

© Богданов Ю.В., Ульянов С.В., Харченко А.П.  
Bogdanov Y., Ulyanov S., Kharchenko A.

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

### METHODICAL APPROACH BY OPTIMIZATION PROCESS ELIMINATE MISSILE SYSTEM

**Аннотация.** В статье на основе анализа процессов ликвидации ракетных комплексов (РК) определены показатели и критерии их эффективности. Сформулирована задача оптимизации процесса ликвидации РК и проведена её декомпозиция на частные подзадачи. Выбраны методы и разработаны алгоритмы их решения.

**Annotation.** In the article on the basis of analysis processes eliminate ракетных комплексов (LCD) определены Indicators and Criteria's effectiveness. Sformulirovana problem optimization process and eliminate the LCD held at the Private Her Decomposition subtasks. Выбраны methods and algorithms razrabotany's decision.

**Ключевые слова.** Ракетный комплекс, процесс ликвидации, метод оптимизации.

**Key words.** Raketnyy complex, process of elimination, method optimization.

#### 1. Показатели и критерии эффективности процесса ликвидации ракетного комплекса

В настоящее время значительная доля ракетных комплексов стратегического назначения эксплуатируется за пределами гарантийных сроков. В ближайшие годы будет прекращена эксплуатация многих комплексов и на замену им на вооружение будут приняты новые перспективные РК. Это требует проведения комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации ракетных комплексов и их составных частей.

Процессы ликвидации РК являются сложными, длительными и дорогостоящими, включают целый комплекс работ по выводу комплексов из эксплуатации, консервации, демилитаризации, подготовке и ремонту автомобильных дорог и участков железнодорожных путей, демонтажу оборудования, приему, передаче, хранению и подготовке к транспортированию элементов РК и ликвидации пусковых установок и пунктов управления пуском путем подрыва.

Все предусмотренные при реализации процесса ликвидации РК работы должны выполняться в строгом соответствии с требованиями нормативно-правовых документов с учетом обеспечения полноты, качества и своевременности их выполнения, безопасности работ и минимальной стоимости проведения работ. Это требует разработки методического аппарата обеспечения эффективности работ по ликвидации РК. Эффективность процесса ликвидации РК определяется:

- полнотой и качеством выполнения работ;
- оперативностью (временем) выполнения работ;
- ресурсоемкостью (стоимостью) работ.

Вследствие того, что исследуемый процесс по своей природе является случайным (зависит от целого ряда случайных факторов), факты успешного выполнения работ являются случайными событиями и характеризуются вероятностями, а продолжительность (время) и стоимость их выполнения – распределениями соответствующих случайных величин.

---

Богданов Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, начальник управления, ФГКУ «4 ЦНИИ Минобороны России»;  
Ульянов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника управления,  
ФГКУ «4 ЦНИИ Минобороны России», тел. 7(495)543-36-76.  
Харченко Александр Петрович – начальник центра, ФГУП «ЦНИИмаш».

Bogdanov Yuri – doctor of technical sciences, professor, head of department, FGKU "4 CRI Russian Defense Ministry";  
Ulyanov Sergey – Ph.D., senior researcher, deputy director, FGKU "4 CRI Russian Defense Ministry", tel. 7 (495) 543-36-76.  
Kharchenko Alexander – head of the center, FSUE "TSNIImash."

С учетом отмеченных обстоятельств в качестве показателей эффективности процесса ликвидации (комплекса работ по ликвидации) РК предлагается использовать [1]:

- вероятности  $p_j^{ycn}$  успешного выполнения работ (с требуемой полнотой и качеством);
- вероятности  $P_j(t_j \leq t_n)$  своевременного выполнения работ (за нормативное время) и вероятности  $P_\Sigma(T_\Sigma \leq t_n)$  своевременного выполнения всего комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК в целом;
- квантильные значения времени  $\bar{t}_{j\beta}$  выполнения работ и суммарного времени  $\bar{T}_{\Sigma\beta}$  выполнения всего комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК с МБР в целом при заданной доверительной вероятности  $\beta$ ;
- квантильные значения стоимости  $\bar{c}_{\beta i}$  выполнения работ и суммарной стоимости  $\bar{C}_{\Sigma\beta}$  выполнения всего комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК с МБР в целом при заданной доверительной вероятности  $\beta$ .

