УДК 621.002.56

В. Т. МАРЧЕНКО[1], Н. П. САЗИНА[1], П. П. ХОРОЛЬСКИЙ[1], А. А. ВОЗНЕНКО[2]

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОЖИДАЕМЫХ ЗАТРАТ НА СОЗДАНИЕ НОВОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

[1] Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail:office.itm@nas.gov.ua
[2] Министерство финансов Украины
ул. М. Грушевского, 12/201008, Киев, Украина; e-mail:infomf@minfin.gov.ua

Ракетно-космічна техніка – це технічно складні дорогі та унікальні технічні системи. На сьогодні рішення про доцільність реалізації проектів зі створення нової ракетно-космічної техніки приймаються на основі матеріалів фінансово-економічного обґрунтування з використанням критерію "вигоди–витрати" або "витрати–ефективність" при відсутності навіть грубих кількісних оцінок ризиків зростання витрат і зниження ефективності.

Наведений у статті методичний підхід є першим етапом створення математичного та алгоритмічного забезпечення розрахунку очікуваних техніко-економічних показників проектів зі створення нових зразків ракетно-космічної техніки з урахуванням ризиків.

У даній роботі запропонована економіко-математична модель розрахунку очікуваних витрат на створення нових зразків ракетно-космічної техніки та оцінки рівня ризику перевищення очікуваних витрат, а також збільшення тривалості дослідно-конструкторських робіт.

В основу математичної моделі покладено аналітичний зв’язок між необхідними тактико-технічними характеристиками нової техніки і її вартісними параметрами.

Для підвищення рівня формалізації метода розрахунку очікуваних витрат та оцінки рівня ризику їх перевищення, технічну структуру ракетно-космічної системи представлено у вигляді зваженого спрямованого деревовидного графа.

Вершинами такого графа є сама ракетно-космічна система (коренева вершина) та її складові частини. Ваги дуг графа являють собою кортеж техніко-економічних параметрів складової частини нижнього рівня, яка включається в найближчу вершину деревовидного графа.

Причиною можливого ризику збільшення очікуваних витрат та тривалості виконання дослідно-конструкторських робіт є невизначеність вихідних даних (змінні та параметри економіко-математичної моделі), що використовуються при розрахунку. Моделювання невизначеності даних виконано з використанням теорії нечітких множин: змінні та параметри моделі представлені у вигляді нечітких трикутних чисел.

Ракетно-космическая техника представляет собой технически сложные дорогостоящие и уникальные технические системы. На сегодняшний день решения о целесообразности реализации проектов по созданию новой ракетно-космической техники принимаются на основе материалов финансово-экономического обоснования с использованием критерия "выгоды–затраты" или "затраты–эффективность" при отсутствии даже грубых количественных оценок рисков роста затрат и снижения эффективности.

Приведенный в статье методический подход является первым этапом создания математического и алгоритмического обеспечения расчета ожидаемых технико-экономических показателей проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники с учетом рисков.

В данной работе предложена экономико-математическая модель расчета ожидаемых затрат на создание новых образцов ракетно-космической техники и оценки уровня риска превышения ожидаемых затрат, а также увеличения длительности опытно-конструкторских работ.

В основу математической модели положена аналитическая связь между требуемыми тактико-техническими характеристиками новой техники и ее стоимостными параметрами.

Для повышения уровня формализации метода расчета ожидаемых затрат и оценки уровня риска их превышения, техническая структура ракетно-космической системы представлена в виде взвешенного направленного древовидного графа.

Вершинами такого графа является сама ракетно-космическая система (корневая вершина) и ее составляющие части. Веса дуг графа представляют собой кортеж технико-экономических параметров составной части нижнего уровня, которая включается в ближайшую вершину древовидного графа.

Причиной возможного риска увеличения ожидаемых затрат на выполнение опытно-конструкторских работ и ее длительности является неопределенность используемых при расчете исходных данных (переменные и параметры экономико-математической модели). Моделирование неопределенности данных выполнено с использованием теории нечетких множеств: переменные и параметры модели представлены в виде нечетких треугольных чисел.

Rocket hardware represents technically complex expensive and unique engineering systems. At present, decisions on the advisability of implementation of new rocket hardware development projects are made based on financial feasibility study materials with the use of the benefit–cost or cost–efficiency criterion without even rough quantitative estimates of cost overrun or efficiency reduction risks.

The methodological approach presented in this paper is a first stage in the development of mathematical methods and algorithms for calculating the expected engineering and economical performance characteristics of new rocket hardware development projects with account for risks.

This paper proposes an econometric model for calculating the expected cost of new rocket hardware development and assessing the risk of cost overrun and delay in the development work.

The mathematical model is based on an analytical relationship between the required performance characteristics of a new rocket product and its cost parameters.

To make the expected cost calculation and cost overrun risk assessment method more formal, the technical structure of a rocket system is represented as a weighted directed tree graph. The graph vertices are the rocket system itself (the root vertex) and its components. The graph arc weights are a tuple of the engineering and economical performance characteristics of the lower-level component included in the nearest vertex of the tree graph.

