

# Применение в летных тренажерах интерфейса SHEL (ИКАО) при анализе влияния человеческого фактора на безопасность полетов



**Е. А. Куклев,**  
д-р техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
механики, директор  
Центра экспертизы  
Санкт-Петербургского  
государственного  
университета гражданской  
авиации (СПбГУ ГА)



**Ю. Ю. Михальчевский,**  
канд. техн. наук,  
заведующий кафедрой  
управления воздушным  
движением, проректор  
по дополнительному  
профессиональному  
образованию и  
международным связям –  
директор авиационного  
учебного центра СПбГУ ГА



**А. Б. Байрамов,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры механики  
СПбГУ ГА



**Г. М. Петухов,**  
диспетчер управления  
движением воздушных судов

Важной проблемой в обеспечении безопасности полетов в сфере гражданской авиации является человеческий фактор. Предложена схема анализа процессов смены дискретных состояний, характеризующих возможные сценарии авиационных происшествий, регистрируемых по интерфейсу SHEL при тренировках пилотов воздушных судов на тренажерах, при нарушении требований летных стандартов. Используются модели исчисления рисков в высоконадежных системах на базе концепции безопасности полетов по ИКАО.

В объяснении причин нарушения нормального, соответствующего летным стандартам, функционирования таких эргатических систем, как «воздушное судно – экипаж», есть объективные трудности [1], поэтому в рекомендациях ИКАО особое внимание уделяется этапу повышения профессионального мастерства путем прохождения тренировок на летно-методических тренажерах различных типов [2, 3]. Ввиду трудоемкости обработки результатов тренировок возникает необходимость в разработке технологий автоматизации баз данных и методов выявления значимости влияния различных факторов, включая человеческий фактор (ЧФ), на безопасность полетов. Одна из трудностей состоит в сложности анализа мотивации поведения операторов и их психофизиологического состояния с учетом неопределенности изменения значений технических параметров системы и динамического процесса функционирования агрегатов и отдельных элементов ВС.

Подобного рода трудности характеризуют тренировочные полеты на летно-методических тренажерах типа полунатурных комплексов, таких как Airbus A320, Boeing 737NG, Cessna 172S, Diamond 42NG; на вертолетных тренажерах в комплексных тренажерных системах «Ми-8 МТВ» и других. Так, в режиме ухода воздушного судна (ВС) на второй круг [4] экипаж из-за человече-

ского фактора не смог воспользоваться ресурсами воздушного судна Boeing 737NG в виде восьми резервированных вариантов управления ВС, что, возможно, и привело к катастрофе.

Наиболее сложно объяснить психофизиологическую природу человеческого фактора и своевременно обнаружить отрицательное влияние его параметров на состояние безопасности полетов.

Из-за этих трудностей назрела необходимость в создании технологий автоматизации баз данных, а также методов, благодаря которым можно определить степень влияния различных факторов на безопасность полетов.

ИКАО предложила интерфейс SHEL [3], с помощью которого можно анализировать взаимодействие экипажей со сложной технической системой (СТС), то есть с ВС и его подсистемами как элементами полиэргатического комплекса.

Описание этого интерфейса вошло в национальный стандарт гражданской авиации РФ [5] в связи с наземной обработкой полетной информации, поэтому имеются основания для использования SHEL-интерфейса и в тренажерных комплексах, перечисленных выше.

Структура SHEL позволяет не только автоматизировать процедуры контроля параметров тренировочных полетов, но и обнаруживать ошибки пилотирования, связанные с ЧФ. Решение задачи при этом можно разделить по оценке степе-

ни влияния ЧФ на две части: психологическую и техническую. Часть психологии является прерогативой специалистов по оценке эмоциональных состояний операторов. В технической же части доминируют вопросы эргономического характера и влияние внешней среды.

Цель данной статьи – обосновать алгоритмы применения SHEL в системе обработки данных в тренажерах. Проблему ЧФ, традиционно рассматриваемую в гражданской авиации (ГА) в общей постановке, можно разрешить путем разделения ее содержания на две независимые части. Для этого достаточно в СТС перейти на модели исчисления рисков возникновения негативных последствий в новой трактовке по [1, 6]. Для этого достаточно предварительно определить все множество комбинаций состояний в SHEL, число которых всегда счетно, поэтому теоретически они могут быть найдены и пронумерованы, что позволяет идентифицировать признаки разных событий, регистрируемых в тренажерах.

