

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРОИСШЕСТВИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Д. Г. Пантенков

АО «Кронштадт», Москва, 115432, Российская Федерация

Адрес для переписки: pantenvkov88@mail.ru

Аннотация

Анализ научных работ показывает, что до настоящего времени общепризнанная теория технико-экономического обеспечения безопасности системы «персонал-ракетно-космический комплекс (РКК)-среда» отсутствует. Однако необходимо отметить, что некоторые элементы такой теории содержатся в общей теории оценки рисков в сочетании с методами актуарной математики, а также в сочетании с методами оценки технико-экономических затрат на создание и эксплуатацию космических средств. Известные методы технико-экономической оценки стоимости на создание и эксплуатацию космических средств базируются, в основном, на затратном принципе и ориентированы на учет фактических затрат, необходимых для проведения опытно-конструкторских работ, производства и эксплуатации образцов космической техники, объектов космической инфраструктуры с включением нормативной прибыли. При этом множество известных методов технико-экономической оценки затрат на создание и эксплуатацию космических средств условно может быть разделено на следующие основные группы: калькуляционные методы, нормативно-параметрические методы и методы экспертной оценки. При исследовании вопросов обеспечения безопасности и предупреждения происшествий на ракетно-космическом комплексе (РКК) необходимо учитывать основные особенности их функционирования, которые заключаются в обязательном учете свойств обслуживающего персонала, собственно технических средств РКК и окружающей природной среды. Особенностью функционирования системы «персонал-РКК-среда» является наличие большого количества информационных связей, которые характеризуют ее информационную работоспособность. В данной научно-технической статье предлагаются новые пути, способы, методы и средства, гарантирующие принятие оптимальных (рациональных) решений по предупреждению происшествий с учетом ресурсных ограничений на парирование нештатных ситуаций (НШС). Рассмотрены модели некоторых видов ресурсов, которые целесообразно использовать при проведении технико-экономических расчетов для решения многообразных задач обеспечения безопасности системы «персонал-РКК-среда» **Основные результаты.** Разработаны агрегированные модели ресурсов, которые целесообразно использовать для оценки технико-экономических показателей безопасности. Решена задача оптимального выбора уровня безаварийности КА в процессе летной эксплуатации при ограничениях на обеспечение безопасности с использованием критерия «эффективность-безопасность-стоимость», получены номограммы взаимосвязи показателей для критерия «эффективность-безопасность-стоимость». **Практическая значимость.** Предложенные модели

позволяют оценить долю затрат, необходимых для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, РКК и его составных частей, а также окружающей природной среды.

Ключевые слова

Технико-экономический анализ, методы обеспечения безопасности, качество, надежность, персонал-ракетно-космический комплекс-среда, штатные ситуации, проектирование, эксплуатация, летные испытания.

Информация о статье

УДК 621-396

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 14.10.19, принята к печати 30.12.2019.

Ссылка для цитирования: Пантенков Д. Г. Технико-экономические методы обеспечения безопасности и предупреждения происшествий ракетно-космического комплекса // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Том 7. № 2. С. 65–84. DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-65-84.

METHODICAL APPROACH OF PROVIDING OF SAFETY AND ACCIDENT PREVENTION OF ROCKET AND SPACE COMPLEX

D. Pantenkov

Kronstadt joint Stock company, Moscow, 115432, Russian Federation

Corresponding author: pantenkov88@mail.ru

Abstract—The analysis of scientific works shows that today there is no generally accepted theory of technical and economic security of the system "personnel-rocket and space complex-environment". However, it should be noted that some elements of this theory are contained in the General theory of risk assessment in combination with the methods of actuarial mathematics, as well as in combination with the methods of assessing the technical and economic costs of the creation and operation of space assets. The known methods of technical and economic assessment of costs for the creation and operation of space objects are based mainly on the cost principle and are focused on the actual costs necessary for the development, production and operation of samples of space technology, space infrastructure with the inclusion of standard profit. At the same time, many of the known methods of technical and economic evaluation of the costs of the creation and operation of space objects can be divided into the following main groups: methods of calculation, normative and parametric methods and methods of expert evaluation. When studying safety issues and preventing accidents at the rocket and space complex, it is necessary to take into account the main features of their functioning, which consist in the mandatory accounting of the properties of maintenance personnel, the actual technical means of the rocket and space complex and the environment. A feature of the system "personnel-rocket and space complex-environment" is the presence of a large number of information links that characterize its information efficiency. This scientific and technical article proposes new ways, methods and means to ensure the adoption of optimal (rational) decisions to prevent accidents, taking into account resource constraints on parrying emergencies. Models of some types of resources that are appropriate to use in carrying out technical and economic calculations to solve various problems of the security system "personnel-rocket and space complex-environment". **Core results.** The aggregate models of resources which are expedient to use for an assessment of technical and economic indicators of safety are developed. The problem of optimal choice of the level of accident-free

SPACECRAFT in the process of flight operation with restrictions on safety using the criterion "efficiency-safety-cost" is solved, nomograms of interrelation of indicators for the criterion "efficiency-safety-cost" are received». **Practical relevance.** The proposed models allow us to estimate the share of costs required to ensure the safety of service personnel, RSC and its components, as well as the environment.

Keywords—technical and economic analysis, safety methods, quality, reliability, personnel-rocket and space complex-environment, emergency situations, design, operation, flight tests.

Article info

Article in Russian.

Received 14.10.19, accepted 30.12.2019.

For citation: Pantenkov D.: Technical and Economic Methods of Safety and Accident Prevention of Rocket and Space Complex // Telecom IT. 2019. Vol. 7. Iss. 2. pp. 65-84 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2019-7-2-65-84.

Введение

В новых экономических условиях с расширением рынка космических услуг одновременно с созданием правовой базы осуществления космической деятельности начался процесс активного совершенствования существующего научно-методического аппарата и разработки новых методов экономического обоснования затрат на создание (модернизацию), эксплуатацию и утилизацию образцов космической техники и объектов космической инфраструктуры. В частности, при определении договорных (контрактных) цен на космические средства и услуги участники космической деятельности (заказчик, изготовитель, потребитель результатов, страховые компании и др.) должны иметь информацию о нижнем и верхнем пределах лимитной цены на разработку, производство, эксплуатацию и утилизацию космических средств. Применительно к обеспечению безопасности системы «персонал-РКК-среда» некоторые важные практические задачи технико-экономического характера в новых условиях осуществления космической деятельности оказались исследованы в недостаточной мере [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

К основным задачам относятся следующие:

- разработка моделей ресурсов, необходимых для оценки затрат на обеспечение безопасности РКК, обоснование технико-экономических показателей и критериев безопасности;
- выбор путей оптимального инвестирования программ обеспечения безопасности (ПОБ) РКК и их составных частей, а также путей и способов перераспределения ресурсов от выделенного общего объема на реализацию космической программы (проекта) в целях предупреждения происшествий;
 - определение возможностей по управлению рисками в процессе создания (модернизации), эксплуатации и утилизации РКК и его составных частей;
 - оптимальный выбор страхователем страхового полиса (контракта) для определения путей, способов и средств компенсации вреда (ущерба) от происшествий, возникающих в процессе создания, эксплуатации и утилизации элементов РКК;
 - определение оптимальных (рациональных) норм экономического стимулирования собственников, разработчиков, изготовителей составных частей РКК

по результатам их эксплуатации с точки зрения выполнения требований по обеспечению безопасности;

- оценка эффективности методов предупреждения происшествий на РКК по критерию «эффективность-безопасность-стоимость» и др.