The risk of expected cost overrun and delay in the development work is due to uncertainty in the input data used in the calculation (the variables and the parameters of the econometric model). The data uncertainty is modeled using the fuzzy set theory: the model variables and parameters are represented as fuzzy triangular numbers.

Ключевые слова: *ожидаемые затраты, технико-экономическое обоснование, космические системы.*

Ожидаемые затраты на реализацию научно-технического проекта (опытно-конструкторской работы) и прогнозируемый целевой эффект являются определяющими показателями при принятии решения для включения проекта в состав государственной целевой программы [1].

Применительно к производственно-техническим проектам задача расчета ожидаемых затрат является тривиальной, хотя и трудоемкой: расчет проводится по стандартным методикам, имеется полный набор отработанной конструкторской и технической документации, известна нормативно-техническая база (трудоемкость и материалоемкость) и технические характеристики конструкционных материалов, известен состав необходимого для изготовления производственного оборудования, состав и технические характеристики экспериментальной базы.

Научно-технические проекты относятся к инновационным, и расчет ожидаемых затрат на их реализацию проводится при отсутствии перечисленных исходных данных. Поэтому при технико-экономическом обосновании нового технического проекта в качестве исходных данных используются данные о ближайших аналогах. Такие данные обладают высоким уровнем неопределенности (полноты и достоверности данных по изделиям-аналогам и динамических показателей социально-экономической среды, в условиях которой выполнялась разработка изделия-аналога). Как следствие этого, результаты расчета ожидаемых затрат на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР) будут также обладать высокой степенью неопределенности, а значит, имеет место высокий уровень риска, который заключается в том, что фактические затраты на реализацию ОКР могут в несколько раз превышать ожидаемые затраты. В сфере создания новых образцов ракетно-космической техники это довольно частые явления.

Для принятия решения о включении научно-технического проекта, направленного на создание новых образцов ракетно-космической техники, в состав государственной целевой программы лицу, принимающему решение, должны быть представлены:

– номинальные (без учета рисков) затраты на реализацию научно-технического проекта (Z);

– уровень риска увеличения затрат по отношению к номинальным (U_z)

$$U_z = \langle \Delta Z, P(\Delta Z) \rangle,$$

где ΔZ – величина возможного отклонения фактических затрат на выполнение ОКР от номинального ожидаемого значения Z, $P(\Delta Z)$ – мера оценки возможности того, что фактические затраты не превзойдут величины $(Z + \Delta Z)$.

Постановка задачи. Требуется построить систему экономико-математических моделей, на основе которых может быть разработана инженерная методика расчета ожидаемых затрат на выполнение опытно-конструкторской работы по созданию новых образцов ракетно-космической техники. Обязательными компонентами расчета ожидаемых затрат должны быть уровни риска увеличения затрат на выполнение ОКР и длительности опытно-конструкторской работы. Эти показатели чрезвычайно важны при принятии решения по включению научно-технического проекта в государственную целевую программу. До настоящего времени такие параметры, как уровень риска роста затрат и срыва плановых сроков в процессе разработки технико-экономического обоснования научно-технических проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники, не оценивались.

Необходимость проведения расчетных оценок этих параметров подтверждается многочисленными реальными примерами. Следует сказать, что на практике фактические затраты могут превышать плановые в 1,5 – 3 раза.

Расчет уровня риска увеличения затрат на выполнение опытно-конструкторской работы по созданию новых образцов ракетно-космической техники представляет собой достаточно сложную инженерно-экономическую задачу. Особенно высокий уровень сложности этой задачи на предпроектной стадии, когда еще не определены проектно-конструкторские параметры будущего образца, а известны только желаемые основные тактико-технические характеристики $\{\tau_M\}$ и условия применения нового изделия (UP).

Как показывает практический опыт [2], стоимостная модель ОКР на предпроектной стадии представляет собой нелинейную систему экономико-математических уравнений, связывающих тактико-технические характеристики и условия применения со стоимостными параметрами.

Только по завершении эскизного проектирования, когда будут определены основные проектные и конструкторские параметры, система экономико-математических уравнений может быть линеаризована (за исключением уравнений, связывающих затраты с параметрами надежности).

Общий вид стоимостной модели ОКР можно представить как:

$$Z_{OKP} = f\,(\tau_1, \tau_2, ..., \tau_m, ..., \tau_M,\ P(UP)),$$

где Z_{OKP} – ожидаемые затраты на выполнение ОКР, $\tau_1, \tau_2, ..., \tau_m, ..., \tau_M$, – основные тактико-технические характеристики, $P(UP)$ – множество параметров внешней среды, в которой должна функционировать ракетно-космическая техника, и параметров технологии применения.

В основу экономико-математических моделей оценки затрат на выполнение ОКР новых образцов ракетно-космической техники положены особенности создания ракетно-космической техники, информационная база и имеющиеся наработки по теории рисков инновационных проектов.

