

УДК 519.24:629.735.33

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ<sup>1</sup>

© С. А. Хрусталеv<sup>2</sup>, А. И. Орлов<sup>3</sup>, В. Д. Шаров<sup>4</sup>*Статья поступила 16 ноября 2012 г.*

Рассмотрены новые математические методы оценки эффективности управленческих решений при создании систем обеспечения безопасности сложных технических систем. Сущность их изложена на примере автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок. Ее конечный продукт — выработка управленческих решений, направленных на снижение риска авиационного происшествия и повышение безопасности полетов. Представлен один из подходов к формированию и оценке эффективности таких решений.

**Ключевые слова:** математические методы оценки эффективности; сложные технические системы; обеспечение безопасности; риск авиационного происшествия; управленческие решения.

Теория принятия решений [1, 2] — один из основных интеллектуальных инструментов специалиста по математическим методам исследования. При выполнении инновационных исследовательских проектов возникает необходимость разработки новых математических методов оценки эффективности управленческих решений. В данной работе рассмотрены вопросы разработки таких методов при создании систем обеспечения безопасности сложных технических систем. Сущность методов изложена на примере автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий (далее — система АСППАП) при организации и производстве воздушных перевозок [3]. Полученные результаты могут найти применение при решении задач обеспечения безопасности функционирования сложных технических систем в ракетно-космической отрасли, атомной промышленности, на железнодорожном и трубопроводном транспорте и в других областях народного хозяйства.

Система АСППАП разрабатывается крупнейшим российским грузовым авиаперевозчиком — Группой авиакомпаний «Волга — Днепр» совместно с Ульяновским государственным университетом как инновационный проект в рамках Постановления № 218 Правительства РФ от 09.04.2010. Работу коллектива исполнителей, состоящего из сотрудников Ульяновского государственного университета, Группы авиа-

компаний «Волга — Днепр» и специально приглашенных консультантов, координирует Экспертный совет проекта под председательством член-корр. РАН Н. А. Махутова.

Группа компаний «Волга — Днепр» на протяжении более 20 лет успешно представляет российскую грузовую гражданскую авиацию на международном рынке, являясь мировым лидером в сегменте перевозок сверхтяжелых и негабаритных грузов. В ее состав входят две ведущие грузовые авиакомпании России — «Волга — Днепр» и «ЭйрБриджКарго» — многократные обладатели национальной премии «Крылья России». Интернациональный коллектив «Волга — Днепр» насчитывает около 3000 сотрудников, представительства группы располагаются в девяти странах мира. Основу бизнеса Группы «Волга — Днепр» составляют чартерные воздушные перевозки на уникальных рамповых самолетах Ан-124-100 и Ил-76 (авиакомпания «Волга — Днепр») и регулярные авиаперевозки грузов на воздушных судах семейства Boeing 747 (авиакомпания «ЭйрБриджКарго»).

Монопольное положение Группы компаний «Волга — Днепр» на мировом рынке нестандартных грузоперевозок определяется тем, что она располагает самым многочисленным в мире флотом уникальных самолетов Ан-124-100. «Достойных конкурентов у Ан-124-100 на мировом рынке воздушных перевозок крупногабаритных и сверхтяжелых грузов до сих пор нет и, что самое любопытное, не предвидится. 150 тонн груза в любую точку планеты — бесспорно один из главных итогов первого века авиации, одно из высших ее достижений» [4, с. 8].

В соответствии с требованиями Международной организации гражданской авиации (ИКАО) каждая авиакомпания разрабатывает и совершенствует систему управления безопасностью полетов. Разрабатываемая Группой компаний «Волга — Днепр» совместно с

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

<sup>2</sup> Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск, Россия; e-mail: shrustalev@mail.ru

<sup>3</sup> Институт высоких статистических технологий и эконометрики Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия; e-mail: prof-orlov@mail.ru

<sup>4</sup> Группа компаний «Волга — Днепр», Москва, Россия; e-mail: V.Sharov@Volga-Dnepr.com

