Научная статья
УДК 621.454.2

Подходы к выбору рациональных вариантов программы создания жидкостного ракетного двигателя ракеты-носителя в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения

Александр Васильевич Белянкин, Евгений Николаевич Семенов, Сергей Юрьевич Герасименко, Сергей Юрьевич Пирогов

Аннотация. В публикации рассматривается вопрос генерации множества вариантов программы создания жидкостного ракетного двигателя ракеты-носителя в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы. Предлагается подход поэтапного снижения мощности полученного множества вариантов программы создания жидкостного ракетного двигателя за счет учета расширенного перечня факторов, влияющих на реализуемость программы создания. Предлагается подход к выбору рациональных вариантов программы создания жидкостного ракетного двигателя в условиях ограничений на объемы испытаний и сроки выполнения программы по степени реализуемости.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель; ракета-носитель; программа создания; рациональный вариант; степень реализуемости

Для цитирования: Белянкин А.В., Семенов Е.Н., Герасименко С.Ю., Пирогов С.Ю. Подходы к выбору рациональных вариантов программы создания жидкостного ракетного двигателя ракеты-носителя в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения // Вооружение и экономика. 2026. №3(77). С. 22-36.

Original article

Approaches to the Rational Options Selection of a Liquid Rocket Engine Development Program for a Launch Vehicle under Conditions of Limited Extent of Tests and Deadlines

Aleksandr V. Beliankin, Evgenii N. Semenov, Sergei I. Gerasimenko, Sergei I. Pirogov

Abstract. The publication discusses the issue of multiple variants of a program development for a liquid-propellant launch vehicle engine under conditions of limited extent of test and deadlines. An approach is proposed to gradually the power reduction of the resulting set of variants of development program by taking into account an expanded list of factors affecting the program feasibility. An approach is proposed certain rational options selection for a liquid rocket engine development program under conditions of limited extent of tests and the program duration according to the degree of feasibility.

Keywords: liquid rocket engine; launch vehicle; development program; rational option; degree of feasibility

For citation: Beliankin A.V., Semenov E.N., Gerasimenko S.I., Pirogov S.I. Approaches to the Rational Options Selection of a Liquid Rocket Engine Development Program for a Launch Vehicle under Conditions of Limited Extent of Tests and Deadlines. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 77(3): 22-36. (In Russ.).

Введение

Формирование космической инфраструктуры и совершенствование средств выведения является важнейшей государственной задачей [1]. Одним из путей решения такой комплексной задачи является создание новых или модернизация существующих жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), отвечающих современным требованиям [2]. При создании новых ЖРД средств выведения космических аппаратов (КА) необходимо оптимизировать финансовые и материальные расходы и повышать надежность ЖРД. Создавать новые ЖРД целесообразно в ограниченные сроки, пока разрабатываемая система не устарела морально и физически, и с минимально необходимым объемом дорогостоящих натурных испытаний.

Решение этой задачи путем традиционных экспериментальной отработки и принципа построения программы создания ЖРД уже неэффективно, требует огромных материальных затрат и большого времени. При этом зачастую выбор варианта программы создания ЖРД не учитывает влияние на его реализуемость существующих системных проблем в ракетно-космической промышленности (РКП) и ее научно-технический потенциал (уровень). Также

© Белянкин А.В., Семенов Е.Н., Герасименко С.Ю., Пирогов С.Ю., 2026

следует подчеркнуть, что объем выборки предлагаемых вариантов программы создания ЖРД под перспективные средства выведения КА достаточно мал и не обеспечивает гибкость принятия решения при изменяющихся условиях. При этом существующий подход не позволяет учесть влияние условий ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы.

Очевидно, что потребуется применение нового подхода, который позволит сформировать наиболее полное множество альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения и провести процедуру выбора рациональных вариантов.

Постановка задачи исследования

При выборе рациональных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы необходимо решать следующие основные задачи:

- формирование единой системы исходных данных;
- генерация множества вариантов программы создания ЖРД;
- оценка реализуемости вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы;
- выбор рациональных вариантов программы создания ЖРД по степени реализуемости при заданных ограничениях.

Под степенью реализуемости варианта программы создания ЖРД понимается количественная оценка степени достижения поставленной цели при заданных условиях и ограничениях. Такая оценка базируется на сравнении технико-экономических показателей вариантов программы создания ЖРД с заданными условиями и ограничениями и определении значений реализуемости вариантов программы создания ЖРД. Степень реализуемости варианта программы создания ЖРД необходима в дальнейшем для решения задачи выбора, основанного на сравнении вариантов и определении рациональных вариантов. Чем больше количество вариантов подвергается сравнительному анализу, тем ближе рекомендуемое решение к оптимальному и тем выше эффективность использования ресурсов [3].

Содержательная постановка задачи исследования

Дано: $Z_{\{K\}} = \{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ – перечень задач по выведению КА заданной массы на заданную орбиту $k \in \{1,2,\dots,K\}$; $T^{\text{тр.}}_{\text{пр.с.}}$ – заданное время на выполнение программы создания ЖРД; $B_{\{N\}} = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ – набор составных частей и элементов ЖРД $n \in \{1,2,\dots,N\}$; $V_{\{3\}} = \{V_{\text{авт}}, V_{\text{ки}}, V_{\text{ли}}\}$ – суммарный объем испытаний, закладываемый в программу создания ЖРД; $P^{\text{пр}}_{\text{жрд}}$ – прогнозный уровень надежности по результатам выполнения программы создания ЖРД; $M_{\{L\}} = \{m_1, m_2, \dots, m_L\}$ – перечень организационно-технических мероприятий, планируемых в программе создания ЖРД $l \in \{1,2,\dots,L\}$; $C^{\text{пр}}_{\text{пр.с.}}$ – прогнозная ресурсоемкость программы создания ЖРД; $x^{\text{эт.}}_n = \{x^{\text{эт}}_1, x^{\text{эт}}_2, \dots, x^{\text{эт}}_N\}$ – последовательность этапов программы создания ЖРД; $D^{\text{жрд}} = \{P_{\text{к}}, p_{\text{к}}, N_{\text{кс}}, n_{\text{кр.и.}}, n_{\text{кр.вкл.}}, t_{\text{р}}, I\}$ – технические характеристики и параметры ЖРД; $W = \{w^{\text{пр.с.}}_1, w^{\text{пр.с.}}_2, \dots, w^{\text{пр.с.}}_I\}$ – множество возможных вариантов программы создания ЖРД средств выведения КА $i \in \{1,2,\dots,I\}$.

Найти: Множество рациональных вариантов программы создания ЖРД $\{W^*_{\text{рац}}\}$, удовлетворяющее следующим ограничениям:

$$\begin{cases} T_{\text{пр.с.}}(W) \le T^{\text{тр}}_{\text{пр.с.}}; \\ V(W) \le V^{\text{тр}}; \\ P_{\omega^{\text{ПРАВ}}}(W) \ge 0{,}8; \\ K_{\text{Э}}(W) \le 0{,}2. \end{cases} \quad (1)$$

Принцип выбора рациональных вариантов программы создания ЖРД по степени реализуемости в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы представлен на рисунке 1.