Основными элементами информационной базы являются:

– требуемые тактико-технические характеристики вновь создаваемой технической системы (характеристики назначения и характеристики надежности), а также диапазон их значений;

– структурные характеристики ракетно-космической системы (схема деления до уровня подсистем и агрегатов составных изделий);

– типовой генеральный график создания ракетно-космической системы;

– тактико-технические характеристики и экономические показатели изделий-аналогов;

– параметры, характеризующие текущее состояние производственно-технологической базы, на которой должны изготавливаться изделия, входящие в состав ракетно-космической системы, и диапазон значений параметров;

– параметры, характеризующие текущее состояние экспериментальной базы для отработки изделий, входящих в состав ракетно-космической системы, и диапазон значений параметров.

Экономико-математическая модель затрат на реализацию ОКР. Процесс разработки ракетно-космической системы представляет собой множество взаимосвязанных процессов разработки ее составных частей (технических комплексов, технических изделий, систем, подсистем, агрегатов) и их интеграции в единое целое. Таким образом, структура экономико-математической модели зависит от типа и структуры ракетно-космической системы. С целью формирования общего подхода к построению экономико-математической модели выделим в ней типовые блоки, из которых может быть построена экономико-математическая модель затрат на реализацию ОКР для заданной технической структуры ракетно-космической системы.

Для реализации такого методического подхода представим дерево конечного продукта ОКР (ракетно-космической системы) в виде древовидного ориентированного и взвешенного графа:

$$G(V, W, E_V, E_W),$$

$$V = \left\langle V_0, V_1, V_{2,} \dots, V_N \right\rangle = \left\{ V_n \right\},\ n = \overline{0, N},$$

$$W = \left\langle W_0, W_1, W_{2,} \dots, W_S \right\rangle = \left\{ W_s \right\},\ s = \overline{1, S},$$

где $\left\{ V_n \right\}$(множество технических комплексов, входящих в состав ракетно-космической системы) и $\left\{ W_s \right\}$(множество технических изделий, входящих в ракетно-космическую систему) – множество вершин графа G, E_V – множество дуг, выходящих из вершин вида $\left\{ V_n \right\}$, E_W – множество дуг, выходящих из вершин вида $\left\{ W_s \right\}$.

$$E_V = \left\langle E_{V1}, E_{V2}, \dots, E_{VN} \right\rangle = \left\{ E_{Vn} \right\},\ E_{Vn} = \left\langle e_{Vnq1}, e_{Vnq2}, \dots, e_{Vqi} \right\rangle,$$

$$E_W = \left\langle E_{W1}, E_{W2}, \dots, E_{WS} \right\rangle = \left\{ E_{Ws} \right\},\ E_{Ws} = \left\langle e_{Wsp1}, e_{Wsp2}, \dots, e_{Wspj} \right\rangle,$$

где e_{Vnq1} – дуга, которая выходит из вершины V_n и входит в вершину V_{q1}; e_{Wsp1} – дуга, которая выходит из вершины W_s и входит в вершину W_{p1} или V_{p1}.

Для того чтобы можно было представить ракетно-космическую систему (РКС) в виде направленного древовидного графа, отобразим множество входящих в состав РКС технических комплексов* $\{K_n\}$ на множество вершин $V = \{V_n\}$ графа G, а множество изделий $I = \{I_s\}$ – на множество вершин $\{W_s\}$.

Ракетно-космическому комплексу, как и техническому комплексу внешнего уровня иерархии, ставится в соответствие вершина графа V_0, которая является корневой вершиной графа $G(V, W, E_V, E_W)$.

Если ракетно-космической системой является космическая система дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ), то КС ДЗЗ, как техническому комплексу наивысшего уровня иерархии, ставится в соответствие вершина V_0 графа G: КС ДЗЗ $\rightarrow V_0$.

Техническими комплексами в этом случае будут: орбитальный сегмент из нескольких космических аппаратов (КА), наземный комплекс управления (НКУ), наземный информационный комплекс (НИК), Центр управления полетом (ЦУП), система связи и передачи данных (ССПД) и т. д.

Изделиями высшего уровня иерархии $I^0 = \{I_k^0\}$ ($k = \overline{1, K}$) будут: антенные системы (НКУ и НИК), программно-технические комплексы (ЦУП и НИК), конкретные космические аппараты (находящиеся в орбитальном полете).

Изделиями более низких уровней будут: бортовые системы и подсистемы КА, двигатели-маховики, бортовые химические батареи, датчики угловой скорости и т. д.

Исходный граф $G(V, W, E_V, E_W)$ представим системой древовидных графов $G(V, W^0, E_V, E_W^0)$ и группы графов $G^0(W^0, W, E_W) = \{G_m^0(W_m^0, W, E_W)\}$, $(m = \overline{1, M})$.