Ульяновским государственным университетом и консультантами система АСППАП отличается гораздо более глубокой проработкой вопросов оценки, анализа и управления рисками, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования по сравнению с другими системами управления безопасностью полетов. Единственным аналогом является система CATS, разработанная по заказу Правительства Нидерландов, однако она заметно проще, не использует объективные данные об эксплуатационной деятельности авиакомпании, а также ожидаемых условиях выполнения полета и позволяет решать существенно меньший объем задач. Поэтому можно констатировать, что система АСППАП является новой в мировом масштабе инновационной разработкой, позволяющей успешно решать ключевую в авиационной отрасли проблему подготовки правил и выдачи рекомендаций руководителям по принятию решений при управлении безопасностью полетов. Планируется, что система будет тиражироваться — передаваться авиакомпаниям и внедряться в них.

Одним из основных результатов работы системы АСППАП является перечень рекомендуемых управленческих решений, направленных на повышение безопасности полетов. Эффект от внедрения управленческих решений, принимаемых с использованием системы, будет во многом определяться методологией и алгоритмом ее работы [5].

Алгоритм функционирования системы АСППАП в части оперативного анализа безопасности полетов основан на расчете риска 12 основных типов авиационных событий. Такими типами авиационных событий являются, например, столкновение в воздухе, выкатывание за пределы взлетно-посадочной полосы, пожар и др. Риск выражается характеристиками распределения ущерба от авиационного события. На первом этапе разработки и опытной эксплуатации системы АСППАП используется упрощенный вариант расчета риска как математического ожидания (среднего ожидаемого ущерба), равного произведению вероятности авиационного события (рассчитывается по исходным данным о деятельности авиакомпании и статистике авиационных событий) и среднего ущерба (определяется по данным страховых случаев с экспертным учетом опыта авиакомпании) [6, 7].

Вероятности авиационных событий рассчитываются на основе разработанных «деревьев развития авиационных событий» с использованием известных методов анализа видов и последствий отказов FMEA и анализа дерева отказов FTA [8]. При этом прогноз вероятности авиационных происшествий выполняется на основе моделирования развития авиационных событий в полете в виде «деревьев», которые представляют собой логические схемы, отражающие возможные сценарии развития события от проявлений факторов опасности и их комбинаций через промежуточные

события и барьеры безопасности до авиационных происшествий определенного типа.

«Деревья событий» (иногда — «деревья неисправностей») — распространенный инструмент моделирования рисков сложных технических систем. Они используются в разнообразной нормативно-технической документации, например: ГОСТ Р 51901–2002 «Управление надежностью. Анализ рисков технологических систем»; ГОСТ Р 51901.12–2007 (МЭК 60812:2006) «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов»; РД 09–536-03 «Методические указания о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах»; РД 03–418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов».

Построение деревьев событий и их применение для логико-вероятностного моделирования риска рассмотрены в монографии [9], входящей в серию «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты», выпускаемую большим коллективом наиболее компетентных специалистов РАН, министерств и ведомств. Деревья событий позволяют проводить структурное проектирование высокорисковых объектов [10]. При математическом моделировании сложных технологических процессов железнодорожного транспорта [11] используется, в частности, дерево возникновения и развития ситуации, приводящей к проезду на запрещающий сигнал. Деревья событий применяются [12] в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» (Украина). Они играют важную роль в теории и практике определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов [13].

В соответствии с экспертным решением заказчика проекта в рамках АСППАП рассматриваются три горизонта (вида) прогнозирования: оперативный — риск «завтрашнего» полета; среднесрочный — риск полетов на предстоящий квартал; долгосрочный — риск на перспективу в три года.

Для каждого вида риска определены три уровня по «светофорному» принципу («зеленый» — «желтый» — «красный») и разработана методология принятия решений.

### **Принцип формирования набора управленческих решений**

Будущими пользователями системы признано необходимым формирование базы данных рекомендаций по управленческим решениям в области обеспечения безопасности полетов с предварительной оценкой их эффективности для всех трех видов риска. При очевидных особенностях формирования, внедрения и оценки эффективности управленческих решений «по факту» для разных видов риска методология предварительной оценки эффективности управленческих ре-

шений остается единой. В данной работе для конкретности изложения она описана применительно к оперативным и среднесрочным рискам.