### Постановка задачи и схема ее решения

Предположим, что название ЧФ условно обозначает лишь набор признаков отдельных факторов человеческой деятельности, которые негативно влияют на процессы обеспечения безопасности полетов в ГА. К их числу отнесем действия операторов в кабине ВС, диспетчеров в системе ОрВД. Эти особенности, как известно, являются предметом исследований, проводимых авиационными специалистами, прежде всего, психологами. Считается, что психическая деятельность операторов трудно поддается формализации, поэтому целесообразно признать, что интерфейс SHEL (по NASA, ИКАО) выделяет типовые подсистемы ВС [3, 6], необходимые для обеспечения безопасного полета в виде модулей: «человек (оператор)», «машина (техника)», «программы управления», «внешняя среда».

Негативное проявление ЧФ в полете может быть значимой причиной аварийных ситуаций и катастроф с ВС ГА. Одним из экспертов в области исследований ЧФ в ГА является профессор В. В. Козлов из ОАО «Аэрофлот». Он специализируется на изучении мыслительной деятельности пилотов в полете и других связанных с этим вопросах по схеме [7], что крайне важно, но трудноосуществимо, поскольку требует досто-

верной статистики по происшествиям и инцидентам.

С позиций теории системной безопасности (ТСБ) [6] известные подходы к решению проблемы ЧФ на основе вероятностных и психомоторных моделей поведения операторов и способа компенсации последствий за счет обучения недостаточно информативны. Предлагается достаточно простой способ решения проблемы на основе схемы ЧФ (в двух частях), обозначенной выше:

- выделение (разделение) и классификация всех видов взаимодействия операторов и техники на основе интерфейса SHEL, при этом выделяемое множество элементов всегда будет счетным и четким, соответствовать гипотезе булевой решетки [6] и полностью определяться всеми документами, инструкциями и регламентами для СТС конкретного типа (рис. 1а);

- описание всех возможных четких состояний подсистем по SHEL на основе графов с четкими возможными переходами (рис. 1б) – в виде копии рис. 4а из [5];

- определение множества показателей эффективности и качества деятельности, которые при ограниченном наборе переменных всегда нечеткие (практика психологов примерно такова: «обучен», «не обучен», «активен», «нерешителен» и пр.) [6].

Обобщенная характеристика может быть задана следующим образом. Первая часть – это возможности и свойства функционирующей системы, которые всегда остаются четкими. Вторая часть – это меры реализации возможностей, которые всегда нечеткие и отражают мотивы выбора оператором решений, определяемых его профессионализмом и психоэмоциональным состоянием. На этом основании могут быть априорно проанализированы разные комбинаторные схемы сочетания признаков операций в интерфейсе SHEL. Для автоматизации процедур и алгоритмов анализа необходимы признаки потери функциональности системы с возникновением последствий в виде угроз. Они могут быть использованы при оценке рисков возможных катастроф. Эти угрозы, отраженные в ТСБ [6], можно трактовать как нарушения правил летных стандартов, допускаемые операторами при тренировках. Однако риски катастроф в подобных ситуациях оцениваются достаточно адекватно только с помощью инструментов ТСБ: без вероятностных характеристик, которых часто либо нет, либо они недостоверны. В ТСБ искомое решение достигается путем

перехода на нечеткие экспертные методы оценки рисков возникновения негативных ситуаций.