В граф $G(V, W^0, E_V, E_W^0)$ входят только технические комплексы $\{V_n\}$ и технические изделия высшего уровня иерархии $\{I_k^0\}$, которые в данном графе будут листами (в эти вершины не входят дуги). Корневая вершина в этом графе – V_0. Для технических комплексов, входящих в этот граф, может быть построена типовая экономико-математическая модель затрат.

Множество графов $G_m^0(W_m^0, W_m, E_W)$ с корневым сегментом W_m^0 $(m = \overline{1, M})$ представляет собой граф дерева проекта входящих в состав РКС изделий высшего уровня иерархии.

Для графов вида $G_m^0(W_m^0, W_m, E_W)$ также может быть построена типовая экономико-математическая модель затрат.

---

* технический комплекс – техническая система, в состав которой входит не менее двух изделий из множества $\{I_k^0\}$

Таким образом, задача построения экономико-математической модели затрат на реализацию ОКР может быть сведена к построению двух видов математических моделей: для технических комплексов и технических изделий.

Экономико-математическая модель создания технических комплексов. Для технических комплексов K_q экономико-математическая модель затрат имеет достаточно простой вид:

$$Z_q = Z(K_q) + Z(EB_q)\,,\; Z(K_q) = \sum_{\alpha=1}^{\overline{q_\alpha}} Z(K_{q\alpha}) + \sum_{\beta=1}^{\overline{q_\beta}} Z(I^0_{q\beta}) + Z(TD_q)\,,$$

$$Z(TD_q) = \frac{1}{\overline{q_\alpha} + \overline{q_\beta}} \left(\sum_{\alpha=1}^{\overline{q_\alpha}} Z(TD_{q\alpha}) + \sum_{\beta=1}^{\overline{q_\beta}} Z(TD_{q\beta}) \right) \cdot (1 + \delta_{TD})\,, \qquad (1)$$

$$Z(EB_q) = \frac{1}{\overline{q_\alpha} + \overline{q_\beta}} \left(\sum_{\alpha=1}^{\overline{q_\alpha}} Z(EB_{q\alpha}) + \sum_{\beta=1}^{\overline{q_\beta}} Z(EB_{q\beta}) \right) \cdot (1 + \delta_{EB})\,,$$

$$Z_q(q=0) = Z(K_0) = \sum_{\alpha=1}^{Q_0} Z(K_{q\alpha}) \cdot (1 + \gamma_0 + \delta\gamma_0)\,,\; q = N - n\,,$$

где Z_q – затраты на создание и экспериментальную отработку q-го технического комплекса; $Z(K_q)$ – затраты на создание q-го технического комплекса; $Z(EB_q)$ – затраты на создание экспериментальной базы и проведение экспериментальной отработки q-го технического комплекса; $Z(K_{q\alpha})$ – затраты на создание технического комплекса $K_{q\alpha}$, входящего в состав технического комплекса K_q; $Z(I^0_{q\beta})$ – затраты на создание изделия I^0_β, входящего в q-й технический комплекс; $Z(TD_q)$ – затраты на разработку технической документации на изготовление и испытание q-го технического комплекса; $\overline{q_\alpha}$ – число технических комплексов, входящих в q-й технический комплекс; $\overline{q_\beta}$ – число изделий I^0_β, входящих в q-й технический комплекс; δ_{TD} – возможная вариация (отношение) затрат на разработку технической документации; δ_{EB} – возможная вариация затрат на создание экспериментальной базы; $Z_q(q_0) = Z(K_0)$ – затраты на создание и проведение летных испытаний ракетно-космической системы; Q_0 – число технических комплексов, входящих в ракетно-космическую систему; γ_0 – статистический коэффициент, определяющий уровень затрат на подготовку и проведение летных (межведомственных) испытаний; $\delta\gamma_0$ – возможная вариация параметра γ_0.

Система алгебраических уравнений (1) представляет собой рекурентные соотношения по параметру q $(q = \{N, N-1,...,1,0\})$.

Экономико-математическая модель затрат на создание технических изделий. Сложность разработки адекватной экономико-математической модели ожидаемых затрат на создание технических изделий (ракеты-носителя, разгонного блока, космического аппарата) заключается в нелинейной связи между требуемыми тактико-техническими характеристиками изделий, затратами на их создание и уникальностью конструкции ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов. Из-за уникальности конструкций этих изделий не может быть накоплена статистическая информация, на основании которой можно было бы построить статистические связи.

С целью упрощения экономико-математической модели, длительность проведения ОКР разбивается на отдельные интервалы (этапы), на которых параметры модели могут быть приняты постоянными, а следовательно, экономико-математическая модель будет сведена к системе алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами.

Изделия ракетно-космической техники (ракеты-носители, разгонные блоки, комплексные головные части, космические аппараты, наземные станции, ракетные двигатели и т. д.), являются сложными техническими системами, поэтому процесс расчета ожидаемых затрат на их создание может быть упрощен за счет применения теории графов. Это позволит выполнить декомпозицию сложной задачи на ряд относительно простых задач с последующей сборкой результатов решения этих задач.

