов;

$Q_с$ – условная вероятность негативных воздействий окружающей среды;

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

Q_D – 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:

$$Q_{A(\text{э+ВС})} = Q_\text{э}Q_\text{с} - Q_\text{э}Q_\text{с}Q_\text{ВС} = Q_\text{э}Q_\text{с}P_\text{ВС}.$$

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

$$Q_{B(\text{с+ВС})} = Q_\text{с}Q_\text{ВС}P_\text{э}.$$

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

$$Q_{C(\text{э+ВС})} = Q_\text{э}Q_\text{ВС}P_\text{с}. \qquad (2)$$

Сложная полетная ситуация (СС) создается при совместных воздействиях в элементах (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)

$$Q_D = Q_\text{э}Q_\text{ВС}Q_\text{с}.$$

Переходя к вероятностям возникновения событий A, B, C, D используем выражение $Q_i = 1 - P_i$:

$$\begin{aligned}
A \quad & 1 - P_A = (1 - P_\text{э})(1 - P_\text{с})P_\text{ВС}; \\
& 1 - P_A = P_\text{ВС} - P_\text{э}P_\text{ВС} - P_\text{с}P_\text{ВС} + P_\text{э}P_\text{с}P_\text{ВС}; \\
& P_A = 1 - P_\text{ВС} + P_\text{э}P_\text{ВС} + P_\text{с}P_\text{ВС} - P_\text{э}P_\text{с}P_\text{ВС}. \\
B \quad & 1 - P_B = P_\text{э} - P_\text{с}P_\text{э} - P_\text{ВС}P_\text{э} + P_\text{с}P_\text{ВС}P_\text{э}; \\
& P_B = 1 - P_\text{э} + P_\text{с}P_\text{э} + P_\text{ВС}P_\text{э} - P_\text{с}P_\text{ВС}P_\text{э}. \\
C \quad & 1 - P_C = (1 - P_\text{э})(1 - P_\text{ВС})P_\text{с}; \\
& 1 - P_C = P_\text{с} - P_\text{э}P_\text{с} - P_\text{ВС}P_\text{с} + P_\text{э}P_\text{ВС}P_\text{с}; \\
& P_C = 1 - P_\text{с} + P_\text{э}P_\text{с} + P_\text{ВС}P_\text{с} - P_\text{э}P_\text{ВС}P_\text{с}. \\
D \quad & 1 - P_D = (1 - P_\text{э})(1 - P_\text{ВС})(1 - P_\text{с}); \\
& 1 - P_D = (1 - P_\text{э} - P_\text{ВС} + P_\text{ВС}P_\text{э})(1 - P_\text{с}); \\
& P_D = P_\text{э} + P_\text{ВС} - P_\text{ВС}P_\text{э} + P_\text{с} - P_\text{э}P_\text{с} - P_\text{ВС}P_\text{с} + P_\text{с}P_\text{ВС}P_\text{э}.
\end{aligned}$$

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:

$$P_\text{б. и. п} = 1 - P_\text{э} - P_\text{ВС} - P_\text{с} + P_A + P_B + P_C + 3P_D, \qquad (3)$$

где P_A – вероятность того, что событие A {ошибочных действий экипажа и негативного воздействия среды при выполнении полетного задания не произойдет}; P_B – вероятность того, что событие B {совместного события негативного воздействия окружающей среды и отказов ФС и/или планера} при выполнении полетного задания не произойдет; P_C – вероятность того, что событие C {совместного события ошибок экипажа и отказов ФС и/или планера} при выполнении полетного задания не произойдет.

Переходя в выражении (3) к вероятностной форме функции времени для участков Δt_i, можно получить аналитическое выражение вероятности благополучного исхода полета в форме времени эксплуатации. Это позволяет при известной статистической оценке событий *A*, *B*, *C* и *D* осуществлять статистическое моделирование комплексного показателя отказобезопасности ВС:

$$P_{\text{б. и. п}}(\Delta t_{\text{п}}) = 1 - P_{\text{э}}(\Delta t_{\text{п}}) - P_{\text{ВС}}(\Delta t_{\text{п}}) - P_{\text{с}}(\Delta t_{\text{п}}) + P_A(\Delta t_{\text{п}}) + P_B(\Delta t_{\text{п}}) + P_C(\Delta t_{\text{п}}) + 3P_D(\Delta t_{\text{п}}).$$

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 *D*).

