



ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

**В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов,
В. Е. Новиков, В. А. Останин**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИННОВАЦИОННОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ

Представлена методология структурирования управления инновационным развитием сложных технических систем и предложены подходы к математическому моделированию типовых задач обоснования оптимальных решений в инновационном менеджменте.

Ключевые слова: *инновационный менеджмент; поддержка принятия решений; оптимизация; математическое моделирование.*

Особенностью инновационного развития технических систем является целенаправленность, проявляющаяся в том, что их зарождение, возникновение, становление и трансформация связаны с осмысленной деятельностью людей и направлены на удовлетворение непрерывно возрастающих потребностей общества. Ограниченность имеющихся ресурсов обуславливает необходимость оптимизационного подхода к формированию решений при управлении развитием указанных систем. Эффективным инструментом его реализации является моделирование. Рассмотрению методологических аспектов математического моделирования оптимизационных задач поддержки принятия решений в инновационном менеджменте посвящена настоящая работа.

Управление инновационным развитием представляет собой циклический процесс формирования и оказания управляющих воздействий, направленных на рациональное использование ресурсов в интересах удовлетворения потребностей в модернизации имеющихся технических систем и замене их более совершенными.

Структурно инновационное развитие технических систем как управляемого процесса может быть представлено в виде ориентированного графа (рис. 1) [1; 2]. В соответствии с ним в управлении инновационным развитием технических систем выделяются четыре стадии. Каждая из этих стадий, в свою очередь, разделена на четыре этапа, в которых отражено содержание задач:

1. Обоснование необходимости создания инновационных технических систем, принятие и реализация соответствующих решений.

1.1. Определение потребностей в результатах функционирования технических систем.

1.2. Выявление неудовлетворенных потребностей.

1.3. Определение принципиально неудовлетворимых существующими системами потребностей.



- 1.4. Установление наличия проблемной ситуации.
2. Оценка возможности создания требуемых систем, принятие и реализация соответствующих решений.
 - 2.1. Анализ научных основ разрешения выявленной проблемной ситуации.
 - 2.2. Анализ технических возможностей создания требуемых систем.
 - 2.3. Анализ экономических возможностей разработки и производства требуемых систем.
 - 2.4. Анализ наличия организационных основ разработки и производства требуемых систем.
3. Формирование и реализация решений по концептуальному облику инновационных технических систем.
 - 3.1. Определение целей, задач и условий применения перспективных систем.
 - 3.2. Определение структур систем.
 - 3.3. Определение технических требований к системам.
 - 3.4. Формирование технических заданий на реализацию требуемых систем.
4. Формирование и реализация решений по конструктивному облику, производству и применению систем.
 - 4.1. Проектирование и создание опытных образцов, их испытание и доработка.
 - 4.2. Формирование и реализация решений по созданию и опытной эксплуатации промышленных образцов.
 - 4.3. Формирование и реализация решений по созданию серийных образцов.
 - 4.4. Формирование и реализация решений по производству и применению систем.

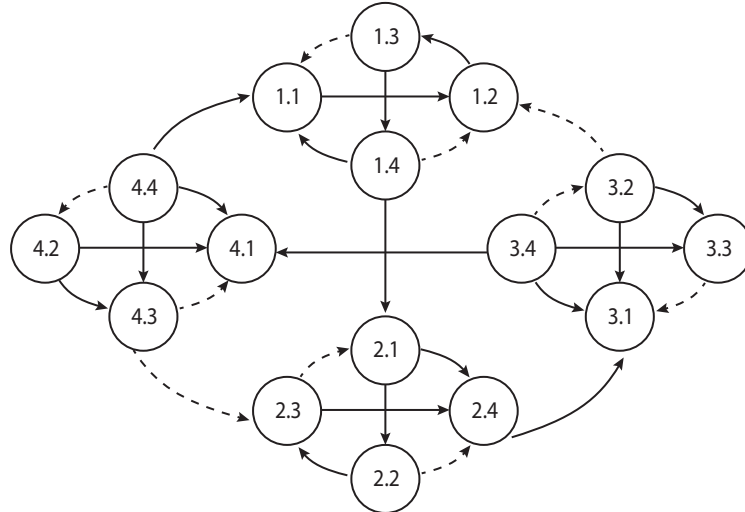


Рис. 1. Взаимосвязь задач управления инновационным развитием технических систем

Взаимосвязь задач, решаемых на каждой из выделенных стадий и этапов, отображена на рис. 1 ориентированными дугами графа. Причем сплошные линии отражают основные, а пунктирные – вспомогательные связи. Структура графа обусловлена присущим процессу инновационного развития диалектическим