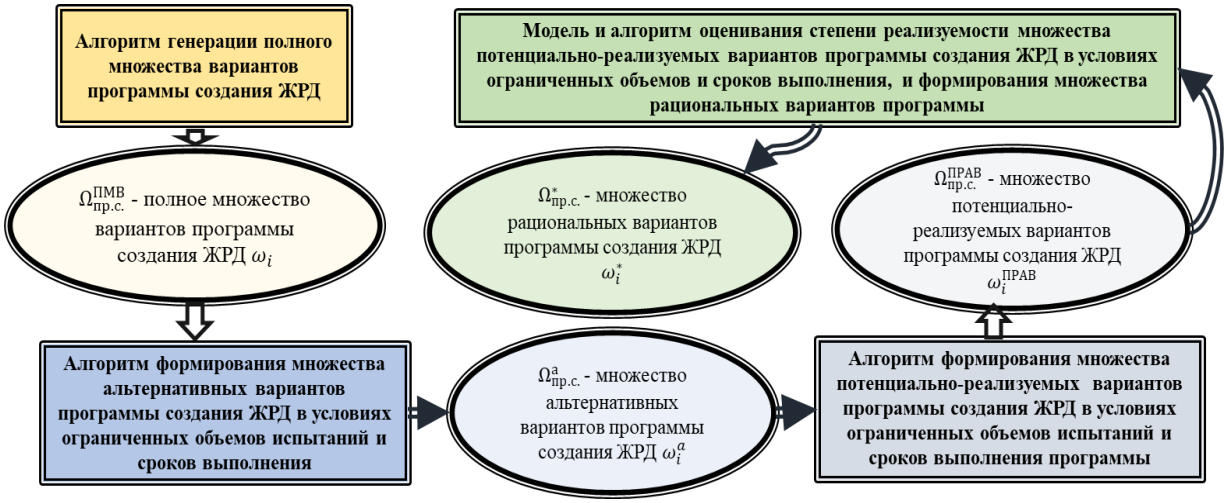

Рисунок 1 – Принцип выбора рациональных вариантов программы создания ЖРД по степени реализуемости в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения

Подход к выбору рациональных вариантов программы создания ЖРД

В соответствии с принципом выбора рациональных вариантов программы создания ЖРД и перечнем основных задач, решаемых при выборе таких вариантов в первую очередь необходимо сформировать единую систему исходных данных, позволяющую варьировать основными компонентами программы создания ЖРД. Единая система исходных данных (ЕСИД) позволяет упорядочить поле данных и упростить механизмы работы с ним, также обеспечить понимание физической сущности ЖРД и его характеристик (параметров), использовать единый подход к варьированию компонентами программы создания ЖРД. ЕСИД – это одно из главных условий, при выполнении которого могут быть получены сравнимые и объективные оценки различных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы [4]. Компоненты ЕСИД формируются путем внесения положений программно-целевых документов, относящихся к перспективам развития средств выведения и к их составным частям; результатов научной деятельности; общих и дополнительных технических требований к ЖРД и опытных данных по разработке, производству и эксплуатации ЖРД. Такой объем исходных данных позволяет перейти к генерации множества вариантов программы создания ЖРД путем варьирования основных компонент программы создания ЖРД (рисунок 2).

Следующим этапом разработанного подхода является процедура формирования альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы. Формирование альтернативных вариантов программы создания ЖРД проводится в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.

Основными этапами алгоритма (рисунок 3) являются:

- определение располагаемых объемов финансовых ресурсов, которые могут быть выделены на программный период создания ЖРД. Для ориентировочных расчетов располагаемых финансовых средств может быть предложена следующая формула:

$$V_{\text{ф}}^{\text{р}} = \text{ВВП} \cdot (\alpha + \beta) + V_{\text{к}}^{\text{р}}, \quad (2)$$

где: ВВП – прогнозный объем валового внутреннего продукта в рассматриваемый период (принимается по данным Минэкономразвития России), руб.; α – статистический коэффициент, соответствующей средней доле финансирования работ в рамках госпрограммы вооружения (ГПВ) Минобороны России в ВВП за последние 3-5 лет; β – статистический коэффициент, соответствующий средней доле объема финансирования работ по Федеральной космической программе в ВВП за последние 3-5 лет; $V_{\text{к}}^{\text{р}}$ – располагаемые объемы финансирования коммерческими инвесторами.