2. Вероятностная модель (2) 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 *A*, *B*, *C* и *D* вырождаются в пустые множества.

3. Анализ статистической информации по этапам полета (Δt_i) $t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i$ 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 быть 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.

5. Выявление главной (системной) причины образования АП позволяет осуществить корректировку свойств и возможностей АТС и неповторение в эксплуатации неэффективного управления безопасностью полётов ВС.

6. Минимизация рисков авиационной деятельности фактически означает системный характер анализа причин образования АП и выработку конструктивных рекомендаций по обеспечению приемлемого уровня риска.

7. Учитывая наметившийся разрыв в темпах развития отраслевых технологий (машиностроительных, программно-математических, CALS-технологий) и уровня подготовки экипажей, значительный потенциал в сближении их соответствия следует искать в совершенствовании подходов и методологии научного осмысления. Подготовка кадров различного уровня ведётся на застывших во времени стереотипах, которые необходимо преодолевать в соответствии с опередившим темпом сложности технического и информационного глобального процесса. Прорывными факторами преодоления отставания являются разработка и применение методологии и средств имитационного моделирования задач оценки отказобезопасности.

Список литературы

1. *Полтавец В. А.* Анализ безопасности полетов с ГТД за 50-летний период эксплуатации в гражданской авиации СССР – СНГ / В. А. Полтавец, Р. А. Теймуразов // Труды общества независимых расследований авиационных происшествий. – Вып. 20. – 2008. – С. 46–65.

2. *Козлов В. В.* Безопасность полётов от обеспечения к управлению / В. В. Козлов. – М.: ОАО «Аэрофлот – Российские авиалинии». – 2010. – 270 с.
3. *Энциклопедия* безопасности авиации / под ред. Н. С. Кулика. – К.: Техніка, 2008. – 1000 с.
4. *Ошибка* пилота: человеческий фактор / пер. с англ. А. С. Щеброва. – М.: Транспорт, 1986. – 262 с.
5. *Циркуляр* ИКАО (240-AN/144). Человеческий фактор. Изучение роли человеческого фактора при авиационных происшествиях и инцидентах. Монреаль, Канада. – 1993. – №7. – 76 с.
6. *Воробьев В. М.* Вероятностная динамическая модель оценки отказобезопасности кабинного эргатического интерфейса / В. М. Воробьев, В. А. Захарченко, С. В. Енчев и др. // Проблеми інформації та управління. – 2008. – №12. – 12 с.
7. *Шишкин В. Г.* Безопасность полётов и бортовые информационные системы. – Иваново: МИК, 2005. – 240 с.
8. *Воробьев В. М.* Современные проблемы и тенденции автоматизации и взаимодействий кабинного интерфейса комплекса «экипаж–воздушное судно–среда» / В. М. Воробьев, А. Д. Киселёв, В. А. Захарченко и др. // Кибернетика и вычислительная техника. – Вып. 153 и 154 (ч. I и II). – 2007. – С. 71–86; 66–81.
9. *ДСТУ 3589–97.* Системи та комплекси авіаційного обладнання. Надійність та експлуатація. Терміни та визначення. – К.:Держстандарт України, 2000. – 18 с.
10. *Воробьёв В. М.* Формирование «дерева критериев» системной эффективности функционирования эргатического комплекса «экипаж–воздушное судно–среда» / В. М. Воробьёв, В. А. Захарченко, С. С. Ильенко // Кибернетика и вычислительная техника. – Вып. 159. – 2010. – С. 45–64.

В. М. Воробйов, М. Ф. Давиденко, В. П. Захарченко, С. В. Єнчев, С. С. Ільєнко, В. В. Козуб

Мінімізація ризиків ергатичного комплексу «екіпаж–повітряне судно–середовище». Експлуатаційна статистика та людський фактор

На підставі статистичного матеріалу за тривалий термін використання авіаційної техніки обґрунтовано оцінена ефективність авіаційної транспортної системи і виявлено найбільш вразливі місця її ланок та всієї архітектури, включаючи людський фактор, для удосконалення структури на базі нових галузевих технологій.

V. M. Vorobyov, M. F. Davydenko, V. A. Zaharchenko, S. V. Enchev, S. S. Ilyenko, V. V. Kozub

Minimize the risk ergatic complex “crew – aircraft – environment, operational statistics” and the human factor

The statistics material of long time aviation use helps us to estimate efficiency of the air transport system and to reveal the most affected places of this system, including human factor, this helps us to develop the structure that is based on new industry technologies.