В качестве критериев эффективности процесса ликвидации РК предлагается использовать:

- при необходимости реализации процесса ликвидации РК с минимальными затратами и в отведенные сроки минимальное значение суммарной стоимости выполнения всего комплекса работ в целом при заданных ограничениях по вероятности их своевременного выполнения;
- при необходимости обеспечения максимальной надежности реализации процесса ликвидации РК максимальное значение вероятности своевременного выполнения всего комплекса работ в целом при заданных ограничениях по их суммарной стоимости;
- при необходимости обеспечения минимальной продолжительности реализации процесса ликвидации РК минимальное квантильное (верхнее интервальное) значение времени проведения всего комплекса работ при заданных вероятности  $\beta$  и ограничениях по их суммарной стоимости.

При использовании критерия а) выбирается вариант решений (организации работ)  $\vec{\omega}^*$  по составу исполнителей и технологиям проведения работ, обеспечивающий минимальное значение суммарной стоимости выполнения комплекса работ

$$\vec{\omega}^* = \arg \min_{\vec{\omega}^* \in \Omega} \bar{C}_{\Sigma\beta} (p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{c}(\vec{\omega}^*)), \quad (1)$$

при ограничениях

$$P_\Sigma(t_n, p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{t}(\vec{\omega}^*)) \geq P_{don},$$

где  $\bar{C}_{\Sigma\beta}(\cdot)$  – квантильное значение суммарных затрат на ликвидацию РК;

$t_n$  – нормативное время проведения работ;

$P_\Sigma(\cdot), P_{don}$  – обеспечиваемое и заданное (допустимое) значения вероятности своевременного выполнения работ соответственно ( $P_{don} \in [0, 9 \dots 0, 95]$ ).

При использовании критерия б) выбирается вариант решений  $\vec{\omega}^*$  по составу исполнителей и технологиям проведения работ, обеспечивающий максимальное значение вероятности своевременного выполнения комплекса работ

$$\vec{\omega}^* = \arg \max_{\vec{\omega}^* \in \Omega} P_\Sigma(t_n, p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{t}(\vec{\omega}^*)), \quad (2)$$

при ограничениях

$$\bar{C}_{\Sigma\beta}(p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{c}(\vec{\omega}^*)) \leq C_{don},$$

где  $\bar{C}_{\Sigma\beta}, C_{don}$  – обеспечиваемое и допустимое значения стоимости работ по ликвидации РК соответственно.

При использовании критерия в) выбирается вариант решений  $\vec{\omega}^*$  по составу исполнителей и технологиям проведения работ, обеспечивающий минимальное квантильное (верхнее интервальное) значение времени выполнения комплекса работ при заданной вероятности  $\beta$

$$\vec{\omega}^* = \arg \min_{\vec{\omega}^* \in \Omega} \bar{T}_{\Sigma\beta}(t_n, p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{t}(\vec{\omega}^*)), \quad (3)$$

при ограничениях

$$\bar{C}_{\Sigma\beta}(p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{c}(\vec{\omega}^*)) \leq C_{don},$$

где  $\bar{T}_{\Sigma\beta}$  – квантильное значение суммарной продолжительности процесса ликвидации РК.

## 2. Обобщённый алгоритм оптимизации процесса ликвидации ракетного комплекса

### 2.1. Общие положения

Рассмотрим постановку и решение задачи оптимизации процесса ликвидации РК (выбора рационального варианта организации работ (решений)) в следующем виде: реализация варианта организации работ по ликвидации РК с минимальными затратами и в отведенные сроки {см. п.1, (1)}.

Тогда предлагаемый алгоритм оптимизации процесса ликвидации РК позволит обеспечить выбор рационального варианта организации процесса ликвидации (решения)  $\vec{\omega}^*$  с минимальными суммарными затратами на проведение работ

$$\vec{\omega}^* = \arg \min_{\vec{\omega}^* \in \Omega} \bar{C}_{\Sigma\beta}(p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{c}(\vec{\omega}^*)), \quad (4)$$

при ограничениях

$$P_\Sigma(t_n, p_i^{ycn}(\vec{\omega}^*), \vec{t}(\vec{\omega}^*)) \geq P_{don},$$

где  $\bar{C}_{\Sigma\beta}(\cdot)$  – квантильное значение суммарных затрат на ликвидацию РК;

$t_n$  – нормативное время проведения работ;

$\Omega$  – множество возможных решений;

$P_{\Sigma}(\cdot), P_{\text{дон}}$  – обеспечиваемое и заданное (допустимое) значения вероятности своевременного выполнения работ соответственно ( $P_{\text{дон}} \in [0, 9...0, 95]$ ).