единством и борьбой между необходимостью и возможностью, концепцией и конструктивным обликом перспективных систем. Она также отражает применяемый при управлении развитием сложных систем кибернетический принцип внешнего дополнения, проявляющийся в том, что разрешение противоречий двух последовательных стадий и этапов возможно только за счет возврата во внешние по отношению к ним предыдущие стадии и этапы.

Представленная структуризация отражает тот факт, что способы, сроки и последовательность решения тех или иных частных вопросов, связанных с инновационным развитием технических систем, должны подчиняться достижению общей цели – необходимому удовлетворению потребностей в таких системах. Она составляет основу системной декомпозиции процесса управления инновационным развитием. При этом обеспечивается достижение глобальной цели управления при сохранении достаточного разнообразия средств и способов решения каждой из частных задач.

Оптимизационные задачи в этой структуре характерны для формирования решений по концептуальному и конструктивному облику, производству и применению инновационных технических систем. Формализация этих задач предполагает [3; 4]:

- установление и представление в измеримой форме целей инновационного развития;
- формирование альтернативных вариантов соответствующих решений;
- сравнение их по степени достижения целей (по эффективности) и выбор целесообразного варианта.

Формирование решений в рамках изложенной структуры в общем случае может быть представлено отображением:

$$\theta_1: (R, Y, P, Z, T) \rightarrow V, \quad (1)$$

где R – множество ресурсов;

Y – множество параметров перспективных систем;

P – множество потребностей;

Z – множество целей, которые должны быть достигнуты;

T – множество моментов времени;

V – множество возможных (допустимых) вариантов решений.

Отображение (1) представляет собой алгоритм, который каждому набору условий ($r \in R, y \in Y, p \in P, z \in Z, t \in T$) ставит в соответствие некоторое решение $v \in V$ из множества V возможных (допустимых). Реализация этого решения приводит к некоторому результату, прогнозирование которого при выработке решения может быть в обобщенном виде представлено отображением:

$$\theta_2: (R, Y, P, T, V) \rightarrow S. \quad (2)$$

Отображение (2) представляет собой модель, связывающую вариант $v \in V$ решения с ожидаемыми результатами $s(t \geq t_0) \in S$ использования ресурсов $r \in R$ для создания перспективных систем с параметрами $y \in Y$, обеспечивающими удовлетворение потребностей $p \in P$. При этом качество выбранного варианта $v \in V$ определяется степенью достижения целей управления инновационным развитием.



Оценка качества в общем виде представляет собой отображение:

$$O_3: (R, Y, P, S, T, V) \rightarrow E, \quad (3)$$

где E – упорядоченное по степени предпочтения множество оценок достижения поставленных целей $z \in Z$.

В совокупности отображения (2) и (3) представляют собой модель для оценивания эффективности решений по концептуальному и конструктивному облику, производству и применению инновационных технических систем.

Процедура формирования отображения (3) формально сводится к проверке выполнения некоторых целевых соотношений следующего вида:

$$\left. \begin{array}{l} H(r, y, p, s, v, t) = 0, \\ G(r, y, p, s, v, t) \geq 0, \\ Q(r, y, p, s, v, t) \xrightarrow{v} \text{extr} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $H(\cdot)$ – вектор требований типа равенств;

$G(\cdot)$ – вектор требований типа неравенств;

$Q(\cdot)$ – вектор экстремальных требований.

Если условия (4) в принципе выполнимы, то добиться их реального выполнения можно только путем изменения s ($t \geq t_0$) $\in S$ за счет соответствующего подбора элементов решения $v \in V$.