Как будет показано ниже, для решения указанных выше задач, а также для решения иных технико-экономических задач, связанных с обеспечением безопасности РКК, необходима разработка новых путей, способов, методов и средств, гарантирующих принятие оптимальных (рациональных) решений по предупреждению происшествий с учетом ресурсных ограничений на парирование НШС.

В общем случае разнообразные виды ресурсов, необходимых для обеспечения безопасности эргатической системы «персонал-РКК-среда», могут быть разделены на следующие классы:

- ресурсы для обеспечения безопасности обслуживающего персонала;
- ресурсы для обеспечения безопасности технических систем, узлов, агрегатов РКК и его составных частей;
- ресурсы для обеспечения безопасности окружающей природной среды и сопрягаемых с РКК объектов.

В соответствии с типовой технической структурой РКК в рамках каждого из указанных классов ресурсы, в свою очередь, могут быть объединены в следующие основные группы: материальные, финансовые, людские (трудовые) и временные. Каждая из указанных групп ресурсов, с одной стороны, обладает относительной самостоятельностью, а с другой стороны, находится во взаимосвязи с другими видами ресурсов. При этом одним из наиболее сложных видов ресурсов с точки зрения управления, использования и восполнения являются временные ресурсы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Совокупность указанных групп ресурсов представляет собой некоторую упорядоченную иерархическую структуру, которая предъявляет жесткие требования к профессиональной деятельности обслуживающего персонала; обоснованности принимаемых решений по контролю, идентификации, локализации и парированию возникающих НШС; к ограничениям отрицательного воздействия на окружающую природную среду и воздействиям возмущающих факторов, обусловленных самой природной средой; к функциональной инерционности создаваемых (модернизируемых) элементов РКК и, как следствие, к возможностям по обеспечению безопасности в процессе их эксплуатации. В частности, группа финансовых ресурсов может быть, в свою очередь, разделена на общие затраты, а также затраты как зависящие, так и не зависящие от числа подготовок и запусков ракет-носителей (РКН), космических аппаратов (КА), разгонных блоков (РБ), числа используемых при этом элементов инфраструктуры РКК для хранения, транспортировки и технического обслуживания образцов космической техники [1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13].

Группа временных ресурсов в зависимости от последствий НШС и источников восполнения резервов времени может быть разделена на обесценивающие, частично обесценивающие и не обесценивающие ресурсы [5, 6].

Исследования показывают [1, 3, 5, 6], что успешное решение задач по управлению, использованию и восполнению различных групп ресурсов существенным образом зависит от потенциальных опасностей (угроз), способных реализоваться на различных стадиях жизненного цикла конкретного типа РКК

и его составных частей. Потенциальные опасности в процессе создания (модернизации), эксплуатации и утилизации образцов космической техники и объектов инфраструктуры характеризуются понятием риска [9, 10, 11, 12].

Многообразие рисков классифицируем на следующие группы: технические, финансовые, ответственности, экологические, политические. При этом каждая из указанных групп рисков характеризуется вероятностью возникновения НШС, способных привести к происшествиям, видом ущерба (нанесенного вреда) и размером данного вида ущерба [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Определение достоверных оценок количественных показателей различных видов рисков, особенно в условиях неполной информации, например, при отсутствии результатов летных испытаний и эксплуатации нового изделия РКК в реальных условиях, является предметом самостоятельных исследований применительно к конкретному типу РКК. Поэтому для оценки рисков возникновения происшествий на РКК в процессе создания и эксплуатации должна использоваться любая информация, способная оказать существенное влияние на количественные значения получаемых оценок рисков, в частности, информация об изделиях-аналогах, используемых в РКК.

Технико-экономические методы обеспечения безопасности и предупреждения происшествий ракетно-космического комплекса

Типовые характеристики рисков для различных стадий и этапов жизненного цикла РКК различного целевого назначения представлены в таблице [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Ниже рассмотрим модели некоторых видов ресурсов, которые целесообразно использовать при проведении технико-экономических расчетов для решения многообразных задач обеспечения безопасности системы «персонал-ракетно-космический комплекс-среда».

1) Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала в общем случае может быть использована следующая агрегированная модель технико-экономических затрат:

$$C_{\text{пер}}^{\text{Б}} = \alpha_1 * C_{\text{сз}}^{\text{И}} + \alpha_2 * C_{\text{сз}}^{\text{К}} + \alpha_3 * C_{\text{тр}} + \alpha_4 * C_{\text{об}} + \alpha_5 * C_{\text{нс}} + \alpha_6 * C_{\text{кат}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{сз}}^{\text{И}}, C_{\text{сз}}^{\text{К}}$ – затраты на создание и эксплуатацию средств индивидуальной и коллективной защиты персонала соответственно;

$C_{\text{тр}}$ – затраты на создание и использование учебно-тренировочных средств;

$C_{\text{об}}$ – стоимость обучения (при необходимости переподготовки) при освоении технологий безопасного выполнения опасных и особо ответственных операций;

$C_{\text{нс}}$ – затраты на лечение персонала при несчастных случаях;

$C_{\text{кат}}$ – затраты, связанные с необходимостью выплаты страховых сумм и организации похорон в случае гибели персонала;

$\alpha_i, i = \overline{1,6}$ – некоторые эмпирические коэффициенты, определяемые применительно к конкретному типу РКК и зависящие, в частности, от количества обслуживающего персонала, количества выполняемых опасных и особо опасных операций, наличия различных видов источников опасности и др.

2) В соответствии с типовой технической структурой РКК, а также с учетом стадий и этапов жизненного цикла образцов космического сегмента и объектов наземной инфраструктуры, входящих в состав РКК i -го типа, суммарные затраты, необходимые для обеспечения безопасности, могут быть оценены с использованием следующей агрегированной модели:

$$C_{\text{РКК}}^i = \frac{C_{\text{ОКР}}^{\text{КА}}}{N_{\text{КА}}^s} + \frac{C_{\text{ОКР}}^{\text{РН}}}{N_{\text{РН}}^l} + \frac{C_{\text{ОКР}}^{\text{РБ}}}{N_{\text{РБ}}^k} + \frac{C_{\text{ОКР}}^{\text{ТО}}}{N_{\text{ТО}}^m} + \left\{ n_j (\beta_1 C_{\text{СК}}^i + \beta_2 C_{\text{ТК}}^i + \beta_3 C_{\text{ЗНС}}^i + \beta_4 C_{\text{НБЭ}}^i + \beta_5 C_{\text{КИК}}^i) \right\} \times (t_{\text{НЭ}}^i - t_0), \quad (2)$$

где $C_{\text{ОКР}}^{\text{КА}}, C_{\text{ОКР}}^{\text{РБ}}, C_{\text{ОКР}}^{\text{РН}}, C_{\text{ОКР}}^{\text{ТО}}$ – соответственно долевыe затраты на обеспечение безопасности КА, РКН, РБ, технологического оборудования (на реализацию мероприятий ПОБ) при проведении ОКР;