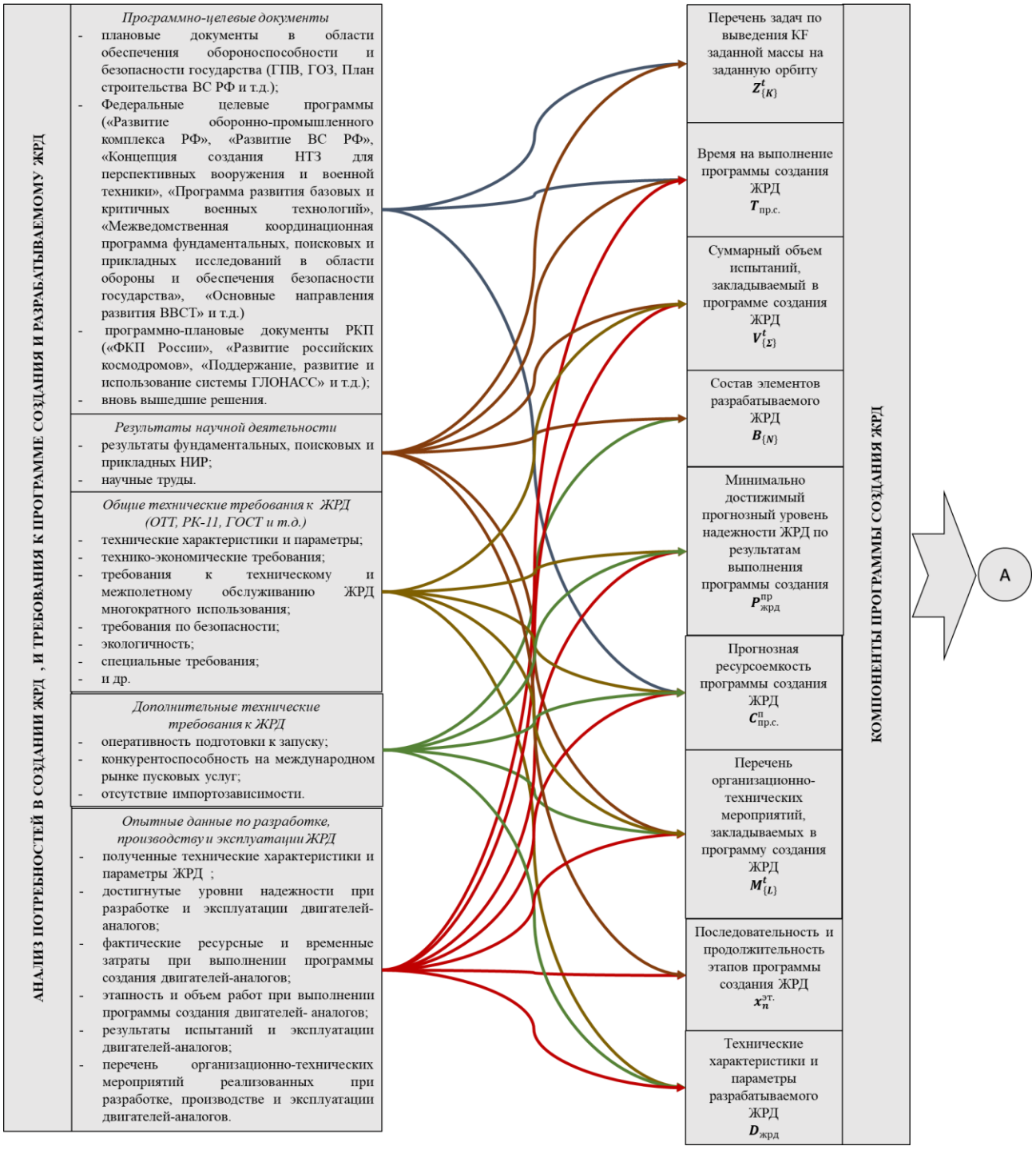

Рисунок 2 – Схема генерации множества вариантов программы создания ЖРД

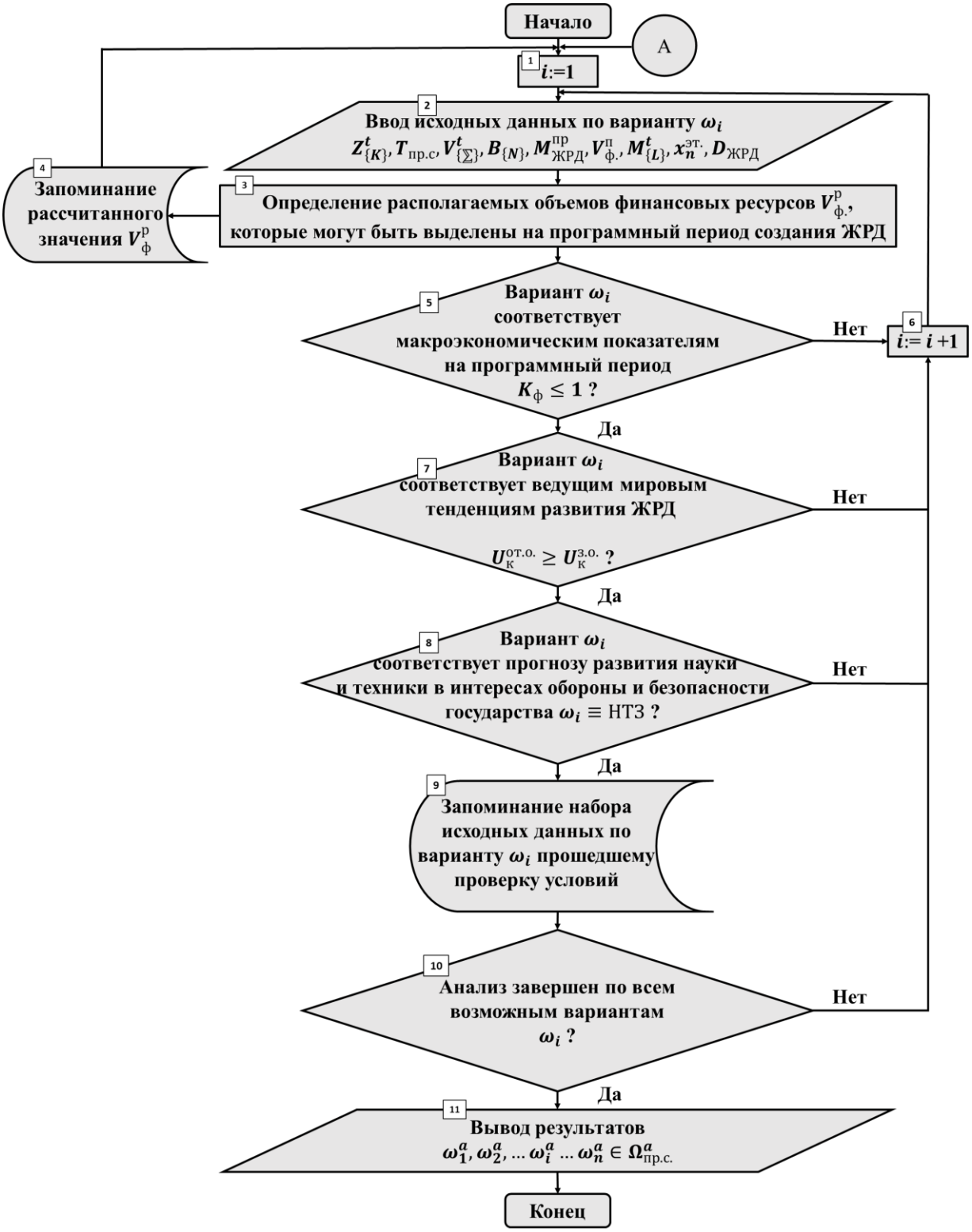

Рисунок 3 – Алгоритм формирования альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы

- определение показателя обеспеченности финансовыми средствами. Показатель характеризует достаточность выделяемых финансовых средств для выполнения программы создания ЖРД. Показатель рассчитывается как в целом на всю программу, так и по отдельным компонентам программы по формуле:

$$K_{\text{ф}} = \frac{V_{\text{ф}}^{\text{п}}}{V_{\text{ф}}^{\text{р}}} = \frac{V_{\text{ниокр}}^{\text{п}} + V_{\text{сп}}^{\text{п}}}{V_{\text{ниокр}}^{\text{р}} + V_{\text{сп}}^{\text{р}}}, \quad (3)$$

где: $K_{\text{ф}}$ – показатель обеспеченности программы создания ЖРД финансированием; $V_{\text{ниокр}}^{\text{п}}$ – потребный объем финансирования НИОКР (принимается по программе), руб.; $V_{\text{сп}}^{\text{п}}$ – потребный объем финансирования при серийном производстве, руб.; $V_{\text{ниокр}}^{\text{р}}$, $V_{сп}^{р}$ – соответственно располагаемые объемы финансирования НИОКР и серийного производства (выделяемые объемы финансирования), которые могут складываться из долей финансовых средств, выделяемых Госкорпорацией «Роскосмос» и на коммерческой основе, руб.

- сравнение варианта программы создания ЖРД с ведущими мировыми тенденциями развития;

- сопоставление варианта программы создания ЖРД средств выведения КА с прогнозом развития науки и техники в интересах государства.

Следующим этапом разработанного подхода является процедура формирования потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД.

Формирование потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД средств выведения КА проводится в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.