Общая структура процесса формирования оптимальных решений по концептуальному и конструктивному облику, производству и применению инновационных технических систем может быть представлена в виде рис. 2.

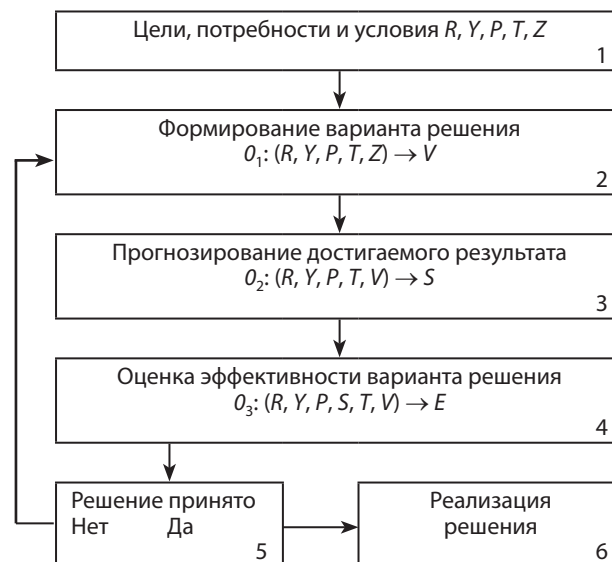


Рис. 2. Структура процесса принятия решений при управлении инновационным развитием



На рис. 2 блоки 1–4 отражают обобщенную структуру методики формирования решений по концептуальному и конструктивному облику, производству и применению рассматриваемых систем.

В рамках этой структуры задача формирования целесообразного варианта решения может быть формально представлена в виде следующей модели выбора [5; 6; 7]:

определить вариант решения

$$v^*(r, y, p, s, t_0) \in V, \quad (5)$$

для которого выполняется требование

$$Q(r, y, p, s, v, t) \xrightarrow{v} extr \quad (6)$$

при условиях

$$H(r, y, p, s, t) = 0, \quad (7)$$

$$G(r, y, p, s, t) \geq 0. \quad (8)$$

Формирование решений по концептуальному и конструктивному облику, производству и применению инновационных технических систем в виде соотношений (5)–(8) является обобщенным, но в то же время достаточно содержательным для классификации и выбора на этой основе математического аппарата моделирования и методов нахождения решений [8; 9]. В частности, в зависимости от размерности k_1 вектора $Q(\cdot)$ можно выделить балансные ($k_1 = 0$) и оптимизационные ($k_1 > 0$) модели. В балансных моделях оценивание эффективности не имеет большого значения, поскольку приемлемым считается любое решение, обеспечивающее баланс потребностей в изделиях (системах) и ресурсов для их создания. Если при этом ограничения на ресурсы не установлены, то задача вырождается в простейшую задачу формирования параметрического ряда систем.

В классе оптимизационных можно выделить однокритериальные ($k_1 = 1$) и многокритериальные ($k_1 > 1$) модели поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием.

В зависимости от размерностей k_2 и k_3 векторов $H(\cdot)$ и $G(\cdot)$ соответственно различают класс моделей безусловной оптимизации ($k_2 = k_3 = 0$) и класс моделей условной оптимизации ($k_2 + k_3 > 0$).

Размерность i вектора $r \in R$ ресурсов определяет классы однономенклатурных ($i = 1$) и многономенклатурных ($i > 1$) моделей.

Размерность n вектора Y параметров определяет классы однопараметрических ($n = 1$) и многопараметрических ($n > 1$) моделей.

При этом, если элементы множества Y являются подмножествами множества натуральных чисел, то модель (5)–(8) относится к классу задач целочисленной оптимизации.

В зависимости от учета или неучета параметров $t \in T$ различают динамические и статические модели.

По степени детерминированности элементов и связей в соотношениях (5)–(8) различают детерминированные модели, стохастические модели, а также модели выбора решений в условиях неопределенности.

Все указанные особенности находят отражение в средствах математического описания моделей и методах поиска решений. Многообразие таких моделей



и методов не позволяет охватить их в одной статье. Поэтому мы ограничимся рассмотрением типовых одноуровневых и многоуровневых задач стандартизации и унификации, наиболее часто встречающихся в практике принятия решений по концептуальному и конструктивному облику перспективных технических систем. При этом в качестве критерия оптимальности будем принимать минимальную стоимость разработки, производства и применения инновационных систем.