$N_{\text{КА}}^s, N_{\text{РН}}^l, N_{\text{РБ}}^k, N_{\text{ТО}}^m$ – планируемое количество изготавливаемых КА, РКН, РБ, комплектов технологического оборудования соответствующего типа за весь период эксплуатации;

$C_{\text{СК}}^i, C_{\text{ТК}}^i, C_{\text{ЗНС}}^i, C_{\text{НБЭ}}^i, C_{\text{КИК}}^i$ – соответственно долевыe затраты, необходимые на обеспечение безопасности эксплуатации СК, ТК, ЗНС, объектов наземной базы эксплуатации (монтажно-испытательных корпусов, хранилищ РКН, РБ, КА, сооружений системы сжатых газов, пиротехнических средств, средств поддержания температурно-влажностного режима, объектов гостехнадзора и др.), а также затраты на обеспечение безопасности измерительных средств КИК;

n_j – число планируемых к запуску РКН (РБ), КА j -го типа;

$\beta_d, d = \overline{1,5}$ – весовые коэффициенты, учитывающие степень сложности и количество опасных и особо опасных операций выполняемых технологических процессов;

$t_{\text{НЭ}}^i$ – год, на который проводится прогноз стоимости эксплуатации;

t_0 – базовый срок, к которому соотносятся инфляционные процессы.

Поэлементная оценка затрат, входящих в выражение (2), может быть получена путем модификации соответствующих моделей, приведенных в работах [5, 6, 13].

Таблица.

Типовые характеристики рисков в процессе создания и эксплуатации РКК

Стадии (этапы жизненного цикла)	Характеристика рисков		
	Вид риска	Вероятность возникновения	Размер ущерба (вреда)
Проектирование	Несвоевременное окончание	~ 0,01–0,03 (в зависимости от сроков и ошибок проектирования)	Стоимость РКН, РБ, КА, их составляющих частей, элементов технологического оборудования, потеря престижа (заказа)
Наземно-экспериментальная отработка, в т. ч. исследование причин происшествий	Нарушения порядка, объемов, сроков испытаний	~ 0,05–0,3 (в зависимости от видов испытаний)	Стоимость проведения повторных испытаний, стоимость изделий при повторяющихся НШС (поломках, авариях)
Летные испытания	Авария РКН в полете	~ 0,001–0,99	Стоимость РКН, КА, РБ Стоимость восстановления ПУ, потеря престижа (заказа)
	Разрушение СК (ПУ) (авария, катастрофа)	~ 0,001–0,03	
Серийное производство	Нарушения порядка, объемов, сроков выполнения техпроцессов, нарушения требований конструкторской документации	~ 0,04–0,1 (в зависимости от уровня качества изготовления, видов дефектов)	Стоимость РКН, КА, РБ, их составных частей, технологического оборудования, потеря престижа (заказа)
Эксплуатация			
Транспортирование	Поломки (повреждения) РКН, РБ, КА, элементов оборудования	~ 0,001 – 0,007	Потеря РКН, РБ, КА авиаперевозках
	Проливы КРТ при ж/д перевозках	~ 0,00001 – 0,0001	До 30% от стоимости при ж/д перевозках

Стадии (этапы жизненного цикла)	Характеристика рисков		
	Вид риска	Вероятность возникновения	Размер ущерба (вреда)
Хранение	Поломки (повреждения) РКН, РБ, КА, оборудования;	~ 0,001–0,004	До 20 % от стоимости КА, РБ, РКН
	Поломки РКН, РБ, КА	~ 0,004–0,008	10–15 % от стоимости изделий
	Поломки объектов инфраструктуры	~ 0,001–0,005	Стоимость замены систем, узлов и агрегатов ТК, СК, ЗНС
	Нарушения технологической дисциплины л/с БР	~ 0,006–0,03	Стоимость ремонтно-восстановительных работ
Подготовка к запуску РКН, КА	Отмена запуска РКН, повторный цикл подготовки	~ 0,0001–0,0003	30–40 % от стоимости запуска РКН
	Авария РКН в начале полета	~ 0,026–0,6 (в зависимости от типа РКН)	Стоимость РКН, КА и подготовки к запуску
	Разрушение стартового комплекса (СК)	~ 0,001–0,005	80–90 % от стоимости сооружений, оборудования СК
Запуск РКН	Экологический ущерб, ущерб третьим лицам	~ 0,001–0,003	5–20 % стоимости пуска
	Ввод КА в летную эксплуатацию	~ 0,01–0,02	Стоимость РКН КА и подготовки к пуску
	Летная эксплуатация КА	~ 0,01–0,03	Стоимость неполученной информации
	Авария КА, использование КА с ограничениями по целевому назначению, отказ БА, снижение объема и качества выходного эффекта	~ 0,01–0,001 (в зависимости от типа КА)	Стоимость КА, неполученной информации, упущенная выгода

3) Затраты, необходимые для обеспечения экологической безопасности в процессе создания и эксплуатации РКК, в общем случае должны учитывать следующие основные составляющие:

$$C_{\text{ОПС}} = \frac{C_{\text{ОКР}}^{\text{СР}}}{N_{\text{СР}}^j} + K_{\text{Т}} \cdot C_{\text{РП}}^{\text{ОЧ}} + K_{\text{Т}} \cdot C_{\text{РП}}^{\text{АВ}} + j_1 \cdot C_{\text{ЭВ}} + j_2 \cdot C_{\text{ОИП}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{ОКР}}^{\text{СР}}$ – затраты на создание средств экологической защиты (в частности, средств экологического технического комплекса, средств мониторинга РП ОЧ, контроля ПДК и др. [10, 11]);

$N_{\text{СР}}^j$ – планируемое количество изготавливаемых средств экологической защиты j -го типа;

$C_{\text{РП}}^{\text{ОЧ}}, C_{\text{РП}}^{\text{АВ}}$ – затраты, необходимые на обеспечение экологической безопасности в РП ОЧ при проведении штатных запусков РКН и в случае возникновения аварий соответственно;

$K_{\text{Т}}$ – статистический коэффициент, учитывающий токсичность и (или) пожаровзрывобезопасность КРТ;

$C_{\text{ЭВ}}$ – затраты, необходимые для эвакуации населения;

$C_{\text{ОИП}}$ – затраты, необходимые для утилизации объектов искусственного происхождения («космического мусора»);

$j_{1,2}$ – весовые коэффициенты.

Следовательно, суммарные затраты, необходимые для обеспечения безопасности системы «персонал-РКК-среда», в общем случае могут быть оценены с использованием соотношений (1)–(3):

$$C_{\Sigma} = C_{\text{ПЕР}}^{\text{Б}} + C_{\text{РКК}}^i + C_{\text{ОПС}}. \quad (4)$$

Анализ соотношений (1)–(4) показывает, что величина C_{Σ} фактически представляет собой расширенный скаляр возможного ущерба (вреда) от происшествий на РКК и затрат, необходимых для их предупреждения.

На основании вышеизложенного, в общем случае задача обеспечения безопасности РКК с использованием технико-экономических показателей является многопараметрической с большим числом степеней свободы, требующая для своего решения значительного объема исходной информации.