Формирование проходит в две ступени:

1. Исключение из дальнейшего анализа альтернативных вариантов программы создания ЖРД варианты, на которые влияют ключевые системные проблемы в РКП. Определение ключевых системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД проводится по алгоритму, представленному на рисунке 5.

2. Исключение из дальнейшего анализа альтернативных вариантов программы создания ЖРД варианты, которые не реализуемы или трудно реализуемы при существующем научно-техническом потенциале (уровне) РКП. Алгоритм анализа реализуемости альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения по существующему научно-техническому уровню РКП представлен на рисунке 8.

Основными этапами алгоритма (рисунок 5) являются:

1. Ввод исходных данных:

- формирование группы экспертов $\vec{Э} = [Э_1, Э_2, \dots\ Э_n]$, при этом $n \geq 7$;

- формирование множества системных проблем, оказывающих влияние возможность реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы $\Pi_{\{\text{M}\}}^{\text{пр.с.}} = \{\Pi_1^{\text{пр.с.}}, \Pi_2^{\text{пр.с.}}, \dots\ \Pi_{\text{M}}^{\text{пр.с.}}\}$, при этом $\Pi_{\{\text{M}\}}^{\text{пр.с.}} \subset \text{Н}^{\text{НИР}}$.

2. Ознакомление экспертов с предлагаемым перечнем системны проблем $\Pi_{\{\text{M}\}}^{\text{пр.с.}}$ и правилами проведения экспертного опроса.

3. Дополнение перечня системным проблем $\Pi_{\{\text{M}\}}^{\text{пр.с.}}$ и повторное ознакомление группы экспертов с дополненным вариантом (при необходимости).

4. Заполнение матрицы экспертных оценок $R_{\|M\times n\|}$ по методу анализа иерархий (попарное сравнение любых двух системных проблем по степени значимости):

$$R_{\|M\times n\|} = \begin{Vmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & \dots & P_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_{Mn} \end{Vmatrix}. \quad (4)$$

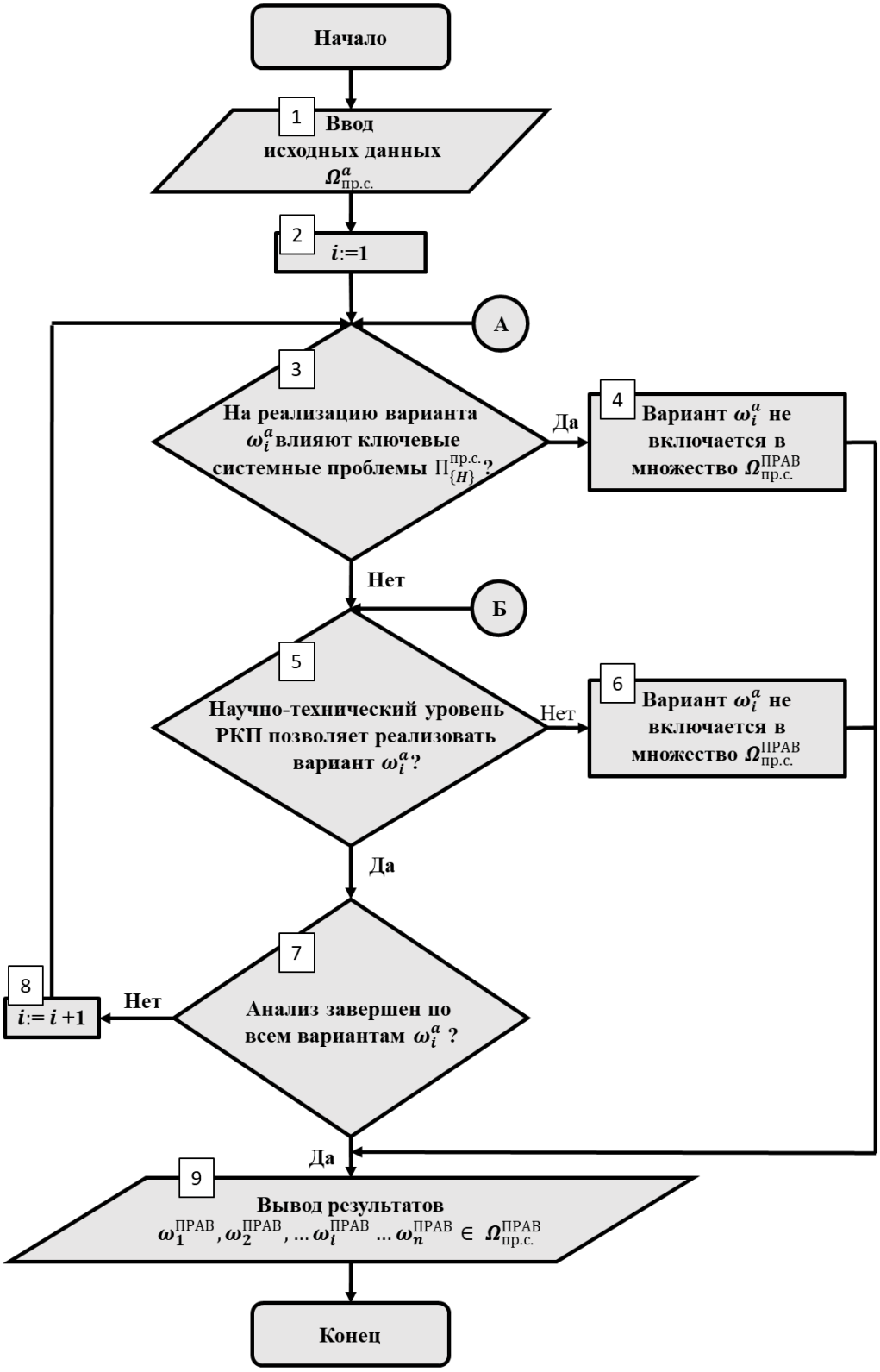

Рисунок 4 – Алгоритм формирования потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД

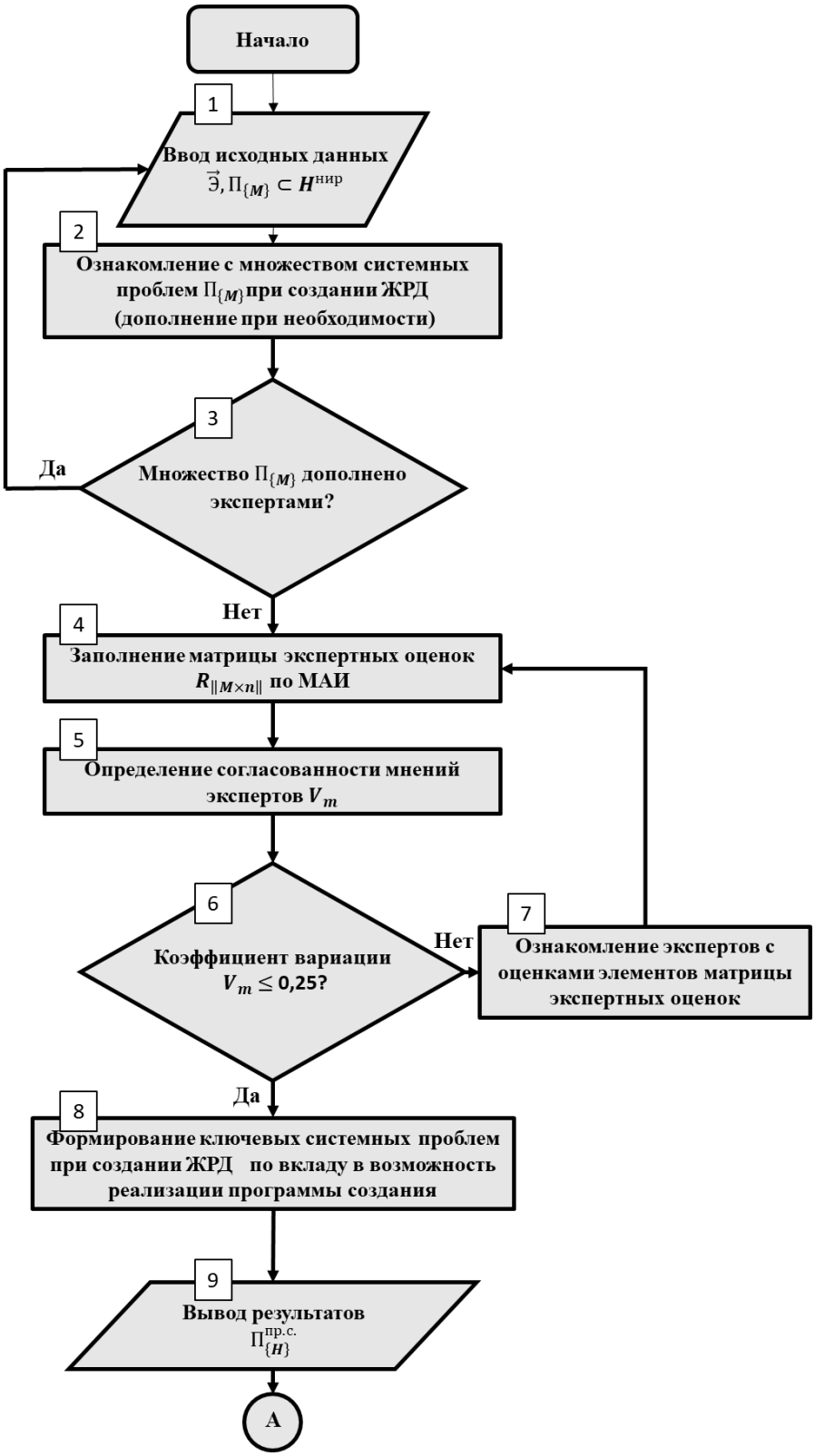

Рисунок 5 – Алгоритм определения ключевых системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД

Элементы матрицы (4) образуются по следующему правилу:

$$P_{mj}\begin{cases}9 - \text{абсолютное превосходство;}\\1 - \text{одинаковая значимость системных проблем;}\\5 - \text{умеренное превосходство одной проблемы над другой;}\\2, 3, 4, 6, 7, 8 - \text{промежуточные решения по оценке значимости.}\end{cases} \quad (5)$$

5. Определение согласованности мнений экспертов – (6), (7), (8):

$$P_{m\ \text{ср}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} P_{mj}, \quad (6)$$

где: $P_{m\ \text{ср}}$ – среднее значение величины m-й системной проблемы j-м экспертом.

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(P_{mj}-P_{m\ \text{ср}}\right)^2}{n-1}}, \quad (7)$$

где: σ_m – среднее квадратичное отклонение значения величины оценки m-й системной проблемы j-м экспертом.

$$V_m = \frac{\sigma_m}{P_{m\ \text{ср}}}, \quad (8)$$

где: V_m – коэффициент вариации (степень согласованности мнений экспертов).

6. Сравнение рассчитанных значений коэффициентов вариации с требуемым, степень согласованности считается удовлетворительной при $V_m \le 0{,}25$.

7. При превышении допустимой величины степени согласованности проводится ознакомление каждого эксперта со значениями балльной оценки важности системной проблемы, назначенных другими экспертами и предоставляется возможность пересмотра оценок при повторном туре экспертного опроса. В случае получения неудовлетворительных значений степени согласованности при повторном туре проводится процедура обоснования назначаемых оценок каждым экспертом, ознакомление экспертов с этими обоснованиями, а затем проводится третий тур экспертного опроса.

8. Формирование ключевых системных проблем по вкладу влияния на возможность реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД:

- расчет значений весовых коэффициентов значимости w_m m-й системной проблемы по формуле:

$$w_m = \frac{P_{m\ \text{ср}}}{\sum_{m=1}^{M} P_{m\ \text{ср}}}, \quad (9)$$

где: M – количество «взвешиваемых» системных проблем; при условии, что $0 < w_m < 1$ и $\sum_{m=1}^{M} w_m = 1$.

- формирование подмножества ключевых системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД:

а) Правило формирования подмножества ключевых системных проблем:

$$\Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \notin \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{если } w_{\xi} < w^{*} \text{ или } \Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \in \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{ если } w_{\xi} \ge w^{*}, \quad (10)$$

где: $\Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}}$ – произвольный элемент множества системных проблем; $\Pi_{\{M\}}^{\text{пр.с.}}$ – полное множество системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД; $\Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}$ – подмножество ключевых системных проблем $\Pi_{h}^{\text{пр.с.}}$ $h = \overline{1, H}$, $\Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}} \subseteq \Pi_{\{M\}}^{\text{пр.с.}}$, $H \le M$.

б) Обоснование порогового значения степени значимости системной проблемы. Если все системные проблемы $\Pi_{m}^{\text{пр.с.}}$ $m = \overline{1, M}$ одинаковы по важности, то их вес одинаков и равен:

$$w^{*} = \frac{\sum_{m=1}^{M} w_m}{M} = \frac{1}{M}; \quad (11)$$

в) Правило формирования подмножества ключевых системных проблем:

$$\Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \notin \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{ если } w_{\xi} < \frac{1}{M} \text{ или } \Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \in \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{если } w_{\xi} \geq \frac{1}{M}, \quad (12)$$

$$\Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \notin \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{если } \beta_{\xi} = w_{\xi} - \frac{1}{M} < 0 \text{ или } \Pi_{\xi}^{\text{пр.с.}} \in \Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}, \text{если } \beta_{\xi} = w_{\xi} - \frac{1}{M} \geq 0. \quad (13)$$

где: β_{ξ} – приведенный коэффициент значимости m-й системной проблемы.

Графическое представление правила формирования подмножества ключевых системных проблем $\Pi_{\{H\}}^{\text{пр.с.}}$ (рисунок 6).

9. Вывод результатов:

- формирование перечня ранжированных по убыванию значимости ключевых системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД с нормированными и приведенными весовыми коэффициентами значимости (таблица 1);
- вывод диаграммы полученных значений весовых коэффициентов значимости системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД (рисунок 7).