Одноуровневые оптимизационные задачи стандартизации и унификации формально сводятся к следующей модели.

Имеется исходное множество $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, m\}$ возможных типов инновационных технических систем (изделий), причем $m > 2$, и задано множество $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ видов потребностей, которые необходимо обеспечить, т. е. поставить в соответствие изделиями из множества I .

Известны начальные затраты C_i^0 на разработку изделия i -го типа ($i \in I$) и затраты c_{ij} , связанные с удовлетворением потребности j -го вида с помощью изделия i -го типа ($i \in I, j \in J$) (расходы на производство и эксплуатацию).

Пусть подмножество $\omega \subseteq I$ ($\omega \neq \emptyset$) представляет собой некоторый вариант совокупности используемых изделий. Для каждого $\omega \subseteq I$ определен план $x = \|x_{ij}\|$ распределения изделий по заданному множеству J . Будем полагать, что для удовлетворения одной потребности необходимо лишь одно изделие приемлемого типа, причем $x_{ij} = 1$, если i -й тип изделия $i \in \omega$ используется для удовлетворения j -й ($j \in J$) потребности, и $x_{ij} = 0$ – в противном случае.

Пусть функция $f(\omega, x)$, определяемая для всех $\omega \subseteq I$ и $x = \|x_{ij}\|$, равна величине суммарных затрат, связанных с разработкой и использованием изделий, соответствующих множеству $\omega \subseteq I$ и плану x их распределения;

$W(\omega, x)$ – величина показателя эффективности системы, характеризуемой некоторым вариантом состава рассматриваемых изделий ($\omega \subseteq I$) при соответствующем плане $x = \|x_{ij}\|$ их распределения;

W_d – заданная величина, определяющая минимально допустимый уровень показателя эффективности системы.

С учетом введенных обозначений математическая модель задачи оптимизации состава изделий может быть сформулирована следующим образом:

определить ω^*, x^* такие, что

$$f(\omega^*, x^*) = \min_{\omega, x} f(\omega, x), \quad (9)$$

где x^* задано ограничениями:

$$\sum_{i \in \omega} x_{ij} = 1, \quad j \in J, \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0 \cup 1, \quad i \in \omega, \quad j \in J, \quad (11)$$

$$W(\omega^*, x^*) \leq W_d. \quad (12)$$

Модель (9)–(12) соответствует случаю, когда все изделия разрабатываются независимо (начальные затраты аддитивны) и из любого допустимого подмножества $\omega \subseteq I$ для удовлетворения каждого j -го вида потребностей назначается изделие $i \in \omega$, требующее для этого минимальных затрат.

Для сложных иерархических систем оптимальная проектная компоновка из стандартных элементов и унифицированных модулей может быть формально



представлена в виде модели *многоуровневой стандартизации*. Она формулируется следующим образом.

Имеется множество X вариантов инновационных систем, предназначенных для непосредственного удовлетворения спроса. Они представляют собой технические системы различных типов и вариантов исполнения (типоразмеров). Назовем их основными изделиями или изделиями верхнего (первого) уровня. Составляющие их изделия (комплектующие) распределены по уровням таким образом, что изделия нижних уровней могут использоваться для построения изделий более высоких уровней. Необходимо определить рациональную с технической и экономической точек зрения номенклатуру инновационных систем и комплектующих изделий при условии полного удовлетворения спроса.

В формализованном виде модель может быть представлена следующим образом:

1. Задано множество $X = \{x_{ij}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}\}$ инновационных систем, включающее M типов изделий, предназначенных для удовлетворения спроса (1, 2, ..., i , ..., M)-го типа. Каждому i -му типу изделий соответствуют типоразмеры 1, 2, ..., j , ..., N . Значения их основных параметров составляют i -й параметрический ряд основных изделий, в котором j -й типоразмер может заменить типоразмеры 1, 2, ..., $j - 1$. Элементы x_{ij} множества X упорядочены в виде матрицы $\|x_{ij}\|_{M \times N}$, где $x_{ij} > 0$ – количество j -х типоразмеров в i -м параметрическом ряду.