В зависимости от целей исследования при выбранном критерии «эффективность-безопасность-стоимость» возможны различные варианты постановки задачи. При этом необходимо отметить, что частные критерии типа «безопасность-стоимость», «эффективность-безопасность» и т. д. обладают относительной самостоятельностью и могут использоваться при формулировке частных задач. Несмотря на указанные трудности, в случае, если в качестве обобщенного критерия выбрать критерий «эффективность-безопасность-стоимость», данная задача может быть сформулирована следующим образом.

В прямой постановке задача заключается в нахождении такого оптимального (квазиоптимального) решения, которое обеспечит максимальный уровень

эффективности, зависящий, в свою очередь, от уровня безопасности при фиксированных материальных и финансовых ресурсах, являющихся системой ограничений. Математическая постановка прямой задачи имеет вид:

$$W \rightarrow \max \left(W \left(P_{\text{РКК}}^{\text{Б}}, C_{\Sigma} \right) \right), C_{\Sigma} \left(\sum_{i=1}^I C_i \right) \leq C_{\Sigma}^{\text{зад}}, \quad (5)$$

$$p_i \in P$$

$$c_i \in C$$

где $W, P_{\text{РКК}}^{\text{Б}}, C_{\Sigma}$ – обобщенные показатели эффективности, безопасности и стоимости соответственно.

Обратная постановка задачи заключается в минимизации материальных и финансовых затрат на обеспечение безопасности при заданном уровне эффективности и безопасности:

$$C_{\Sigma} \rightarrow \min_{c_i \in C_{\Sigma}} C_{\Sigma} \left(\sum_{i=1}^I C_i \right), P_{\text{РКК}}^{\text{Б}} \leq P_{\text{РКК}}^{\text{Бзад}}, W \leq W_{\text{зад}}, \quad (6)$$

В общем случае задачи (5) и (6) оказываются достаточно сложными из-за большой размерности, недостаточного объема информации и иных причин. Поэтому их декомпозируют на ряд самостоятельных частных задач. Исследования показывают [1, 2, 3, 4, 5, 6, 16, 17, 18], что решение указанных задач в прямой и обратной постановках существуют и, кроме того, при выполнении определенных условий найденные решения являются эквивалентными. Применительно к задачам (5) и (6) с учетом их физического смысла таковыми условиями являются следующие.

Так, увеличение уровня безопасности, требующее повышения качества изготовления элементов РКК, внедрения принципиально новых технологий и т. п. приводит к увеличению их стоимости. При этом существует, по крайней мере, хотя бы один из параметров технического состояния, улучшение значений которого приводит к увеличению стоимости элемента или изделия в целом. Данные условия являются физической интерпретацией принципа двойственности, известного в математической теории исследования операций и теории оптимальных процессов, применительно к решаемым в диссертационной работе задачам.

Необходимо отметить, что в системе ограничений, используемой в постановке задач (5) и (6), кроме указанных ограничений, могут быть использованы дополнительные ограничения, связанные с необходимостью учета массово-энергетических характеристик, допусков на определяющие параметры технического состояния по прочности, температуре и т. п. Последнее обстоятельство обусловлено специфическими особенностями конкретных типов РКК, для которых проводится технико-экономическая оценка затрат по обеспечению их безопасности. В частности, в зависимости от конкретно решаемой задачи исследования физический смысл функции $W(P_{\text{РКК}}^{\text{Б}}, C_{\Sigma})$ может заключаться в эффективности решения задачи выведения КА на требуемую орбиту при заданной номенклатуре РКН, в получении выходного эффекта (дифференциаль-

ного или интегрального) с i -го КА, входящего в состав орбитальной группировки j -й космической системы (комплекса) и др.

Рассмотрим возможные пути решения сформулированной задачи (5). Решение задачи типа (6) может быть получено аналогичным образом.

Для удобства выполнения дальнейших формализованных процедур обозначим: $f(x) \stackrel{\text{def}}{=} -W(P_{\text{РКК}}^{\text{Б}}, C_{\Sigma})$; $g_1(x) \stackrel{\text{def}}{=} P_{\text{РКК}}^{\text{Бзад}} - P_{\text{РКК}}^{\text{Б}}$, $g_2(x) \stackrel{\text{def}}{=} C_{\Sigma}^{\text{зад}} - C_{\Sigma}$. Относительно функции $f(x)$ предположим, что $f(x) \in C^k(X)$, т. е. $f(x)$ непрерывна и k раз непрерывно дифференцируема на множестве $X \subset R^n$. Поскольку иных предположений относительно функции $f(x)$, ее структуры и системы ограничений больше не делается, то в классе оптимизационных задач исходная задача (5) записывается в виде:

$$\min_{x \in R^n} f(x), g_i(x) \geq 0, i = 1, 2. \quad (7)$$

Анализ особенностей задачи (7) показывает, что в контексте сформулированных задач (5) и (6) одним из эффективных путей ее решения является применение классических численно-аналитических методов оптимизации и, в частности, методов барьерных и штрафных функций [5, 6].

В соответствии с методом барьерных функций исходная экстремальная задача (7) путем параметризации сводится к задаче безусловной минимизации вида:

$$\min_{x \in R_n} B(x, \rho), \quad (8)$$

где $B(x, \rho) = f(x) + \Psi(x, \rho)$; $\Psi(x, \rho) \stackrel{\text{def}}{=} \rho \sum_{i=1}^m \Psi_i(g_i(x))$ – барьерная функция (ρ – число; $\Psi(\cdot)$ – скалярная функция, $\Psi_i \in C^1$). В качестве барьерных функций могут быть выбраны функции из класса обратных и логарифмических вида:

$$\Psi_i(g_i(x)) = \frac{1}{g_i(x)}; \Psi_i(g_i(x)) = -\ln(g_i(x)). \quad (9)$$

Из теории методов решения экстремальных задач для функции многих переменных типа (8) известны следующие основные условия существования решения [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]:

I. Если ограничения $g_i(x) \geq 0$ определяют замкнутое ограниченное множество Ω с непустой внутренностью $\overset{\circ}{\Omega}$, то функция неограниченно возрастает при приближении к границе $\partial\Omega$ и существует точка $x^* \in \overset{\circ}{\Omega}$:

$$R(x^*) = \min_{x \in \overset{\circ}{\Omega}} R(x). \quad (10)$$

II. При выполнении условий п. I и $\overset{\circ}{\Omega} = \Omega$ решение задачи (8) существует, а любая предельная точка x^* последовательности $\{x^{(k)}\}$ является решением задачи (7) при $\rho_k \rightarrow 0$ ($k \rightarrow \infty$).

III. Если выполнены условия п. II, то

$$\lim_{K \rightarrow \infty} B(x^{(K)}, \rho_K) = f(x^*), \quad (11)$$

где x^* – оптимальное решение задачи (7).

Условия I–III позволяют сформировать алгоритм решения задачи (7).

1) Выбрать последовательность $\rho_K \xrightarrow{K \rightarrow \infty} 0$ и определить точку $x^{(0)} \in \overset{\circ}{\Omega}$ для $k = 0$.

2) Положить $k = k + 1$.

3) Начиная из точки $x^{(k-1)}$, найти безусловный минимум $x^{(k)}$ для функции $B(x, \rho_k)$, т. е. решить задачу (8).