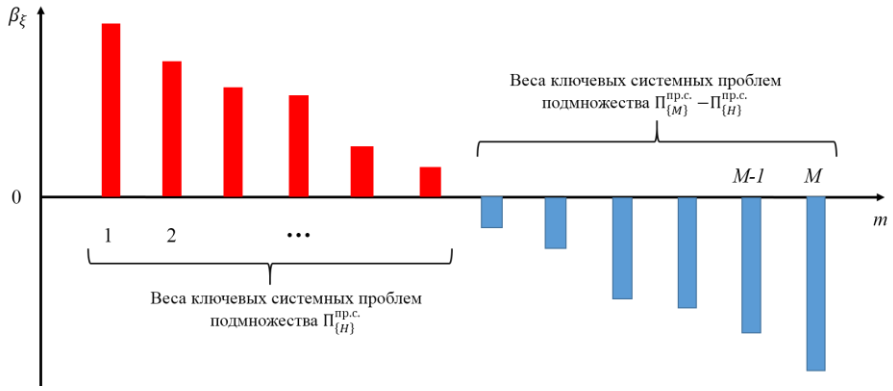

Рисунок 6 – Пример графика значений весов системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД

Таблица 1 – Пример перечня ранжированных по убыванию значимости ключевых системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД

№ п/п	Наименование ключевой системной проблемы	β_{ξ}
1.	Снижение конкурентоспособности отечественных средств выведения на международном рынке пусковых услуг	0,050
2.	Технико-экономические проблемы создания ЖРД	0,047
3.	Проблемы разработки и внедрения прорывных технологий и перспективных конструкционных материалов	0,038
4.	Проблемные вопросы обеспечения материалами и сырьем	0,037
5.	Проблема обеспечения ракетно-космической отрасли высококвалифицированными кадрами	0,034
6.	Длительный производственный цикл изготовления элементов ракетно-космической техники	0,026
7.	Проблемы создания стартовых и технических комплексов для перспективных средств выведения КА	0,025
8.	Материально-техническое старение производственной базы	0,015
9.	Проблемные вопросы обеспечения надежности ЖРД	0,006
10.	Экспортные ограничения и импортозависимость в материалах и сырье	0,003

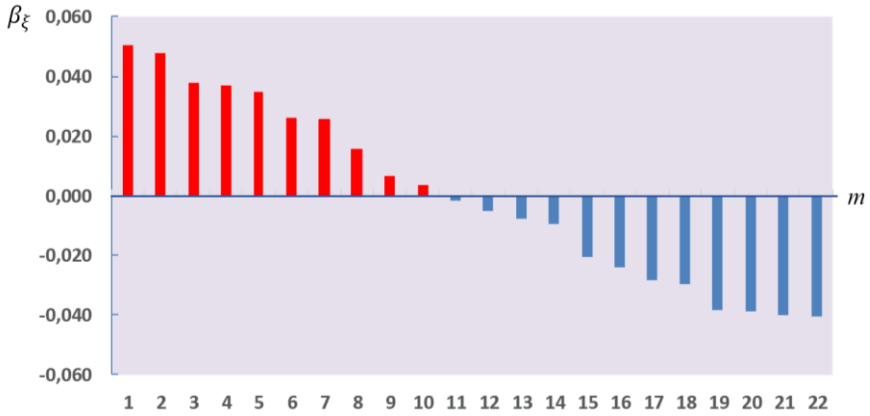

Рисунок 7 – Пример диаграммы полученных значений весовых коэффициентов значимости системных проблем при реализации альтернативных вариантов программы создания ЖРД

Основными этапами алгоритма (рисунок 8) являются:

- определение физической реализуемости альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы. Физическая реализуемость обеспечивается соответствием замысла варианта программы современным научным представлениям. Оценка проводится по трем критериям: надежности, которая может быть достигнута при заданных условиях и ограничениях; соответствия закладываемых технических характеристик и параметров ЖРД современным научным и техническим достижениям; набору составных частей и элементов ЖРД, которые необходимо для его функционирования и выполнения требуемых задач.

- определение логической реализуемости альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы (учет логических ограничений на возможный порядок выполнения работ во времени). Такими ограничениями, например, являются: требования нормативных и руководящих документов, которые определяют порядок создания изделий ракетно-космической техники; необходимость иерархического построения программ испытаний, предусматривающих проведение испытаний по этапам: вначале испытания элементов, затем испытания блоков и в итоге испытания системы в целом; увязка сроков разработки документации, капитального строительства и сдачи в эксплуатацию новых испытательных стендов (их доработка) со сроками разработки и испытаний ЖРД и их составных частей и т.д.

- определение научно-технической реализуемости альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы (соответствие замысла варианта программы создания располагаемым научным возможностям в отрасли) [5]. Оценка проводится по двум критериям: соответствие замысла варианта программы существующему заделу научных исследований и разработок в отрасли (ЗНИиР); соответствие замысла варианта программы существующим технологическому заделу и техническим решениям (ТЗиТР).

Следующим этапом разработанного подхода к выбору рациональных вариантов программы создания ЖРД является экспертное оценивание потенциальной реализуемости. Оценивание производится с помощью модели и алгоритма оценивания множества потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы. Исходное множество $\Omega_{\text{пр.с}}^{\text{ПРАВ}}$ вариантов программы создания подвергается экспертному анализу, в результате которого каждый эксперт $Э_i$, $i = \overline{1,N}$ для каждой альтернативы $\omega_i^{\text{ПРАВ}}$ $i = \overline{1,n}$ выбирает оценку степени потенциальной реализуемости r_{ij}, которые в совокупности образуют матрицу $R_{\|N\times n\|}$ экспертных оценок потенциальной реализуемости элементов множества вариантов программы создания ЖРД, показанную на рисунке 9.