Решаемая задача (4) принадлежит к классу задач структурно-параметрической оптимизации, где в состав оптимизируемых параметров могут входить:

- структурные параметры решений  $\vec{\omega}_1 \in \vec{\omega}$ , определяющие:

- варианты используемых технологий (способов, последовательности) проведения работ по ликвидации РК, утилизации элементов комплексов;

- состав сил, средств и исполнителей (подрядчиков), привлекаемых к выполнению работ;

- места хранения и утилизации оборудования и элементов комплексов;

- используемые виды транспортных средств, способы транспортирования, маршруты движения и др.;

- параметры решений  $\vec{\omega}_2 \in \vec{\omega}$ , определяющие:

- сроки проведения работ;

- количество используемых рабочих мест, персонала, техники, оборудования (комплектов), материалов и веществ и др.

Каждому возможному  $s$ -му варианту значений вектора структурных параметров  $\vec{\omega}_{1s}$  можно поставить в соответствие ориентированный граф  $G_s(\vec{\omega}_{1s})$ , описывающий структуру работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК. Работы в данном графе обозначаются стрелками, а кружками – состояния процесса. Параметрами работ являются их продолжительность и стоимость, зависящие от реализуемых вариантов решений. Введение параметров и наличие контуров и ветвлений превращает граф в стохастическую сетевую модель [4].

Поставленную задачу (4) можно декомпозировать на две последовательно решаемые подзадачи:

1) формирования множества  $G = (G_{\omega})_{\omega \in \Omega}$  возможных вариантов структур стохастической сетевой модели процесса ликвидации РК;

2) определение наилучших значений  $\vec{\omega}^* = (\vec{\omega}_1^*, \vec{\omega}_2^*)$  оптимизируемых параметров и соответствующих значений показателей эффективности процесса ликвидации РК (стоимостных и временных характеристик).

Анализ решаемой задачи показал, что она принадлежит к классу задач дискретной оптимизации и в зависимости от ее размерности может быть решена:

- методами полного перебора вариантов;

- методами последовательного улучшения решений с использованием процедур локального и глобального случайного поиска (Монте-Карло).

В структуру предлагаемого методического подхода входят:

- алгоритмы формирования множества возможных вариантов работ (решений) по ликвидации РК;

- математические модели и алгоритмы оценки показателей эффективности процесса ликвидации РК;

- алгоритм оптимизации процесса ликвидации РК на основе выбора рационального варианта решений по ликвидации РК.

### 2.2. Алгоритмы формирования множества возможных вариантов работ по ликвидации ракетного комплекса

Для формирования множества возможных вариантов работ (решений) по ликвидации РК (возможных вариантов структур стохастической сетевой модели процесса ликвидации РК) разработан описанный ниже алгоритм, основанный на аналитическом методе расчета функций алгебры логики [2].

Для описания принципа работы данного алгоритма представим решения и решаемые задачи (работы) по ликвидации РК в табличной форме, где индексами обозначены (см. табл. 1):

$j_n$  –  $n$ -я задача обеспечения безопасности комплекса;

$\omega_m$  –  $m$ -е решение по обеспечению безопасности комплекса;

$a_{mn}$  – переменная, принимающая значение 1, если в ходе реализации  $m$ -го решения решается  $n$ -я задача, и 0, если задача не решается.

Из таблицы следует, что каждая задача может решаться в ходе реализации различных (является дизъюнк-

Таблица 1

**Решения и решаемые задачи (работы) по ликвидации РК**

Решения по ликвидации РК	Решаемые задачи (проводимые работы)					
	$j_1$	$j_2$	...	$j_n$	...	$j_N$
$\omega_{11}$	$a_{11}$	$a_{21}$	...	$a_{1n}$	...	$a_{1N}$
$\omega_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$	...	$a_{2N}$
...	...	...	...	...	...	...
$\omega_{1m}$	$a_{2m}$	$a_{m2}$	...	$a_{mn}$	...	$a_{mN}$
...	...	...	...	...	...	...
$\omega_{1M}$	$a_{2M}$	$a_{M2}$	...	$a_{Mn}$	...	$a_{MN}$

цией) решений  $\omega_{1m}^n, m = \overline{1, M}$ .

Логическая функция выполнения всей совокупности задач ликвидации РК является конъюнкцией задач  $j_n, n = 1, N$

$$J = \bigwedge_{n=1}^N \left[ \bigwedge_{m=1}^M \omega_{1m}^n \right].$$

Для получения возможных вариантов, обеспечивающих решение всех задач, необходимо раскрыть скобки данного выражения по законам алгебры логики. В результате получим возможные варианты решений, перекрывающие все его дизъюнкции.

Для иллюстрации работы алгоритма рассмотрим пример, представленный в табл. 2.