4) Выбрать критерий остановки итерационного процесса:

$$|f(x^{(k+1)}) - f(x^{(k)})| \leq \varepsilon, |x^{(k+1)} - x^{(k)}| < \delta. \quad (12)$$

5) Оценить отклонение от оптимального решения задачи (7). Данная оценка может быть найдена следующим образом:

$$f(x(\rho)) - f(x^*) = f'(x(\rho)) \cdot (x(\rho) - x^*) + \alpha |x(\rho) - x^*|. \quad (13)$$

Преимущества предложенного алгоритма для решения задачи (7) на основе метода барьерных функций заключается в том, что любая точка последовательности $\{x^{(k)}\}$ является допустимой с сохранением свойств устойчивости к ошибкам округления. При этом существует возможность в нахождении таких решений, для которых не выполняются условия регулярности при активных ограничениях, а также возможность оценки отклонений от оптимума и возможность оценки множителей Лагранжа в случае использования Ньютоновских процедур оптимизации по соотношению:

$$\lambda_i(\rho) = -\rho \frac{d\Psi_i(x(\rho))}{dg_i}. \quad (14)$$

Выражение (14) указывает на универсальность данного алгоритма с точки зрения применимости для широкого класса прикладных задач.

В качестве недостатков алгоритма следует признать необходимость многократного решения задачи безусловной минимизации типа (8), а также необходимость контроля при вычислениях значений функции $B(x, \rho)$, поскольку с уменьшением величины ρ данная функция приобретает овражную структуру. Для обратных и логарифмических барьерных функций вида (9) соответствующие оценки имеют вид:

$$|x(\rho) - x^*| = O(\rho^{1/2}); \quad |x(\rho) - x^*| = O(\rho). \quad (15)$$

Следовательно, в последнем случае можно принять $\rho_{k+1} = \rho_k/10$, а число ρ_1 выбрать так, чтобы функция $V(x, \rho_1)$ была отмасштабирована, т. е. числа $f(x^0)$ и $\rho_1 - \sum_{i=1}^m \Psi_i(g_i(x^0))$ должны быть одного порядка.

Пример

Рассмотрим модельную задачу оптимального выбора уровня безаварийности КА в процессе летной эксплуатации при ограничениях затрат на обеспечение безопасности.

Предположим, что $\lambda_{ав}$ – поток НШС, способных привести к аварии (полной или частичной потери выходного эффекта) после отделения КА от РКН, является пуассоновским потоком. Обозначим $T_{САС}$ – срок активного существования КА с произвольным характером выходного эффекта $И(T_{САС})$ (дифференциальным или интегральным). Пусть $C_{\Sigma}^{КА}$ – покупная стоимость КА; $C_{пар}$ – затраты на парирование НШС с помощью бортовых и наземных средств управления, включая стоимость возможной упущенной выгоды от недополучения специнформации; $t_{в}$ – среднее время восстановления работоспособности КА.

Пусть в общем случае покупная стоимость КА является функцией его безаварийности: $C_{\Sigma}^{КА} = f(\lambda_{ав})$. С учетом сделанных допущений эффективное время функционирования КА определяется по соотношению:

$$t_{эф} = T_{САС}(1 - \lambda_{ав} \cdot \tau_{в} \cdot k_{в}), \quad (16)$$

где $k_{в}$ – эмпирический коэффициент сложности восстановления работоспособности КА, зависящий, в частности, от числа привлекаемых бортовых и наземных средств управления, числа необходимых сеансов связи с КА, степени загрузки средств связи, обработки информации и т. п. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

В этом случае удельные затраты на обеспечение безаварийности КА могут быть оценены с использованием выражения:

$$C_{ав} = \{C_{\Sigma}^{КА}(\lambda_{ав}) + C_{пар} \cdot T_{САС}\} / t_{эф}. \quad (17)$$

Барьерную функцию вида (9) для зависимости $C_{\Sigma}^{КА}(\lambda_{ав})$ сконструируем следующим образом:

$$C_{\Sigma}^{КА}(\lambda_{ав}) = C_{КА} \left(1 + \frac{\rho}{\lambda_{ав}} \right), \quad (18)$$

где ρ – коэффициент барьерной функции;

$C_{КА}$ – себестоимость КА.

Следовательно, с учетом (18) выражение (17) преобразуется к виду:

$$C_{AB} \frac{(C_{KA} + C_{ПАР} T_{CAC}) \lambda_{ав} + C_{KA} \rho}{\lambda_{ав} T_{CAC} (1 - \lambda_{ав} \tau_B k_B)}. \quad (19)$$

Минимум функции (19) определим из условия:

$$\frac{\partial C_{AB}}{\partial \lambda_{ав}} = 0, \quad (20)$$

откуда после несложных преобразований находим

$$\lambda_{AB}^* = \frac{C_{KA} \rho}{C_{KA} + C_{ПАР} + T_{CAC}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{C_{KA} + C_{ПАР} \cdot T_{CAC}}{\tau_B k_B C_{KA} \rho}} \right). \quad (21)$$

Используя результаты работ [5, 6, 9, 12, 13], в качестве исходных данных примем следующее: $C_{KA} = 10^6$ у.е.; $C_{ПАР} = 10^5$ у. е.; $T_{CAC} = 1\,095$ сут.; $\rho = 10^{-5}$ у. е./сут.; $t_B = 30$ сут.; $K_B = 100$.

Элементарные расчеты дают следующий результат:

$$\lambda_{ав}^* = 45 \cdot 10^{-6}; R_{AB}^{*KA} = 0,048; C_{AB}^* = 25673,35 \text{ у. е.}; t_{эф}^* = 973,2 \text{ сут.}$$

Анализ полученных оценок показывает, что найденный оптимальный уровень безаварийности КА при ограничениях на САС КА и стоимостные показатели соответствует статистическим данным, приведенным в табл. Ужесточение требований по безаварийности КА за счет ограничений потока НШС $\lambda_{ав}$ примерно на порядок приведет к увеличению удельных затрат по обеспечению безопасности примерно на 35–40 %.

Обобщая полученные результаты, приведем номограмму, учитывающую взаимосвязь показателей эффективности, безопасности и стоимости (рис. 1).

В заключении отметим, что предложенный путь решения задач (5) и (6), по-видимому, не является единственным. Так, в случае если поиск оптимальных соотношений между показателями эффективности, безопасности и стоимости рассматривать как некоторую игровую задачу с непостоянной суммой («платой» за вред (ущерб) от происшествий) и возможным «торгом» между Заказчиком, собственником РКК (его составных частей) и потребителем результатов космической деятельности, то такая задача заключается в определении оптимальных стратегий для каждого из игроков. Эти стратегии в зависимости от принятых критериев могут быть оптимальными по Парето, оптимальными по Штакельбергу и др. [1, 2, 3, 4].

Другим направлением решения задач (5) и (6) является использование важных результатов, полученных в теории бифуркации и катастроф [5, 6]. Ниже покажем принципиальную возможность постановки и решения подобного класса задач.