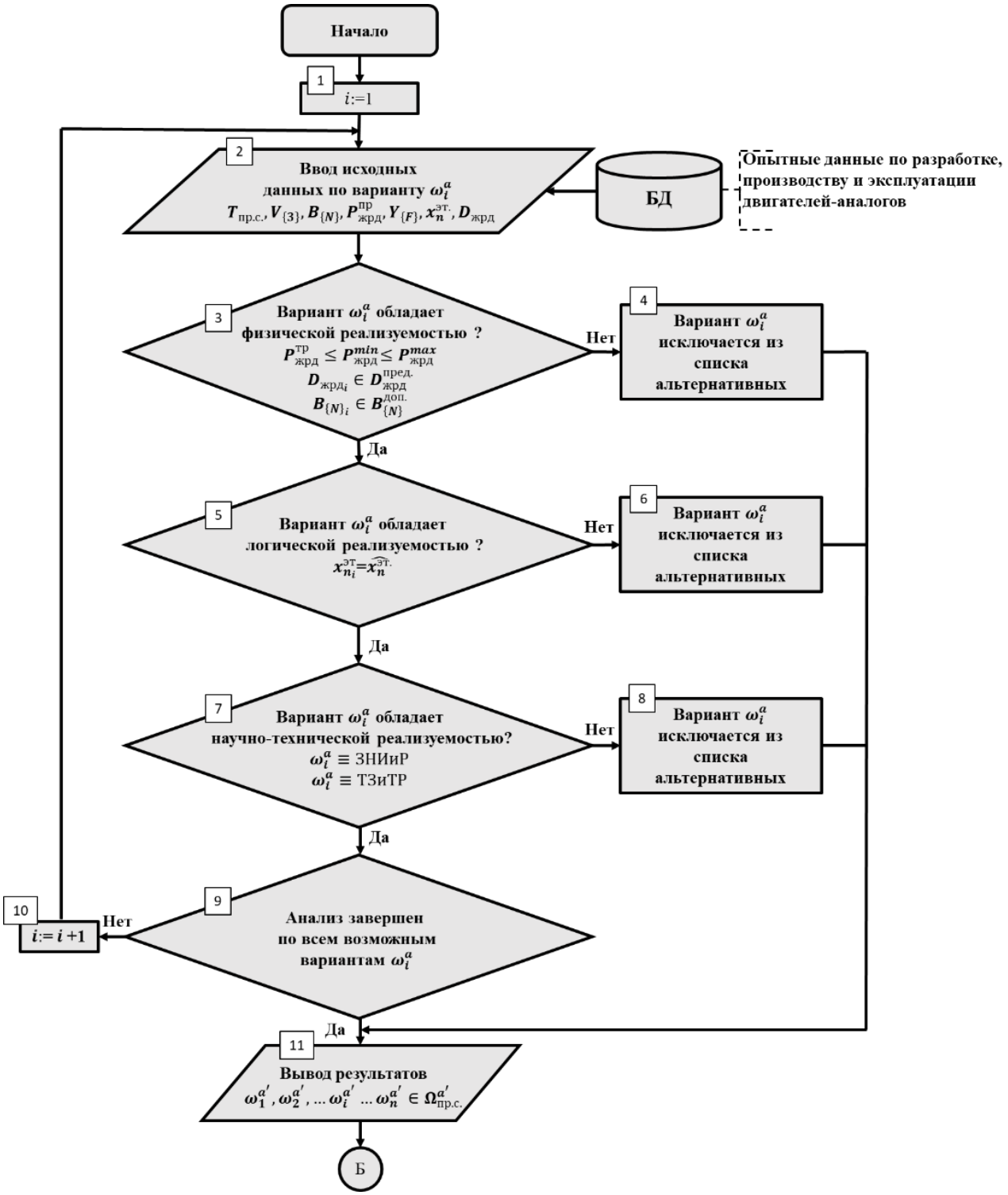

Рисунок 8 – Алгоритм анализа реализуемости альтернативных вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения по существующему научно-техническому уровню РКП

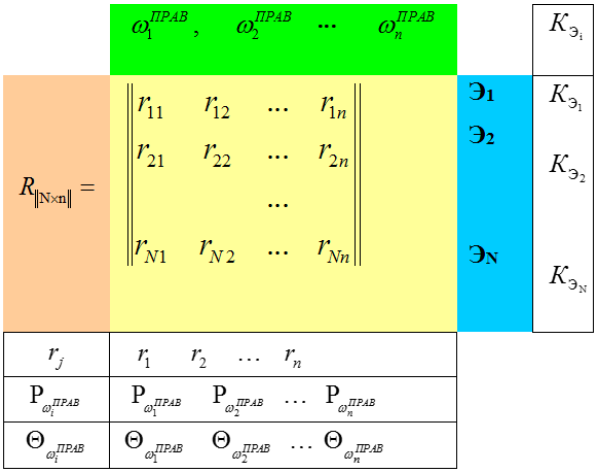

Рисунок 9 – Матрица экспертных оценок потенциальной реализуемости потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы

В отличие от традиционных методов экспертного оценивания [6; 7], основанных на бинарных двухзначных оценках степени реализуемости альтернатив, в модели предложено ввести трехзначную оценку степени реализуемости, добавив помимо «1» и «0», значение «0,5», которое предлагается использовать, когда эксперт не может принять однозначное решение о реализуемости или нереализуемости рассматриваемого варианта программы создания ЖРД:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{когда } i\text{-й эксперт считает, что вариант } \omega_i^{\text{ПРАВ}} \text{ потенциально реализуем;} \\ 0{,}5 & \text{когда } i\text{-й эксперт затрудняется принять решение по варианту } \omega_i^{\text{ПРАВ}}; \\ 0 & \text{когда } i\text{-й эксперт считает, что вариант } \omega_i^{\text{ПРАВ}} \text{ потенциально нереализуем.} \end{cases} \quad (14)$$

Это позволяет ввести помимо обобщенного коэффициента потенциальной реализуемости варианта:

$$P_{\omega_i^{\text{ПРАВ}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} r_{ij}}{N}, \quad (15)$$

обобщенный коэффициент неопределенности экспертных оценок варианта:

$$\Theta_{\omega_i^{\text{ПРАВ}}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} |r_{ij} - 0.5|}{N \cdot 0.5}, \quad (16)$$

а также определить коэффициент апостериорной компетентности эксперта:

$$\text{К}_{Э_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} |r_{ij} - 0.5|}{n \cdot 0.5}. \quad (17)$$

Для того чтобы упростить процедуру выбора рациональных вариантов программы создания ЖРД по степени реализуемости предлагается снизить количество потенциально реализуемых вариантов программы за счет дополнительного векторного критерия [8; 9]. В качестве векторного критерия потенциальной реализуемости варианта программы создания ЖРД предложено использовать четыре условия, то есть, вариант остается принадлежать множеству потенциально реализуемых вариантов, если:

$P_{\omega_l^{\text{ПРАВ}}} \geq P_0$ – вариант характеризуется существенным уровнем потенциальной реализуемости;

$\Theta_{\omega_i^{\text{ПРАВ}}} \leq \Theta_0$ – степень неопределенности оценки реализуемости варианта допустима;

$\text{К}_{Э_i} \geq \text{К}_0, \forall i = \overline{1,N}$ – коллектив экспертов однороден по степени компетентности;

$W \geq W_0$ – мнения экспертов согласованы, W – коэффициент конкордации экспертных оценок, определяемый на основе выражения:

$$W = \frac{12\sum_{i=1}^{n}[r_i - \frac{1}{2}N(n+1)]^2}{N^2(n^3-n) - N\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{k_i}(t_{ij}^3 - t_{ij})}, \quad (18)$$

где: $r_j = \sum_{i=1}^{N} r_{ij}$; k_j – число групп равных рангов, введенных i-м экспертом; t_{ij} – количество дробных рангов в j-й группе, введенной i-м экспертом.

Алгоритм оценивания множества потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы представлен на рисунке 10.