Ввиду сложности авиационно-транспортной системы «деревья» моделей развития авиационных событий имеют большое количество «ветвей» и «листьев». Общее количество инициирующих событий, ошибочных действий, условий и обстоятельств, других входных данных, расположенных на нижнем уровне деревьев авиационных событий и названных в системе АСППАП факторами опасности, составляет более 400. В конечном итоге вероятность (возможность) возникновения авиационного события определяется вероятностями соответствующих факторов опасности.

Предполагаемые управленческие решения должны воздействовать на вероятности проявлений отдельных факторов опасности. В ряде случаев оценка этих воздействий может быть получена на основе статистики (по опыту внедрения подобных управленческих решений) или технических характеристик (при модернизации воздушного судна). Но в большинстве случаев воздействие управленческих решений, принимаемых в авиакомпании, на факторы опасности прогнозируется на основе экспертных оценок с использованием современных технологий [14, 15]. Поскольку выполнить экспертное оценивание влияния каждого управленческого решения на каждый фактор опасности не представляется возможным в силу большого количества учитываемых факторов, принято решение выполнить их «свертку», объединив в укрупненные факторы опасности. При этом использована общепринятая для эргатических<sup>5</sup> систем трехкомпонентная модель «Человек – Машина – Среда».

В качестве примера приведем список из 10 укрупненных факторов опасности для компоненты «Человек», которая с учетом дополнительных характеристик пилота насчитывает 142 фактора:

- 1) отклонения в технике пилотирования на взлете и наборе высоты;
- 2) отклонения в технике пилотирования на снижении, заходе и посадке;
- 3) ошибочные действия в особых ситуациях;
- 4) нарушения стандартных эксплуатационных процедур;
- 5) ошибки при анализе информации и принятии решений;
- 6) недостатки взаимодействия в экипаже;
- 7) усталость экипажа;
- 8) недостатки взаимодействия «экипаж – диспетчер по организации воздушного движения»;
- 9) ошибки при техническом обслуживании самолета;
- 10) ошибки при загрузке/разгрузке самолета.

<sup>5</sup> Эргатическая система — система управления, одним из элементов которой является человек или группа людей.

Разработаны перечни укрупненных факторов опасности по компонентам «Машина» (11 факторов) и «Среда» (девять факторов).

На основании опыта эксплуатационной деятельности авиакомпании, опросов руководителей и анализа результатов расследования авиационных событий составляется список управленческих решений, воздействующих на укрупненные факторы опасности — формируется база данных управленческих решений. Затем выполняется экспертная оценка воздействия каждого управленческого решения на каждый укрупненный фактор опасности с использованием современных технологий экспертного оценивания [14, 15]. В результате рассчитываются характеристики управленческих решений в виде снижения вероятности проявления укрупненных факторов опасности в данном полете (для оперативного прогноза) при внедрении данного решения.

Для перехода от уровня снижения вероятности проявлений укрупненных факторов опасности к показателям снижения вероятности проявлений факторов опасности, которые используются непосредственно в вычислениях системы АСППАП, было проведено специальное исследование и предложены новые метод, методика и алгоритм расчета.

### Оценка эффективности управленческих решений

Приведем математическое описание подхода к оценке эффективности управленческих решений, на основе которого строятся расчеты в системе АСППАП.

Пусть  $T = \{T_j\}_{j=1, \dots, 12}$  — множество рассматриваемых авиационных событий (случайных), заданных на некотором вероятностном пространстве  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ . Для всех  $T_j, j = 1, \dots, 12$ , существует набор факторов опасности  $A^j = \{A_i^j\}_{i=1, \dots, N_j}$ , каждый из которых также является случайным событием.