Построим множество $I^0 = < I_1^0, I_2^0, ,..., I_M^0 > = \{I_m^0\}$, элементами которого являются технические изделия верхнего уровня (этот уровень обозначим символом "0"). Классификационным признаком изделия верхнего уровня является факт вхождения в состав технического комплекса $(I_{mq}^0 \subset K_q)$.

Каждому изделию верхнего уровня I_m^0 поставлен в соответствие направленный древовидный граф $G_m^0(W_m^0, W_m, E_{Wm})$, каждой вершине W_m соответствует техническое изделие I_m.

Каждому выходящему из вершины W_m ребру соответствует векторная весовая функция

$$\bar{a}_m = (a_{1m}, a_{2m}, a_{3m}, a_{4m}),$$

где W_m – множество вершин графа G_m^0; E_{Wm} – множество ребер, выходящих из вершин W_m; a_{1m} – значение коэффициента преемственности конструкции изделия I_m; a_{2m} – показатель относительной конструктивной сложности изделия I_m; a_{3m} – показатель относительной технической сложности изделия I_m; a_{4m} – показатель относительной технологической сложности изделия I_m.

Вершины графа, которые соответствуют покупным или заимствованным изделиям, являются "листьями" древовидного графа (эти вершины не имеют входных ребер). В частности, если в состав космической системы входит ранее разработанное изделие верхнего уровня, то граф этого изделия состоит из одной корневой вершины.

Для технических изделий, имеющих отечественный аналог, параметр $a_{2m} > 0$ $(0 < a_{2m} < 1)$, в то время, как для не имеющих отечественных аналогов изделий параметр $a_{2m} = 0$. Это обуславливает необходимость построения двух видов экономико-математических моделей затрат.

Ближайший аналог – отечественный образец. Экономико-математическая модель имеет следующий вид:

$$Z(I_m) = Z(I_m^a) \cdot K(t_0, t^a) \cdot \prod_{k=1}^{k_m} \left(\frac{\tau_k}{\tau_k^a} \right)^{\lambda_k^m},$$

$$Z(PD_m) = Z(I_m^a) \cdot \alpha_m^a \cdot k_\alpha(k_{Hm}, k_{TУm}) \cdot K(t^a, t_0),$$

$$Z(KTD_m) = Z(I_m^a) \cdot \beta_m^a \cdot k_\beta(k_{Hm}, k_{TУm}) \cdot K(t^a, t_0),$$

$$Z(EOH_m) = \eta_m(k_{Hm}, k_{TУm}) \cdot Z(EO_m^a) \cdot K(t^a, t_0) + Z(I_m^a) \cdot \gamma_m^a \cdot k(P_m),$$

$$k(P_m) = a_p \cdot \frac{\ln(1 - P_m)}{\ln(1 - P_m^a)},$$

$$Z(PP_m) = \theta_m(k_{Hm}, k_{TCm}) \cdot Z(PP_m^a) \cdot K(t_0, t^a),$$

$$Z(EB) = \vartheta_m(k_{Hm}, k_{TУm}) \cdot Z(EB_m^a) \cdot K(t_0, t^a), \qquad (2)$$

$$Z(I_m^a) = Z(I_m^{aф}) \cdot (1 + \varepsilon_m),$$

$$\varepsilon_m \in \left[-\varepsilon_m^{\max}, \varepsilon_m^{\max}\right], \ \varepsilon_m^{\max} = 1 - d_m,$$

$$Z(I_m^0) = \sum_{q=1}^{Q_n} Z(I_{mq}) \cdot (1 + \gamma_{mo}^a),$$

где $Z(I_m)$ – затраты на изготовление изделия I_m; $Z(I_m^a)$ – затраты на изготовление изделия-аналога I_m^a; $K(t_0, t^a)$ – коэффициент приведения затрат на изготовление изделия-аналога I_{nq}^a к моменту времени t_0, соответствующему началу ОКР; t^a, t_0 – время изготовления изделия-аналога I_m^a и начало ОКР соответственно; τ_k, τ_k^a – значение k-й технической характеристики нового изделия и изделия-аналога соответственно; $Z(PD_m)$ – затраты на разработку проектной документации (этапы эскизного проектирования и технического проектирования) изделия I_m; k_{Hm} – показатель уровня новизны конструкции, $k_{Hm} = 1 - a_{2m}$; $k_{TУm}$ – показатель относительного технического уровня новой конструкции; $Z(KTD_m)$ – затраты на разработку конструкторской и технологической документации для изготовления изделия