### Схема обнаружения признаков ЧФ на основе кодирования состояний SHEL

Используется диаграмма интерфейса SHEL по ИКАО, которая преобразуется в матрицы кодов на основе анализа комбинаторики событий в рассматриваемом интерфейсе [3]. За основу берется следующая интерпретация функций модулей этого интерфейса. Рассматривается функциональное пространство дискретных состояний  $q_i$  для подобной диаграммы (рис. 1а), состоящей из четырех подсистем. Дискретное состояние  $q_i$  есть множество из четырех элементов  $a_i j$  (тетрада), значения которых в логической (булевой) форме  $a_i j$  следующие:

$$a_{ij} = (0 \text{ или } 1), \\ q_i = \{a_1(i), a_2(i), a_3(i), a_4(i)\}, \quad (1) \\ i = \overline{0, 15}, j = \overline{1, 16}.$$

При этом могут быть выделены всего 64 элемента  $a_i j$  – для 16 состояний цифровых кодов типа (1), соответствующих «отказам» звеньев в подсистемах SHEL в процессах, приводящих к катастрофе. Таблица кодов системы SHEL (рис. 2) следующая:

$$M_d = f(n_s, MS_{SHEL}, N_d); n_s = 4; \\ MS_{SHEL} = M_s(4), N_d = 2^4 = 16, \quad (2)$$

где  $n_s$  – число подсистем в интерфейсе;  $MS_{SHEL}$  – алфавит, или множество кодов в подсистемах SHEL;  $d$  – кодовое слово типа  $d$ , из рис. 2;  $N_d$  – число кодов.

По каждому коду может быть составлена база данных на основе статистики. Это необходимо при тренировках экипажей для автоматизированного анализа признаков аварийных ситуаций и выявления причин инцидентов по факторам ЧФ и конструктивным особенностям СТС. Таким образом, с помощью рекомендаций ТСБ предполагается решение первой части проблемы ЧФ. Оно заключается в объективной оценке значимости функций заданной СТС с обученным оператором и утвержденными летными стандартами.

Далее может решаться вторая задача (часть 2) в виде прогнозирования, анализа и поиска множества путей, ведущих к катастрофе. После этого возможно определение рисков, характеризующих уровень опасности в системе вследствие ряда угроз, которые зафиксированы при тренировках с помощью кодов по SHEL. При решении второй задачи применяется алгоритм анализа комбинаторики со-

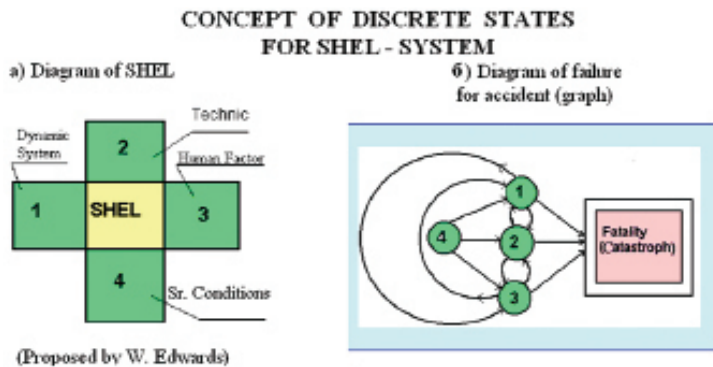


Рис. 1. Концепция SHEL-системы (копия из [5])

бытий на основе схемы рис. 1б. Для этого с помощью таблицы кодов SHEL (рис. 2) может быть построена матрица переходов системы из состояния в состояние по образцу из [6] согласно интерфейсу SHEL (рис. 1а) для заданного графа переходов по типу того, который дан на рис. 1б.

При этом графы возможных переходов из рис. 1б могут быть найдены по стандартной процедуре FMEA (Failure modes and effects analysis) [1] по результатам каждой тренировки. Далее находятся цепи возможных сценариев развития опасных и особых ситуаций в полете ВС. Следует отметить, что формально FMEA – это традиционный подход к анализу «дерева событий», но без интерпретации по интерфейсу SHEL и с оценкой только вероятностных показателей критичности состояний. Однако вероятности в идеологии ТСБ не требуются: они малоинформативны. Это не имеет практического смысла, поскольку здесь представлена совершенно новая схема решения задачи.

**Оценивание рисков на основе алгоритмов ТСБ**

В этой задаче на основе баз данных, полученных с помощью SHEL, конструируются цепи Дж. Ризона (в виде сценариев): активно или проактивно, что делается в соответствующей системе управления безопасностью полетов (в Safety Management System (SMS) или в СУБП). Риски могут определяться с по-

мощью программ анализа «деревьев событий», применяемых в теории надежности, как отмечено выше, в виде FMEA.