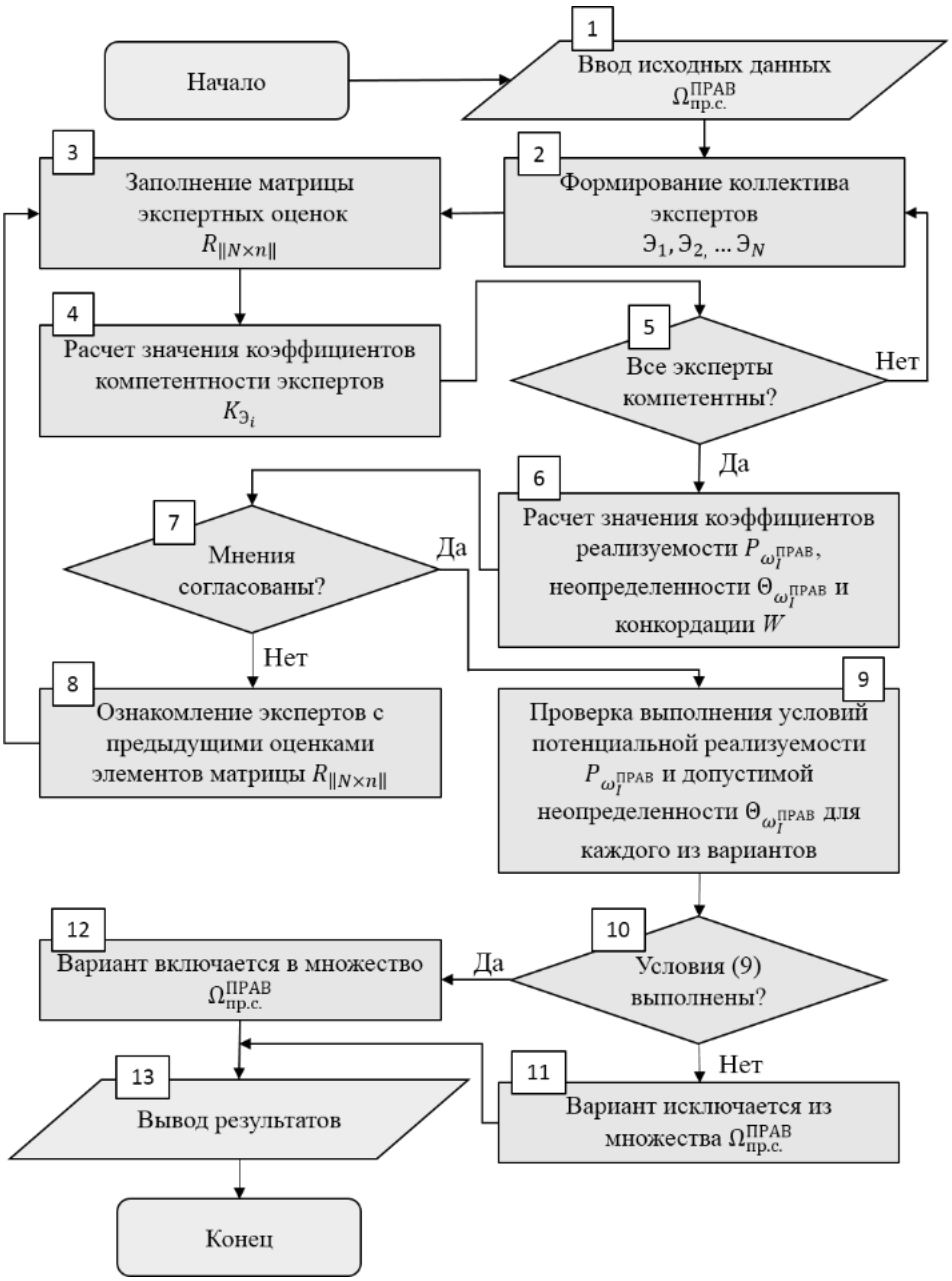

Рисунок 10 – Алгоритм оценивания множества потенциально-реализуемых вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения программы

Заключение

Применение разработанного научного подхода позволит, во первых, расширить информационную базу для анализа решений за счет учета максимально полного множества вариантов программы создания ЖРД; во-вторых, объем анализируемой информации по вариантам существенно уменьшен за счет поэтапного сужения полного множества вариантов к подмножеству потенциально-реализуемых вариантов и их последующей оценки по коэффициентам реализуемости и неопределенности; в третьих, предложенный инструментарий анализа возможности реализации вариантов программы создания ЖРД в условиях ограниченных объемов испытаний и сроков выполнения позволяет выбирать такие рациональные варианты, при которых цель работ будет достигнута с наибольшей вероятностью.

Применение разработанного методического аппарата целесообразно на этапе предпроектного технико-экономического обоснования вариантов программы создания ЖРД и оценки реализуемости этих вариантов.

Список источников

1. Аверкиев Н.Ф., Клюшников В.Ю., Кульвиц А.В., Житников Т.А. Формирование баллистической структуры спутниковой системы малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием электроракетных двигателей // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2025. №2(68). С. 84-91.

2. Перфильев А.С., Пирогов С.Ю., Семенов Е.Н. Анализ эксплуатационной надежности разгонных блоков средств выведения космических аппаратов и пути ее повышения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. №665. С. 223-230.

3. Фиров Н.В. Методика оперативной оценки военно-экономической целесообразности разработки образцов вооружения, военной и специальной техники с заданными тактико-техническими характеристиками // Вооружение и экономика. 2025. №4(74). С. 68-76.

4. Галеев А.Г., Иванов В.Н., Катенин А.В., Лисейкин В.А., Пикалов В.П., Поляхов А.Д., Сайдов Г.Г., Шибанов А.А. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография. Киров: МЦНИП, 2015. 436 с.

5. Оценка научно-технической и производственно-технологической реализуемости проектов на стадиях жизненного цикла сложных технических систем: монография / Под ред. С.Н. Остапенко. Тверь: ОПВЭиФ, 2015. 276 с.

6. Вылегжанин Г.Н., Завьялов И.С., Рымкевич С.Н., Федорова Е.А. Метод оценки реализуемости вариантов развития вооружения, военной и специальной техники ВКО // Вооружение и экономика. 2017. №5(42). С. 23-34.

7. Леонов А.В., Брайткрайц С.Г., Пронин А.Ю. Технологическое прогнозирование на этапах создания перспективного вооружения // Вооружение и экономика. 2025. №4(74). С. 55-67.

8. Методология программно-целевого планирования развития системы вооружения на современном этапе: в 2 ч. / Под общ. ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2013. 519 с.

9. Методы военно-научных исследований систем вооружения: военно-научный труд / Под общ. ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2017. 512 с.

Информация об авторах

А.В. Белянкин – кандидат технических наук, доцент, SPIN 6096-0991, https://orcid.org/0009-0000-0658-3655.

Е.Н. Семенов – кандидат технических наук, SPIN 4933-7402, https://orcid.org/0009-0006-9056-6156.

С.Ю. Герасименко – кандидат технических наук, SPIN 4855-6009, https://orcid.org/0009-0005-1387-5986.

С.Ю. Пирогов – доктор технических наук, профессор, SPIN 2599-2679, https://orcid.org/0009-0006-9054-6177.