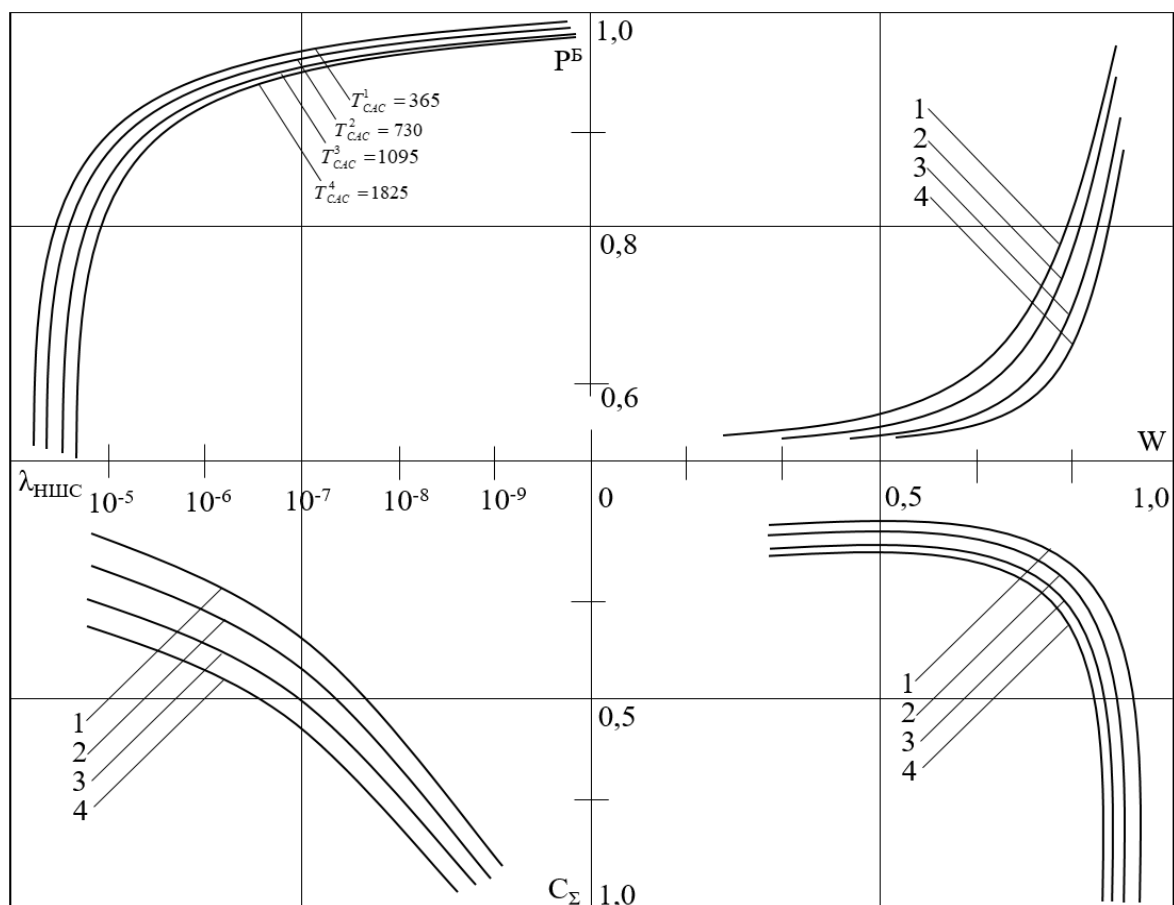


Рис. 1. Номограмма взаимосвязи показателей для критерия «эффективность-безопасность-стоимость»

Предположим, что Заказчик (инвестор), вкладывая денежные средства z_0 в некоторый космический проект (программу), рассчитывает получить доход в соответствии с процентом $\varepsilon(P_{PKK}^B)$:

$$z_{n+1} = (1 + \varepsilon)z_n = \dots = (1 + \varepsilon)^{n+1}z_0. \quad (22)$$

где n – характеризует количество сеансов связи с КА для получения специнформации в течение календарного периода, равного, например, одному году.

Однако вследствие возникающих происшествий (поломок, аварий) этот процент уменьшается пропорционально величине z_n : $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0(P_{PKK}^B)(1 - z_n / z_{\max})$. В этом случае выражение (22) преобразуется к виду:

$$z_{n+1} = \left[1 + \varepsilon_0 \left(1 - \frac{z_n}{z_{\max}} \right) \right] z_n. \quad (23)$$

Вводя в (23) обозначения $x_n \stackrel{def}{=} \frac{z_n \varepsilon_0}{z_{\max} (1 + \varepsilon_0)}$; $a \stackrel{def}{=} \frac{z_{\max} (1 + \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0}$, получим уравнение логистического типа:

$$x_{n+1} = f_a(x_n) = ax_n(1+x_n), \quad 0 \leq x_n \leq 1, \quad (24)$$

которое и является предметом дальнейших исследований.

Величина $f_a(x_n)$ достигает максимума при $x_n = \frac{1}{2}$, причем

$$f_a^{\max}(x_a) = \frac{a}{4}, \quad 1 \leq a \leq 4. \quad (25)$$

Стационарные состояния (24), т. е. значения к которым сходятся размеры будущих доходов, определяются как точки пересечения параболы $f_a(x_n)$ с прямой, проходящей через начало координат под углом 45° к горизонтальному направлению. Таких точек две: $x_n^* = 0$; $x_n^* = 1 - \frac{1}{a}$ (или $x_{n+1} = x_n = ax_n \cdot 1 - x_n$).

В общем случае стационарные состояния являются решениями уравнения $x_n = f_a(x_n)$ на сегменте $[0,1]$.

Следуя работам [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], можно показать, что уравнение (24) имеет особенности, связанные с возникновением каскадов бифуркаций и странных аттракторов при достижении параметром в (24) критических значений. На рис. 2, 3 показаны возможные сценарии изменения стационарных состояний и смены типов их устойчивости.

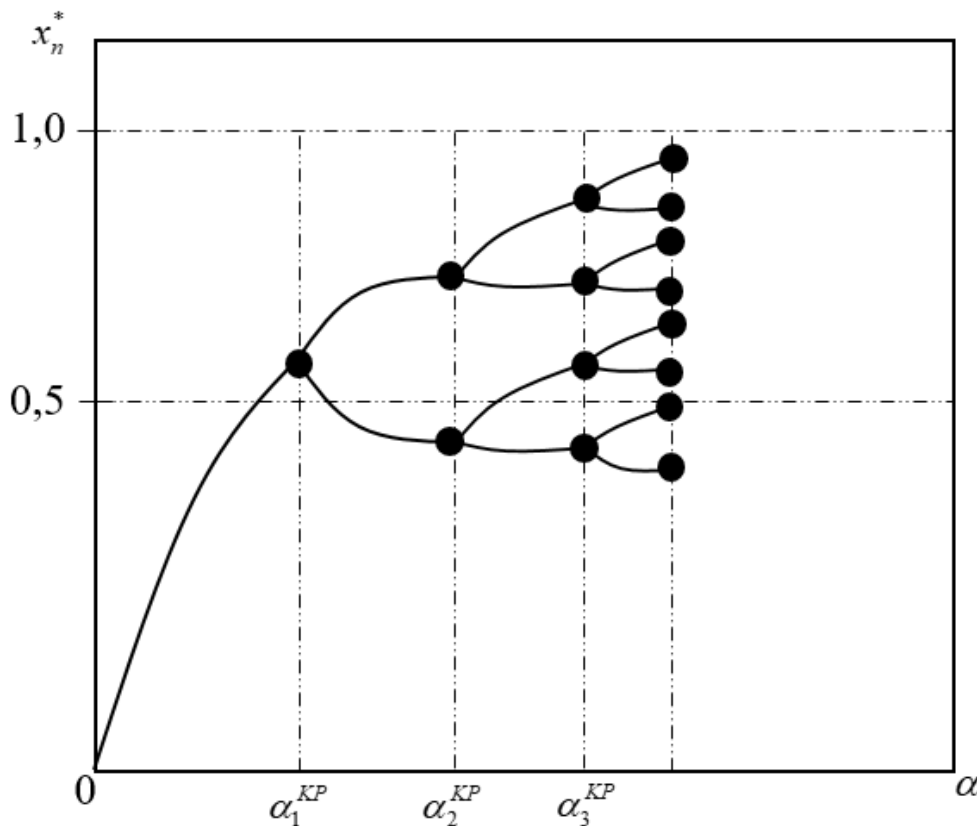


Рис. 2. Динамика изменения количества стационарных состояний от параметра уравнения (24)