I_m; $Z(EOH_m)$ – затраты на изготовление экспериментального образца изделия I_m и его автономную наземную отработку; $Z(EO_m^a)$ – затраты на изготовление экспериментального образца изделия-аналога I_m^a; $k(P_m)$ – показатель увеличения затрат на автономную экспериментальную отработку изделия I_m в обеспечение повышения вероятности безотказной работы с уровня P_m^a до уровня P_m; P_m, P_m^a – уровень надежности нового изделия и изделия-аналога и соответственно; $Z(PP_m)$, $Z(PP_m^a)$ – затраты на проведение технологической подготовки производства в обеспечение изготовления опытного изделия и изделия аналога соответственно; k_{TCm} – показатель относительной технологической сложности изготовления новой конструкции; $Z(EB_m)$, $Z(EB_m^a)$ – затраты на создание экспериментальной базы для изготовления нового изделия и изделия-аналога соответственно; $Z(I_m^{аф})$ – фактические затраты на изготовление изделия-аналога I_m^a; ε_m – оценка относительной ошибки; d_m – уровень достоверности исходной информации по изделию-аналогу; $Z(I_m^0)$ – затраты на изготовление изделия I_m путем сборки входящих в него изделий I_{mq} и проведение заводских испытаний; λ_k^m – эмпирические коэффициенты, определяемые на основе экспертного анализа имеющейся ретроспективной информации по изделиям-аналогам; α_m^a, β_m^a, γ_m^a, η_m, θ_m, ϑ_m, γ_m^a, γ_{mo}^a, k_α, k_β, a_p – множество эмпирических параметров, которые относятся к нечетким числам.

Система алгебраических уравнений (2) определяет затраты на создание составной части изделия I_m^0, не имеющего отечественного аналога. Дальнейшие после решения системы (2) вычисления затрат на создание изделия I_m^0 проводится с использованием подхода, приведенного в соотношениях (1).

Ближайший аналог – зарубежный образец. Если ближайшим аналогом является зарубежный образец, то экономико-математическая модель имеет следующий вид:

$$St(I^*) = St(I)\cdot(1+\delta(I))\cdot(1-\alpha-\delta_\alpha)\cdot K(t,t_0),$$

$$Z(I^*) = (St(I^*)\cdot(\beta_1\cdot P_{ps}\cdot(1+h_1)+\beta_2)\cdot(1+h_2)\cdot(1+h_3)+$$
$$+\beta_3\cdot\mu_1\cdot(t+h_3)+\beta_3\cdot(1-\mu_1))\cdot\prod_{s=1}^{S}\left(\frac{\tau_s}{\tau_s^a}\right)^{\lambda_s}\cdot q_v(t_0),$$

$$Z(I) = Z(I^*)+\sum G_\tau,\; Z(PD) = \mu_2\cdot Z(I),$$

$$Z(KTD) = \mu_3\cdot Z(I),\; Z(EO) = \mu_4\cdot Z(I),$$

где $St(I^*)$ – приведенная к экономическим условиям Украины на момент t_0 стоимость зарубежного аналога; $St(I)$ – стоимость зарубежного изделия-аналога; $\delta(I)$ – уровень оценки достоверности информации о зарубежном аналоге; α – удельный вес материальных затрат; δ_α – возможная погрешность определения параметра α; α_1 – удельный вес приборов и узлов изделия-аналога, не имеющих аналогов в составе нового изделия I; $K(t, t_0)$ – коэффициент приведения стоимости зарубежного аналога к экономическим условиям Украины на момент t_0; $Z(I^*)$ – приведенные к экономическим условиям Украины ожидаемые затраты на изготовление изделия-аналога в Украине; β_1 – удельный вес оплаты труда при изготовлении зарубежного изделия-аналога; P_{ps} – паритет покупательной способности национальной валюты; h_1 – уровень налоговых отчислений от фонда заработной платы; β_2 – удельный вес амортизационных отчислений в стоимости изделия-аналога; h_1 – норматив плановой прибыли; h_3 – норматив налога на добавленную стоимость; β_3 – удельный вес материальных ресурсов в стоимости изделия-аналога; τ_s, τ_s^a – значение технической характеристики нового изделия и изделия-аналога соответственно; λ_s – эмпирические коэффициенты, определяемые на основе экспертного анализа имеющейся ретроспективной информации по изделиям-аналогам; $q_v(t_0)$ – валютный курс; $Z(I)$ – ожидаемая (прогнозная) стоимость изготовления нового изделия I на предприятиях Украины; $\sum G_\tau$ – ожидаемая стоимость аппаратуры и агрегатов отечественной разработки, входящих в состав изделия I; $Z(PD)$ – ожидаемые затраты на разработку проектной документации на изделие I; $Z(KTD)$ – ожидаемые затраты на разработку конструкторской и технологической документации на изготовление изделия I; μ_1, μ_2, μ_3, μ_4 – эмпирические коэффициенты; $Z(EO)$ – ожидаемые затраты на проведение наземной экспериментальной отработки нового изделия I.

Методический подход к определению степени риска опытно-конструкторских работ. Исходя из особенностей создания новых изделий ракетно-технической техники, определены следующие виды рисков:

– этап разработки:

1) увеличение затрат на выполнение ОКР (ΔZ_{OKP});

2) увеличение времени выполнения ОКР (ΔT_{OKP});

3) снижение значения технической эффективности нового образца до уровня ниже допустимого $(\Delta K_{TЭ})$;

– этап изготовления и эксплуатации:

1) снижение величины полезного эффекта от применения (эксплуатации) изделий новой техники (ΔP_E);

2) увеличение затрат на изготовление серийных образцов нового изделия (ΔI_S).