Пусть на основе данных о предстоящем перелете (при оперативном прогнозировании) или усредненных эксплуатационных данных авиакомпании (при среднесрочном прогнозировании) рассчитаны вероятности всех факторов опасности  $P(A_i^j) = p_{ij}, j = 1, \dots, 12, i = 1, \dots, N_j$ . Тогда вероятность каждого авиационного события можно представить как некоторую функцию (вид зависит от структуры дерева соответствующего авиационного события), аргументами которой являются вероятности факторов опасности:

$$P(T^j) = P^j = f^j(p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{N_j j}), j = 1, \dots, 12. \quad (1)$$

При этом для каждого  $j = 1, \dots, 12$  функция  $f^j(x_1, x_2, \dots, x_{N_j})$  является неубывающей по каждому аргументу, т.е. для любого  $i = 1, \dots, N_j$  и для  $\forall x < y$  выполняется неравенство

$$f^j(x_1, \dots, x_{i-1}, x, x_{i+1}, \dots, x_{N_j}) \leq f^j(x_1, \dots, x_{i-1}, y, x_{i+1}, \dots, x_{N_j}). \quad (2)$$

Для расчета эффективности управленческого решения наряду с анализом вероятностей возникновения авиационного события необходимо оценить и риски, связанные с предстоящим полетом (оперативный прогноз) или с эксплуатационной деятельностью авиакомпании за определенный период (среднесрочный прогноз). Риск, связанный с возникновением авиационного события  $j$ -го типа, определяется по формуле

$$R^j = P^j S^j, \quad (3)$$

где  $P^j$  — вероятность возникновения авиационного события, рассчитанная по формуле (1);  $S^j$  — величина среднего ущерба при наступлении авиационного события  $j$ -го типа, определяемая на основе мировой статистики страховых выплат и статистики автоматизированной системы обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации Российской Федерации.

Интегральная оценка риска (и соответственно безопасности) предстоящего полета или эксплуатационной деятельности авиакомпании определяется суммой рисков по каждому авиационному событию:

$$R = \sum_{j=1}^{12} R^j. \quad (4)$$

Принимаемые в авиакомпании управленческие решения, направленные на повышение безопасности полетов, должны снижать уровень риска (4). К тому же каждое управленческое решение имеет некоторую стоимость. Поэтому предполагаемая эффективность управленческого решения (набора решений) определяется величиной, на которую снижается вероятность авиационного события (величина ущерба от авиационного события остается неизменной), и стоимостью данного управленческого решения (набора управленческих решений).

Пусть  $U = \{U_k\}_{k=1 \dots M}$  — набор всех возможных управленческих решений для определенного варианта оперативного или среднесрочного прогноза. Каждое управленческое решение характеризуется следующими параметрами, оценка которых необходима для расчета эффективности: стоимостью (определяется финансовыми подразделениями авиакомпании на основе экономических расчетов); масштабом внедрения в рамках авиакомпании (определяется руководителями, принимающими решения о внедрении управленческого решения и представляет собой, например, долю личного состава, прошедшего повышение квалификации, долю парка воздушных судов авиакомпании, подвергшихся модернизации и т.д.); степенью влияния на факторы опасности (определяется с помощью экспертного опроса). Масштаб внедрения управленческого решения представляется коэффициентом, значение которого принадлежит отрезку  $[0; 1]$ . Пусть  $C_k$ ,  $k = 1, \dots, M$ , — стоимость управленческого решения  $U_k$ , а  $q_{ij}^k$ ,  $0 \leq q_{ij}^k \leq 1$ ,  $k = 1, \dots, M$ ,  $j = 1, \dots, 12$ ,  $i = 1, \dots, N$ , —

доля, на которую уменьшится вероятность фактора опасности  $A_i^j$  при внедрении управленческого решения  $U_k$ . Положим, что в дальнейших расчетах величины  $C_k$  и  $q_{ij}^k$  приводятся с учетом коэффициента внедряемости. Например, проведение некоторого управленческого решения  $U_k$  снижает вероятность проявления фактора опасности  $A_i^j$  на 20 % и внедрение данного управленческого решения планируется на 80 % в рамках всей авиакомпании. Таким образом, величина  $q_{ij}^k = 0,2 \cdot 0,8 = 0,16$ , а вероятность фактора опасности  $P(A_i^j) = p_{ij}$  после внедрения управленческого решения заменяется на  $P(A_i^j | \text{принято УР } U_k) = p_{ij}(1 - q_{ij}^k)$ . Следует отметить, что многие величины  $q_{ij}^k$  будут равны нулю, что означает отсутствие влияния управленческого решения на соответствующий фактор опасности (независимость событий  $U_k$  и  $A_i^j$ ).