2. Установлено множество $Y = \{y_{pq}, p = \overline{1, K}, q = \overline{1, L}\}$ комплектующих изделий, включающее K типов составных частей, предназначенных для комплектования изделий верхних уровней изделиями (1, 2, ..., p , ..., K)-го типа. Каждому p -му типу комплектующего изделия соответствуют типоразмеры 1, 2, ..., q , ..., L . Значения их основных параметров составляют p -й параметрический ряд комплектующих изделий, в котором q -й типоразмер может заменить типоразмеры 1, 2, ..., $q - 1$. Элементы y_{pq} множества Y упорядочены в виде матрицы $\|y_{pq}\|_{K \times L}$, где $y_{pq} \geq 0$ – количество q -х типоразмеров в p -м параметрическом ряду.

3. Заданы: множество $\{1, 2, \dots, z, \dots, Z\}$ видов спроса, которые необходимо обеспечить изделиями множества X ; объемы $R = \{r_1, r_2, \dots, r_z, \dots, r_Z\}$ спроса каждого вида.

Количество j -х типоразмеров из i -го параметрического ряда, используемых для обеспечения единицы спроса вида z , задается с помощью коэффициента кратности применения $w_{ijz} > 0$. Величина $x_{ijz} = w_{ijz} r_z$ определяет общее количество j -х типоразмеров из i -го параметрического ряда, используемых для удовлетворения спроса

вида z , а величина $x_{ijz} = \sum_{z=1}^z w_{ijz} r_z$ – общего объема спроса, определяемого множеством R .

Возможность комплектации определяется коэффициентом кратной совместимости $w_{pq}(\mu, \nu)$, где $w_{pq}(\mu, \nu) > 0$ – количество q -х типоразмеров из p -го параметрического ряда, необходимых для комплектации ν -го типоразмера из μ -го параметрического ряда. При этом величины μ, ν могут принимать значения $\mu = 1, 2, \dots, i, \dots, M, \nu = 1, 2, \dots, j, \dots, N$, если комплектуется основное изделие; $\mu = 1, 2, \dots, p - 1, \nu = 1, 2, \dots, q, \dots, L$, если комплектуется составная часть. С учетом указанных допущений и обозначений модель многоуровневой стандартизации для обоснования решений по концептуальному и конструктивному облику перспективных технических систем может быть представлена в следующем виде.



Определить векторы $X^* = \|x_{ij}^*\|$, $Y^* = \|y_{pq}^*\|$, обеспечивающие выполнение требования:

$$C(X^*, Y^*) = \min_{x_{ij} y_{pq}} \sum_{x_{ij} \in X} U_{ij}(x_{ij}) + \sum_{y_{pq} \in Y} V_{pq}(y_{pq}) \quad (13)$$

при условиях:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} / \omega_{ijz} = r_z, z = \overline{1, Z}; \quad (14)$$

$$\sum_{\gamma=1}^N x_{ij} \geq \sum_{j=\gamma}^N x_{ijz}, \gamma = \overline{1, N}, i = \overline{1, M}; \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^N sqn x_{ij} \leq N_i, N_i \leq N, i = \overline{1, M}; \quad (16)$$

$$\sum_{q=\delta}^L sqn y_{pq} \geq \sum_{q=\delta}^L \left[\sum_{\mu=1}^M \sum_{v=1}^M \omega_{pq}(\mu, v) + \sum_{\mu=1}^{p-1} \sum_{v=1}^L \omega_{pq}(\mu, v) y_{\mu v} \right], \delta = \overline{1, L}, p = \overline{1, K}; \quad (17)$$

$$\sum_{q=1}^L sqn y_{pq} \leq L_p, L_p \leq L, p = \overline{1, K}; \quad (18)$$

$$\sum_{q=q_1+1 \leq q_2}^{q_2} y_{pq} \geq \sum_{\mu=1}^M \omega_{pq_2}(\mu, j_2) \sum_{v=j_1+1 \leq j_2}^{j_2} x_{\mu v z} + \sum_{\mu=1}^{p-1} \omega_{pq_2}(\mu, q_4) \sum_{v=q_3+1 \leq q_4}^{q_4} y_{\mu v}, p = \overline{1, K}, \quad (19)$$