Основные факторы риска на этапе разработки:

– неопределенность (неполнота и неточность проектной информации) исходных данных об изделиях-аналогах, которые используются при проведении расчетов стоимостных показателей (ретроспективная неопределенность);

– уровень новизны конструкции и технологии изготовления проектируемого образца РКТ;

– уровень квалификации персонала разработчиков;

– текущее значение технических параметров производственно-технологической и экспериментальной базы;

– уровень надежности поставки необходимых материалов и комплектующих зарубежного производства и стабильность цен на них;

– неритмичность и нестабильность финансирования ОКР.

Основные факторы риска на этапе серийного производства и эксплуатации:

– неопределенность в прогнозной оценке потребностей рынка, уровня цен, технических возможностей стратегии и тактики конкурентов (перспективная неопределенность);

– уровень надежности поставки необходимых материалов и комплектующих зарубежного производства и стабильность цен на них;

– возможная инфляция;

– возможная девальвация национальной валюты;

– нестабильность системы налогообложения;

– возможное снижение профессионального уровня производственного персонала;

– возможная нестабильность политической и социально-экономической обстановки;

– непредсказуемые форс-мажорные обстоятельства.

В случае наличия отечественного изделия-аналога и обеспечения процесса изготовления опытного образца необходимыми материалами и комплектующими, риск снижения технической эффективности до неприемлемого уровня практически отсутствует.

Поэтому ниже рассматривается оценка риска увеличения затрат и времени выполнения ОКР.

Оценка риска увеличения затрат на реализацию опытно-конструкторских работ. Входящий в состав системы детерминированных алгебраических уравнений экономико-математической модели (стоимостная модель) переменные и параметры в силу наличия фактора неопределенности являются нечеткими переменными.

По результатам анализа технико-экономической информации об изделиях-аналогах экспертно-эмпирическим методом относительно легко установить верхнюю $(a_{\max})$ и нижнюю $(a_{\min})$ границы возможных значений по каждой нечеткой переменной $x \in [a_{\min}, a_{\max}]$, а также определить интервал $[a,b] \subset [a_{\min}, a_{\max}]$, внутри которого нечеткая переменная x будет принимать наиболее ожидаемое значение.

Среди существующих на сегодня методов оценки степени риска увеличения затрат на реализацию инновационных технических проектов наиболее высокий уровень корректности результатов обеспечивает метод компьютерного имитационного моделирования. Для решения задачи определения степени риска увеличения затрат на реализацию ОКР $\left(SR = \left\langle Z_{OKP},\ P\left(Z_{OKP}\right)\right\rangle\right)$ методом компьютерного имитационного моделирования необходимо построить формальную модель неопределенности по каждой нечеткой переменной, входящей в аналитические выражения, по которым рассчитываются технико-экономические показатели новой техники.

Моделирование неопределенностей числовых переменных построено на основных положениях теории нечетких числовых множеств [3]. Неопределенность моделируется путем построения весовой функции (функции принадлежности) $\mu(x) < 1 \quad \forall x \in [a_{\min}, a_{\max}]$ и $\mu(x) = 0$, если $x \notin [a_{\min}, a_{\max}]$.

Функция $\mu(x)$ по своему содержанию соответствует весовой функции (функции принадлежности) нечеткой числовой переменной и определяет количественную меру того, что нечеткая переменная x примет значение $q_x \in [a_{\min}, a_{\max}]$.

Таким образом, задача оценки степени риска (SR) увеличения затрат на реализацию ОКР сведена к построению компьютерного алгоритма генерации значений весовой функции $\mu(x)$ для каждой нечеткой переменной, входящей в состав стоимостных моделей в качестве исходных данных.

Метод построения функции $\mu(x)$ приведен в [4].

Методический подход к оценке риска увеличения времени длительности опытно-конструкторских работ. В зависимости от уровня новизны конструкции разрабатываемого нового образца РКТ целесообразно использовать два подхода.

Первый подход применяется в случае наличия отечественного ближайшего образца-аналога. В качестве исходной основы для решения оценки риска увеличения длительности ОКР (ΔT_{OKP}) используется сетевой план-график создания образца-аналога $SG(t_{ij}, RB_{ij})$.

Узлами сетевого графика являются работы (RB_{ij}), дугами – временная продолжительность (t_{ij}) выполнения работы RB_{ij} (i -й этап, j -я работа на i -ом этапе).