Если принимается набор управленческих решений  $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$ ,  $k_l \in \{1, \dots, M\}$ , то вероятность фактора опасности определяется формулой

$$P(A_i^j | \text{принят набор УР } \{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}) = p_{ij} \prod_{l=1}^m (1 - q_{ij}^{k_l}). \quad (5)$$

Вероятность каждого авиационного события [см. формулу (1)] с учетом принимаемого набора управленческих решений  $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$ ,  $k_l \in \{1, \dots, M\}$ , составляет

$$P^{*j} = P(T^j | \text{принят набор УР } \{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}) = f^j \left[ p_{1j} \prod_{l=1}^m (1 - q_{1j}^{k_l}), p_{2j} \prod_{l=1}^m (1 - q_{2j}^{k_l}), \dots, p_{Nj} \prod_{l=1}^m (1 - q_{Nj}^{k_l}) \right]. \quad (6)$$

Устраненный внедрением набора управленческих решений  $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$  риск по каждому авиационному событию

$$\Delta R^j = (P^j - P^{*j}) S^j, \quad (7)$$

а общий устраненный риск

$$\Delta R = \sum_{j=1}^{12} \Delta R^j. \quad (8)$$

С другой стороны, стоимость набора управленческих решений  $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$  составляет

$$C = \sum_{l=1}^m C_{k_l}. \quad (9)$$



Рассчитав величины (8) и (9), можно определить эффективность управленческого решения (каждого в отдельности и набора в целом), используя как абсолютные критерии (абсолютный эффект от внедрения управленческого решения)

$$W_{\text{абс}} = \Delta R - C, \quad (10)$$

так и относительные (устраненный с помощью управленческого решения риск за единицу вложенных средств)

$$W_{\text{отн}} = \Delta R / C. \quad (11)$$

### Влияние управленческого решения на факторы опасности

Указанное влияние оценивается по известному показателю воздействия управленческого решения на укрупненный фактор опасности [16]. На практике при реализации описанного выше подхода к предварительной оценке эффективности управленческого решения возникает весьма объемная задача экспертного оценивания величин  $q_{ij}^k$ ,  $k = 1, \dots, M$ ;  $j = 1, \dots, 12$ ;  $i = 1, \dots, N_j$ , представляющих собой набор долей, на которые уменьшатся вероятности факторов опасности  $A_i^j$  при внедрении управленческих решений  $U_k$ . Даже при невысоких числах возможных управленческих решений (например,  $M = 25$ ) и факторов опасности в дереве авиационного события (например,  $N_j = 30$ ) количество оценок, которое необходимо получить от каждого эксперта, будет равно  $25 \times 30 \times 12 = 9000$ , что, конечно же, практически невозможно.

Поэтому эксперты оценивают величину влияния управленческих решений на укрупненные факторы опасности. После этого возникает задача расчета влияния управленческого решения на фактор опасности по этой уже известной (оцененной экспертами) величине.

Каждый укрупненный фактор опасности  $B_l^j$ ,  $j = 1, \dots, 12$ ,  $l = 1, \dots, L_j$ , представляет собой объединение (сумму) независимых случайных событий (являющихся факторами опасности некоторого авиационного события  $T_j$ ,  $j = 1, \dots, 12$ ), заданных на вероятностном пространстве  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ :

$$B_l^j = A_i^j(1) + A_i^j(2) + \dots + A_i^j(b_l^j),$$

где  $b_l^j$  — число факторов опасности, объединением которых является укрупненный фактор опасности  $B_l^j$ . При этом каждый фактор опасности содержится только в одном укрупненном факторе. Рассмотрим подробнее произвольный укрупненный фактор опасности какого-либо авиационного события.