где $U_{ij}(x_{ij})$, $V_{pq}(y_{pq})$ – функции, характеризующие затраты, связанные с разработкой, производством и эксплуатацией j -го типоразмера из i -го параметрического ряда и q -го типоразмера из p -го параметрического ряда соответственно:

$$U_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{ij} = 0; \\ U_{ij}^0 + U_{ij} x_{ij}, & \text{если } x_{ij} > 0; \end{cases} \quad V_{ij}(y_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{pq} = 0; \\ V_{pq}^0 + V_{pq} y_{pq}, & \text{если } y_{pq} > 0, \end{cases}$$

в которых величины U_{ij}^0 , U_{ij} , V_{pq}^0 , V_{pq} – не убывают с ростом i, j и p, q ;

N_i, L_p – ограничения на количество элементов i -го, p -го параметрических рядов соответственно;

$(j_1 = 0, 1, \dots, j, \dots, N_i - 1, j_2 = 1, 2, \dots, j, \dots, N_i)$, $(q_1 = 0, 1, \dots, q, \dots, L_p - 1, q_2 = 1, 2, \dots, q, \dots, L_p)$, $(q_3 = 0, 1, \dots, q, \dots, L_\mu - 1, q_4 = 1, 2, \dots, q, \dots, L_\mu)$, – фиксированные номера следующих друг за другом типоразмеров, включенных в i -, p -, μ -й параметрические ряды соответственно.

Условия (14), (19) обеспечивают достаточность производства основных изделий и их составных частей для выполнения всех задач в комплектации изделий верхних уровней элементами нижних уровней соответственно.

Ограничения (15), (17) являются условиями достаточности основных изделий и составных частей для проведения замен внутри соответствующих рядов, ограничения на длину которых задаются с помощью условий (18), (19).

В целом представленная методология структурирования управления инновационным развитием сложных технических систем и предлагаемые подходы к моделированию типовых задач составляют основу формирования конкретных методик обоснования оптимальных решений в инновационном менеджменте.



Использованные источники

1. *Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Кежаев В. А., Свертилов Н. И., Шатохин Д. В.* Методы и модели стандартизации и унификации в управлении развитием военно-технических систем. М.: Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, 2004. 279 с.
2. *Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г.* Формальная структура задач стандартизации и унификации при управлении развитием сложных технических систем // Защита и безопасность. 2004. № 4. С. 26–31.
3. *Ведерников Ю. В., Гарькушев А. Ю., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Сазыкин А. М.* Модели и алгоритмы интеллектуализации автоматизированного управления диверсификацией деятельности промышленного предприятия // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2014. № 5–6. С. 61–72.
4. *Юрьев В. Н., Ильин И. В., Левина А. И.* Модели и методы системы управления инновационно-промышленным кластером // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2012. № 4 (151). С. 198–206.
5. *Авдеев М. М., Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Мартыщенко Л. А., Шатохин Д. В.* Информационно-статистические методы в управлении микроэкономическими системами / Международная академия информатизации. СПб.; Тула, 2001. 139 с.
6. *Anisimov V., Anisimov E., Sonkin M.* A resource-and-time method to optimize the performance of several interrelated operations // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 17. Р. 38127–38132.
7. *Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Тебекин А. В.* Нелинейная модель оптимизации параметрических рядов в системах управления // Вестник Российской таможенной академии. 2015. № 3. С. 115–122.
8. *Астанков А. А., Симонова М. А., Черных А. К.* О прогнозировании эффективности применения инновационных технических решений и технологий в интересах обеспечения безопасности на транспорте // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России: научно-аналитический журнал. 2015. № 3. С. 25–31.
9. *Анисимов В. Г., Анисимов Е. Г., Босов Д. Б.* Математические модели и методы управления инновационными проектами / Министерство образования и науки РФ, Институт современной экономики. М., 2009. 188 с.