При изложенном подходе может быть принята известная схема, например, из [1, 4, 6] с выделением возможных сценариев событий в логическом виде в форме уравнений условий возникновения возможной катастрофы.

Мера оценки возможности того, что оператор «вдруг» нарушает в процессе тренировок летные стандарты, в данной схеме совершенно не имеет значения, так как это другая сфера исследований. Главное, чтобы техника позволяла правильно выполнять только те действия, которые предусмотрены инструкциями и Руководством по летной эксплуатации. Но прогнозируемый вред (ущерб) от ошибок поведения операторов в обнаруженном при тренировках сценарии можно оценивать на основе моделей рисков и моделей опасности в рамках счетной комбинаторики событий, определяемых по таблице кодов (рис. 2). При этом все варианты переходов системы из состояния в состояние заранее известны, счетны, комбинаторика событий определена и зафиксирована в базах данных тренажеров с помощью идентификаторов в виде дискретных состояний. Соответствующая матрица переходов с логическими символами «0» и «1» может быть найдена. Эта матрица определяется структурой булевой решетки системы с заданной струк-

$q_i$	$q_0$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$	$q_9$	$q_{10}$	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{13}$	$q_{14}$	$q_{15}$
$\alpha_r$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$	$d_{10}$	$d_{11}$	$d_{12}$	$d_{13}$	$d_{14}$	$d_{15}$	$d_{16}$
$\alpha_1 \sim S$	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
$\alpha_2 \sim H$	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
$\alpha_3 \sim E$	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
$\alpha_4 \sim L$	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1

Рис. 2. Таблица кодов системы SHEL (аналог рис. 5 из [5]): S – Surrounding (окружающая среда); H – Hardware (техника); E – Engineering (инжиниринг); L – Life (оператор)

турой в классе систем с нечеткими объектами (по методу Fuzzy Set) [5].

Общие рекомендации из книги [6] при решении проблемы ЧФ в ГА могут найти конкретное применение при автоматизированном анализе результатов оценки качества тренировок операторов на типовых тренажерах. Это отражает, например, требования Евроконтроля к содержанию процедур наземной обработки результатов, полученных при регистрации ПИ с помощью Flight Data Register (FDR).

Представленные в статье схемы кодирования параметров, характеризующих нарушения летных стандартов в тренировочных технологиях и процедурах, могут оказаться полезными и для применения в системах анализа брака и крушений в системе перевозок в ОАО «РЖД».

**Литература**

- Смуров М. Ю., Куклев Е. А., Евдокимов В. Г., Гипич Г. Н. Безопасность полетов воздушных судов гражданской авиации с учетом рисков возникновения негативных событий // Транспорт РФ. 2012. № 1(38). С. 54–58.
- Annex-19: C-WP/13935 – ANC Report (March 2013), based on AN-WP/8680 (SMM FAA) // Rev. of Air Navigation Commission. Montreal, 2013.
- Руководство по обеспечению безопасности полетов (РУБП) / пер. с англ. – Doc. 9859, AN/1460-изд 3. Doc AN/474. ИКАО (Монреаль); Минтранс РФ. М., 2013.
- Куклев Е. А., Михальчевский Ю. Ю., Смуров М. Ю.. Динамическое моделирование сценариев возникновения рисков событий при полетах ВС в режиме «Ухода на второй круг» // Науч. Вестн. МГТУ ГА. 2014. № 210.
- ГОСТ Р 55866-2013. Национальный стандарт РФ. Структура процедур и методы сбора и обработки даны ССПИ и эксплуатационного мониторинга / Е. А. Куклев. М.: Стандартиформ, 2013.
- Гипич Г. Н., Евдокимов В. Г., Куклев Е. А., Шапкин В. С. Риски и безопасность авиационных систем: моногр. М.: ФГУП ГосНИИ ГА, 2013. 232 с.
- Лейченко С. Д., Малишевский А. В., Михайлик Н. Ф. Человеческий фактор в авиации: моногр. в 2 кн. Кн. 1. СПб.: СПб ГУГА, 2005. 473 с.
- ECAST – Component of ESSI, European Strategic Safety Initiative. Руководство по идентификации опасности: Методы динамического моделирования. 2012.