Пусть укрупненный фактор опасности  $B$  (случайное событие на вероятностном пространстве  $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$ ) является суммой (объединением)  $n$  независимых факторов опасности, также являющихся случайными событиями:  $B = A_1 + A_2 + \dots + A_n$ . Обозначим вероят-

ности данных событий следующим образом:  $P(B) = p$ ,  $P(A_i) = p_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . В силу независимости факторов опасности запишем

$$p = 1 - (1 - p_1) \dots (1 - p_n). \quad (12)$$

Пусть с помощью экспертного оценивания получена величина  $0 < q \leq 1$ , являющаяся долей, на которую снижается вероятность укрупненного фактора опасности при внедрении определенного управленческого решения  $U$ :

$$P(B | \text{внедрение } U) = (1 - q)p. \quad (13)$$

На основе формул (12) и (13) необходимо для каждого фактора опасности  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , получить долю  $0 \leq q_i \leq 1$ , на которую снижается вероятность данного фактора опасности при внедрении управленческого решения  $U$  (эффективность управленческого решения в отношении каждого фактора опасности):

$$P(A_i | \text{внедрение } U) = (1 - q_i)p_i. \quad (14)$$

В основе алгоритма расчета величины влияния управленческого решения на фактор опасности лежит предположение, согласно которому управленческое решение может вовсе не влиять на некоторые факторы опасности, входящие в укрупненный фактор, но на все оставшиеся факторы опасности оно влияет одинаковым образом (обоснованность предположения проверена с помощью имитационного моделирования). Следуя этому предположению, получаем (без ограничения общности):  $q_i = 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ ;  $q_i = Q$ ,  $i = m + 1, \dots, n$ . Обозначим  $k = 1 - q$  и  $x = 1 - Q$ , тогда из формул (12) – (14) следует

$$kp = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)(1 - xp_{m+1})(1 - xp_{m+2}) \dots (1 - xp_n) = f(x), \quad (15)$$

где функция  $f(x)$  является монотонно возрастающей на множестве  $x \in [0; 1]$ . При  $m = 0$  (управленческое решение влияет на все факторы опасности, входящие в укрупненный фактор) уравнение (15) для  $\forall k \in [0; 1]$  имеет единственное решение  $f(x^*) = kp$ ,  $x^* \in [0; 1]$ , так как  $f(0) = 0 \leq kp < p = f(1)$ . Значение  $x^*$  (с учетом приведенных выше обозначений) используется при пересчете вероятностей факторов опасности при внедрении управленческого решения.

В случае, когда  $0 < m < n$  (управленческое решение влияет не на все факторы опасности, входящие в укрупненный фактор), уравнение (15) будет иметь решение, если выполнено условие

$$k \geq \frac{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)}{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n)} = \frac{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)}{p}. \quad (16)$$

Это условие является критерием корректности экспертного оценивания коэффициента  $k$  (экспертно оценивается параметр  $q$ , но  $k = 1 - q$ ). Например, неправильно утверждать, что некоторое управленческое

решение на 90 % сокращает вероятность укрупненного фактора опасности (соответственно  $k = 0, 1$ ), состоящего из десяти факторов, если данное управленческое решение вообще не влияет на половину факторов опасности, входящих в укрупненный фактор. Поэтому в случае невыполнения условия (16) в некотором расчете вероятностей факторов опасности необходимо брать такое значение  $x^* \in [0; 1]$ , при котором  $f(x^*)$  было бы максимально близко к  $kp$ , т.е.  $x^* = 0$ .