Последовательность критических значений параметра a_i^{KP} , $i=1,2,\dots$ подчиняется двум универсальным постоянным Фейгенбаума [5, 8]: коэффициенту подобия $\mu = 1,50290787\dots$, задающему плотность критических точек x_n^* между двумя последовательными поколениями состояний, и коэффициенту сходимости $4,6692016091\dots$, задающему скорость сходимости критических значений с помощью рекуррентного соотношения:

$$\frac{a_n^{\text{KP}} - a_{n-1}^{\text{KP}}}{a_{n+1}^{\text{KP}} - a_n^{\text{KP}}} = \delta. \quad (26)$$

Указанные константы позволяют различать два принципиально различных динамических режима, порождаемых уравнением (24), а именно: бифуркационный режим и хаотический режим. Хаотический режим характеризуется периодическими циклами периода $K \cdot 2^n$. При этом исходное стационарное состояние x_n^* через каскад бифуркаций порождает гармоники периода 2^n ($a_\infty^{\text{KP}} = 3,57$ – точка накопления x_n^* в пространстве управляющего параметра a при $n \rightarrow \infty$).

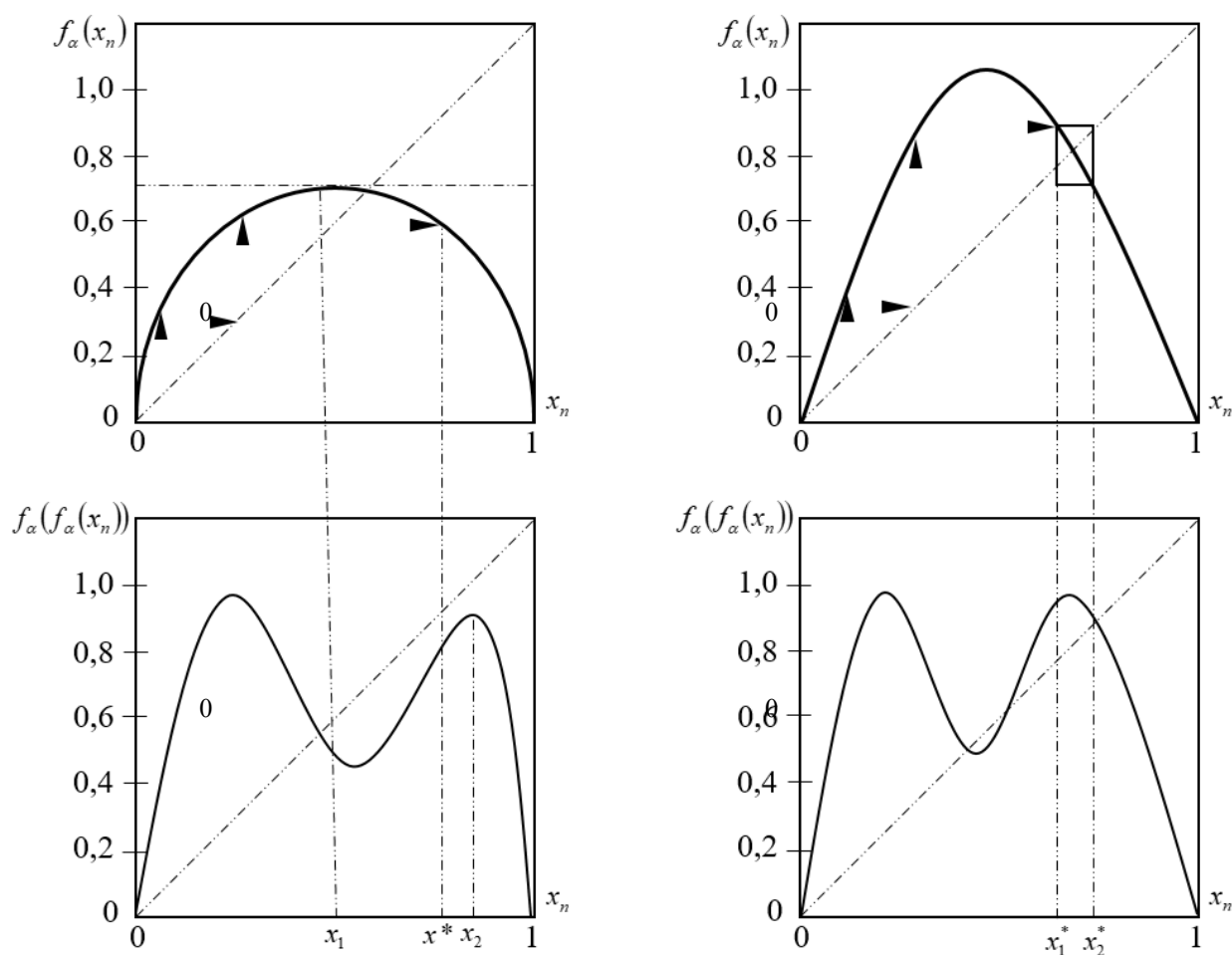


Рис. 3. Сценарии возникновения новых стационарных состояний для квадратичного отображения f_α ($f_\alpha(x_n)$) с предельным циклом периода 2

Физический смысл приведенных зависимостей заключается в том, что при достижении управляющего параметра критических значений величина x_n , характеризующая нормированную величину дохода в уравнении (24), стремится к некоторому устойчивому стационарному состоянию. При этом две соседние точки x_1 и x_2 на интервале $[0,1]$, взятые в качестве начальных условий, через небольшое количество итераций могут порождать различные траектории в динамическом поведении системы, что подтверждает высокую чувствительность уравнения (24) к флуктуациям как в начальных условиях, так и в управляющем параметре.

Указанные пути решения задач типа (5) и (6) с использованием элементов теории бифуркаций, несмотря на свою принципиальную возможность реализации, являются предметом дополнительных исследований.

Заключение

Разработаны агрегированные модели ресурсов, которые целесообразно использовать для оценки технико-экономических показателей безопасности не как самостоятельный инструмент, а в совместно с другими общепризнанными апробированными методическими аппаратами. Предложенные модели позволяют оценить долю затрат, необходимых для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, РКК и его составных частей, а также окружающей природной среды.

Решена задача оптимального выбора уровня безаварийности КА в процессе летной эксплуатации при ограничениях на обеспечение безопасности с использованием критерия «эффективность-безопасность-стоимость». Показано, что в случае использования обратной барьерной функции, зависящей от потока НШС, способных привести к аварийным ситуациям, ужесточение требований по безаварийности КА примерно на порядок приведет к увеличению удельных затрат по обеспечению безопасности примерно на 35–40 %.