Процесс выполнения ОКР нового образца представим в виде сетевого графика образца-аналога, добавив в него новые работы для изделий (подсистем), ранее отсутствующих в аналоге, исключив работы по изделиям (подсистемам), которые отсутствуют в новом изделии. Для работ, преемственность которых выше наперед заданного уровня, значения t_{ij} переносятся без изменения, для остальных работ экспертным путем устанавливается нижняя $(t_{\min})$ и верхняя $(t_{\max})$ граница изменения временного параметра t_{ij}. Исходя из заданных границ, строим два возможных значения длительности работы t_{ij} :

$$t_{ij} = \begin{cases} t_{ij}^{0} = \dfrac{t_{\min} + t_{\max}}{2} \\ t_{\max} \end{cases}.$$

Для двух вариантов значений t_{ij} вычислим длину критического пути сетевого графика. Получим два значения критического пути $T_{кр}^{0}$ и $T_{кр}^{\max}$. За номинальное ожидаемое время длительности ОКР принимаем значение $T_{кр}^{0}$: $T_{OKP} = T_{кр}^{0}$.

Величина $T_{кр}^{\max} - T_{кр}^{0} = \Delta T_{ОКР}$ является величиной риска увеличения длительности ОКР.

Второй подход к оценке риска увеличения длительности ОКР целесообразно использовать в случае, если ближайшим аналогом является зарубежный образец. В данном случае за номинальное ожидаемое значение длительности выполнения ОКР $T_{кр}^{0}$ принимается длительность ОКР зарубежного аналога.

Верхняя граница длительности ОКР $T_{кр}^{\max}$ может быть определена следующим образом:

$$T_{ОКР}^{\max} = T_{ОКР}^{0} \cdot d_t \, , \; d_t = a_t \cdot (\exp(b_t x_t)\,, \; x_t = (1 + k_{НК})^{\alpha} \cdot (1 + k_{ТС})^{\beta} \,,$$

где $T_{ОКР}^{0}$ – номинальное значение длительности ОКР; a_t и b_t – эмпирические коэффициенты; x_t – нечеткая переменная величина; $k_{НК}$ – коэффициент новизны конструкции; $k_{ТС}$ – коэффициент технологической сложности изготовления конструкции; α – эмпирический коэффициент, зависящий от уровня значения параметра $k_{НК}$; β – эмпирический коэффициент, зависящий от уровня значения параметра $k_{ТС}$.

Тогда $\Delta T_{ОКР} = (1 - d_t) T_{ОКР}^{0}$.

Приведенные в статье аналитические выражения для определения ожидаемых затрат на создание новых образцов РКТ представляют собой эмпирические формулы, которые построены путем обобщения практического опыта создания изделий РКТ [2]. Однако входящие в аналитические выражения параметры в большой степени зависят от особенностей ближайших изделий-аналогов.

Необходимая статистическая однородная информация для численного определения параметров модели в принципе не может быть получена по причине уникальности каждого изделия РКТ. Поэтому численные значения безразмерных эмпирических коэффициентов (параметров математической модели) определяются на ограниченном объеме (2 – 4 варианта статистически необходимой информации по ближайшим изделиям-аналогам). Для учета влияния ограниченности и неопределенности исходных данных введены дополнительные поправки, которые являются экспертной оценкой возможности вариации параметров модели и задаются в виде нечетких чисел.

Выводы. Приведенная в работе экономико-математическая модель расчета ожидаемых затрат на создание образцов новой ракетно-космической техники устанавливает аналитическую связь между требуемыми тактико-техническими характеристиками новой техники и ее стоимостными параметрами. С целью повышения уровня обоснованности и точности расчета ожидаемых затрат в составе экономико-математической модели использованы методы теории графов и нечетких множеств.

Компьютерная реализация экономико-математической модели позволит обеспечить на предпроектной стадии расчет величины номинальных ожидаемых затрат на реализацию опытно-конструкторских работ, а также оценить степень риска возможного увеличения затрат, обусловленного новизной техники и неопределенностью (неточностью) используемой при расчетах ретроспективной и прогнозной информации. Степень риска включает в себя значение величины возможного роста затрат и количественную меру оценки этой возможности (аналог вероятности меры).

Приведенная экономико-математическая модель – результат первого этапа разработки системы математического и алгоритмического обеспечения для расчета показателей ожидаемой эффективности научно-технических проектов по созданию новых образцов ракетно-космической техники.

1. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Сазина Н. П., Хорольский П. П.* Методологический подход к проведению технико-экономического обоснования проектов по созданию новых образцов космической техники Техническая механика. 2015. №3. С.3–17.
2. *Пилипенко О. В., Переверзев Е. С., Алпатов А. П., Марченко В. Т., Печеневская О. К., Хорольский П. П.* Эффективность научно-технических проектов и программ: монография. Днепропетровск: Пороги, 2008. 509 с.
3. *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей: приложения к представлению знаний в информатике. М. : Радио и связь, 1990.
4. *Марченко В. Т., Сазина Н. П., Сюткина-Доронина С. В.* Об одном методе моделирования неопределенностей технико-экономических данных в задачах оценивания научно-технических проектов. Техническая механика. 2016. №2. С. 137–146.

Получено 21.05.2018,
в окончательном варианте 30.05.2018