Обобщая два рассмотренных случая, можно записать решение задачи нахождения величины влияния управленческого решения на фактор опасности по известному показателю влияния управленческого решения на укрупненный фактор [см. формулы (12) – (15)] следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, m \\ 1 - \arg \min_{x \in [0; 1]} |f(x) - kp|, & i = m + 1, \dots, n. \end{cases} \quad (17)$$

Отдельно стоит рассмотреть ситуацию, когда вероятности факторов опасности  $p_i, i = 1, \dots, n$ , достаточно малы (в области применения системы АСППАП таких ситуаций большинство). В этом случае вероятность укрупненного фактора опасности в выражении (12) составит

$$p \approx \sum_{i=1}^n p_i, \quad (18)$$

а уравнение (15) примет вид

$$kp \approx \sum_{i=1}^m p_i + x \sum_{i=m+1}^n p_i. \quad (19)$$

В результате при малых значениях вероятностей факторов опасности решение задачи нахождения величины влияния управленческого решения на фактор опасности по известному показателю влияния управленческого решения на укрупненный фактор будет выглядеть следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, m \\ \min \left\{ pq \left( \sum_{i=m+1}^n p_i \right)^{-1}; 1 \right\}, & i = m + 1, \dots, n, \end{cases} \quad (19)$$

где  $p$  определяется по формуле (18).

Таким образом, разработанные методы позволяют оценить влияние управленческих решений на значения факторов опасности. С помощью системы АСППАП рассчитывают эффективность набора управленческих решений. Решая задачу оптимизации, при заданном бюджете на обеспечение безопасности полетов находят наилучший набор управленческих решений, затем определяют величину финансовых вложений, необходимых для снижения риска на заданную величину и дальнейшего поддержания приемлемого уровня риска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А. И. Теория принятия решений. — М.: Экзамен, 2006. — 576 с.
2. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений. — М.: КноРус, 2011. — 568 с.
3. Бутов А. А., Волков М. А., Макаров В. П., Орлов А. И., Шаров В. Д. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок / Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 380 – 385.
4. Ельцов Г. АН-124 «Руслан». История воздушного превосходства. — М.: Зебра, 2011. — 300 с.
5. Орлов А. И. Влияние методологии на последствия принятия решений / Материалы I Международного конгресса по контроллингу. Вып. № 1 / Под науч. ред. С. Г. Фалько. — М.: НП «ОК», 2011. С. 86 – 90.
6. Бутов А. А., Орлов А. И., Сирота В. В., Шаров В. Д. Принятие решений при разработке системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок / Теория активных систем: Труды международной научно-практической конференции (14 – 16 ноября 2011 г., Москва, Россия). Т. I / Под общей ред. В. Н. Буркова, Д. А. Новикова. — М.: ИПУ РАН, 2011. С. 112 – 115.
7. Орлов А. И., Рухлинский В. М., Шаров В. Д. Экономическая оценка рисков при управлении безопасностью полетов / Материалы I Международной конференции «Стратегическое управление и контроллинг в некоммерческих и публичных организациях: фонды, университеты, муниципалитеты, ассоциации и партнерства». Вып. 1 / Под науч. ред. С. Л. Байдакова и С. Г. Фалько. — М.: НП «ОК», 2011. С. 108 – 114.
8. Шаров В. Д., Макаров В. П. FMEA-FTA методология построения дерева развития авиационного события / Научный вестник МГТУ Гражданской Авиации. 2011. № 174. С. 18 – 24.
9. Анализ риска и проблем безопасности. В 4 ч. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / Под науч. ред. К. В. Фролова. — М.: МГФ «Знание», 2006. — 640 с.
10. Анализ риска и проблем безопасности. В 4 ч. Ч. 4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности. / Под науч. ред. К. В. Фролова. — М.: МГОФ «Знание», 2007. — 864 с.
11. Гуда А. Н. Математическое моделирование сложных технологических процессов железнодорожного транспорта. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1995. — 155 с.
12. Бабешко Е. В., Харченко В. С. Возможности совместного использования современных методов анализа отказов систем, важных для безопасности / Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. 2009. № 6(40). С. 60 – 64.
13. Зубков Б. В., Шаров В. Д. Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов. — М.: МГТУ ГА, 2010. — 196 с.
14. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 2. Экспертные оценки. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 486 с.
15. Орлов А. И., Савинов Ю. Г., Богданов А. Ю. Опыт экспертного оценивания условных вероятностей редких событий при разработке автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий / Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 501 – 506.
16. Хрусталева С. А., Орлов А. И., Шаров В. Д. Оценка эффективности управленческих решений в автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий / Изв. Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 535 – 539.