Разработан метод рационального инвестирования программ обеспечения безопасности РКК и их составных частей, который заключается в оценке взаимосвязи ожидаемого дохода от реализации некоторого космического проекта, возможного ущерба от происшествий и стоимости мероприятий, включаемых в программу обеспечения безопасности ракетно-космического комплекса.

В отличие от известных технико-экономических методов, основанных, в частности, на оценке прямых затрат с применением калькуляционных схем, предложенный метод базируется на критериях целесообразности инвестирования программ обеспечения РКК с использованием либо принципа эквивалентности, либо принципа максимизации ожидаемой прибыли. В случае применения принципа эквивалентности, заключающегося в равнозначности ожидаемых доходов как при дополнительном инвестировании, так и без него, повышение требований к уровню безопасности на 1 % потребует примерно 1 % затрат от суммарной величины дохода и возможного ущерба (вреда), нанесенного в результате происшествий.

Научная значимость результатов работы заключается в дальнейшем развитии и совершенствовании элементов теории обеспечения безопасности космической деятельности в части обеспечения безопасности РКК на стадиях

их создания и эксплуатации. Получена номограмма взаимосвязи показателей для критерия «эффективность-безопасность-стоимость».

Литература

1. Береговой Г. Т., Тищенко А. Н., Шибанов Г. П., Ярополов В. И. Безопасность космических полетов. М.: Машиностроение, 1977.
2. Безопасность полетов летательных аппаратов. Методические основы // Под ред. А. И. Старикова. М.: Транспорт, 1988.
3. Бутковский А. Г. Фазовые портреты управляемых динамических систем. М.: Наука, 1985. (Теоретические основы технической кибернетики).
4. Васильев В. И., Гусев Ю. М. и др. Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987.
5. Великоиваненко В. И. Редукционно-диаграммный метод оценки динамических характеристик СУ ЛА при анализе аварийных ситуаций // Тезисы докладов НТК ЛИИ им. М. М. Громова. Предприятие п/я В-8759, октябрь, 1988.
6. Великоиваненко В. И., Кузьменко В. И., Лукьянчик В. В. Оценка уровня качества изготовления изделий по результатам эксплуатации // Метрология. № 6. М.: Изд-во стандартов, 1992.
7. Воробьев В. Г., Глухов В. В., Козлов Ю. В. и др. Диагностирование и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования // Под ред. И. М. Синдеева. М.: Транспорт, 1984.
8. Фролов А. Б. Модели и методы технической диагностики. М.: Знание, сер. «Математика и кибернетика», 1990. № 4.
9. Великоиваненко В. И., Мосягин В. Н., Ширшов В. Е., Шутов В. С. Основные проблемы обеспечения безопасности космической деятельности Российской Федерации // Доклад на XXXII Научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга, 16–19 сентября, 1997.
10. Великоиваненко В. И., Гусаков Н. В., Пантенков Д. Г., Соколов ВМ. Упрощенный алгоритм построения вероятностной модели оценки степени рисков инновационных проектов // Космическая техника и технологии. Июль-сентябрь 2014. № 3 (6). С. 81–89.
11. Д.Г. Пантенков «Итерационная модель оценки целесообразности проектирования космических аппаратов двойного назначения // Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов. Сборник научных трудов аспирантов и соискателей ученых степеней. Химки: ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина», 2011. Вып. 11. С. 25–40.
12. Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П. Марковская модель случайного процесса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12-1. С. 23–27.
13. Пантенков Д. Г., Литвиненко В. П. Оптимизация массогабаритных характеристик космических аппаратов двойного назначения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 7. С. 41–42.
14. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 360 с.
15. Баутин Н. Н., Леонтович Е. А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1990.
16. Басакер Р. Г., Саати Т. Л. Конечные графы и сети. М.: Наука, 1974. 366 с.

References

1. Beregovoy G. T., Tishchenko A. N., Shibanov G. P., Yaropolov V. I. Safety of space flights. Moscow: Mechanical Engineering, 1977.
2. The safety of the aircraft. Methodical bases / Ed. by A. I. Starikov. Moscow: Transport, 1988.
3. Butkovsky A. G. Phase portraits of controlled dynamical systems. M.: Science, 1985. (Theoretical foundations of technical Cybernetics).
4. Vasiliev V. I., Gusev Yu. M. and others. Multilevel control of dynamic objects. M.: Science, 1987.

5. Velikoivanenko V. I. Reduction-diagram method of estimation of dynamic characteristics of SU LA in the analysis of emergency situations // Abstracts of NTC LII named. M. M. Gromova. Enterprise p/I In-8759, October, 1988.
6. Velikoivanenko V. I., Kuzmenko V. I., Lukyanchik V. V. Assessment of the level of quality of production of products according to the results of operation // Metrology. № 6. Moscow: publishing House of standards, 1992.
7. Vorobiev V. G., Glukhov V. V., Kozlov Yu. V. Diagnosis and forecasting of the technical condition of aviation equipment // etc. Ed. I. M. Sindeev. Moscow: Transport, 1984.
8. Frolov A. B. Models and methods of technical diagnostics. M.: Knowledge, sir. "Mathematics and Cybernetics". 1990. № 4.
9. Velikoivanenko V. I., Mosyagin V. N., Shirshov V. E., Shutov V. S. The main problems of ensuring the safety of space activities of the Russian Federation. // Report on the XXXII Scientific readings devoted to the development of scientific heritage and development of K. E. Tsiolkovsky's ideas. Kaluga, 16–19 September, 1997.
10. Velikoivanenko V. I., Gusakov N. V., Pantenkov D. G., Sokolov V. M., A Simplified algorithm for constructing probabilistic models for the risk assessment of innovative projects // Space engineering and technology. July-September 2014. № 3 (6). Pp. 81–89.
11. Pantenkov D. G. Iterative model for the evaluation of appropriateness of designing spacecraft dual-purpose // Actual problems of designing of space systems and complexes. Collection of scientific works of graduate students and competitors of scientific degrees. Khimki: FGUP "NPO named S. A. Lavochkina, 2011. Iss. 11. Pp. 25–40.
12. Pantenkov D. G., Litvinenko V. P. Markov model of a random process // Bulletin of Voronezh state technical University. 2012. Vol. 8. No. 12-1. Pp. 23–27.
13. Pantenkov D. G., Litvinenko V. P. Optimization of weight and size characteristics of space vehicles of double purpose // Bulletin of Voronezh state technical University. 2011. Vol. 7. No. 7. Pp. 41–42.
14. Saati T. L. decision-Making with dependencies and feedbacks: Analytical networks. M.: Publishing house LKI, 2008. 360 p.
15. Bautin N. N., Leontovich E. A. Methods and techniques of qualitative study of dynamic systems on the plane. Moscow: Science, 1990
16. Busacker R. G., Saaty T. L. Finite graphs and networks. Moscow: Science, 1974. 366 p.

Пантенков

Дмитрий Геннадьевич

- кандидат технических наук, АО «Кронштадт», 115432, Российская Федерация, pantenkov88@mail.ru

Pantenkov Dmitrii

- Candidate of Engineering Sciences, JSC «Kronshtadt», 115432, Russian Federation, pantenkov88@mail.ru