Таким, образом, с помощью логических операций

Таблица 2

**Пример совокупности решений и задач (работ) по ликвидации РК**

Решения по ликвидации РК	Задачи (работы)				
	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$j_5$
$\omega_{11}$	1	0	1	0	0
$\omega_{12}$	0	1	0	0	1
$\omega_{13}$	0	0	0	1	0
$\omega_{14}$	1	0	0	0	1
$\omega_{15}$	0	0	1	0	0
$\omega_{16}$	0	1	0	0	0

можно записать условия решения задач

$$j_1 : \omega_{11} \vee \omega_{14}; j_2 : \omega_{12} \vee \omega_{16};$$

$$j_3 : \omega_{11} \vee \omega_{15}; j_4 : \omega_{13}; j_5 : \omega_{12} \vee \omega_{14}.$$

Условие решения всех задач

$$j_1 \wedge j_2 \wedge j_3 \wedge j_4 \wedge j_5.$$

Подставляя в данное выражение условие решения каждой задачи, получаем

$$(\omega_{11} \vee \omega_{14}) \wedge (\omega_{12} \vee \omega_{16}) \wedge$$

$$\wedge (\omega_{11} \vee \omega_{15}) \wedge \omega_{13} \wedge (\omega_{12} \vee \omega_{14}).$$

Раскроем скобки данного выражения по законам алгебры логики и получим все возможные варианты решений по обеспечению безопасности комплекса, перекрывающие все его дизъюнкции

$$(\omega_{11} \vee \omega_{14}) \wedge (\omega_{12} \vee \omega_{16}) \wedge (\omega_{11} \vee \omega_{15}) \wedge \omega_{13} \wedge (\omega_{12} \vee \omega_{14}) =$$

$$= (\omega_{11} + \omega_{14}) \cdot (\omega_{12} + \omega_{16}) \cdot (\omega_{11} + \omega_{15}) \cdot \omega_{13} \cdot (\omega_{12} + \omega_{14}) =$$

$$= \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13}}_1 + \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14}}_2 + \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{15}}_3 +$$

$$+ \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15}}_4 + \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{16}}_5 +$$

$$+ \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{16}}_6 + \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{15} \cdot \omega_{16}}_7 +$$

$$+ \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15} \cdot \omega_{16}}_8 + \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{16}}_9 +$$

$$+ \underbrace{\omega_{11} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15} \cdot \omega_{16}}_{10} + \underbrace{\omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15}}_{11} +$$

$$+ \underbrace{\omega_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15} \cdot \omega_{16}}_{12} + \underbrace{\omega_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \omega_{15} \cdot \omega_{16}}_{13}.$$

Множество избыточных вариантов решений является подмножеством сформированного выше множества. Оно образуется путем исключения членов, в которых присутствуют пары решений

$$(\omega_{11}, \omega_{14}), (\omega_{12}, \omega_{16}), (\omega_{11}, \omega_{15}), (\omega_{12}, \omega_{14}),$$

дублирующие выполнение различных задач обеспечения безопасности.

Таким образом, из 13 представленных выше вариантов получим всего два избыточных варианта решений:  $(\omega_{11} \wedge \omega_{12} \wedge \omega_{13})$  и  $(\omega_{11} \wedge \omega_{12} \wedge \omega_{13} \wedge \omega_{14})$ , каждый из которых позволяет решить все пять задач обеспечения безопасности.

С целью исключения из множества возможных вариантов решений заведомо нереализуемых решений необходимо дополнить множество решаемых задач задачами удовлетворения заданных временных и ресурсных ограничений.

При большой размерности решаемой задачи, исчисляемой тысячами и более возможных комбинаций решений, формирование полного набора возможных вариантов решений по ликвидации РК становится практически невозможным. В данном случае предлагается использовать статистический алгоритм формирования множества возможных вариантов ликвидации РК, основанный на методе Монте-Карло [3], представленный на рис. 1.

В блоке 1 алгоритма осуществляется ввод исходных данных по решаемым задачам ликвидации РК, предлагаемым вариантам решений, временным и ресурсным ограничениям.

В блоке 2 данного алгоритма по априорным распределениям структурных параметров генерируются случайные варианты решений по ликвидации РК, реализуемые на стадиях его создания и эксплуатации.

Далее, в блоке 3 вычисляется логическая функция реализации сгенерированного варианта решений. Если ее значение не равно нулю (вариант удовлетворяет всем условиям и ограничениям), то рассматриваемый вариант в блоке 4 включается в множество возможных вариантов решений.

При формировании вариантов решений не допускается их повторение.

Работа алгоритма завершается формированием

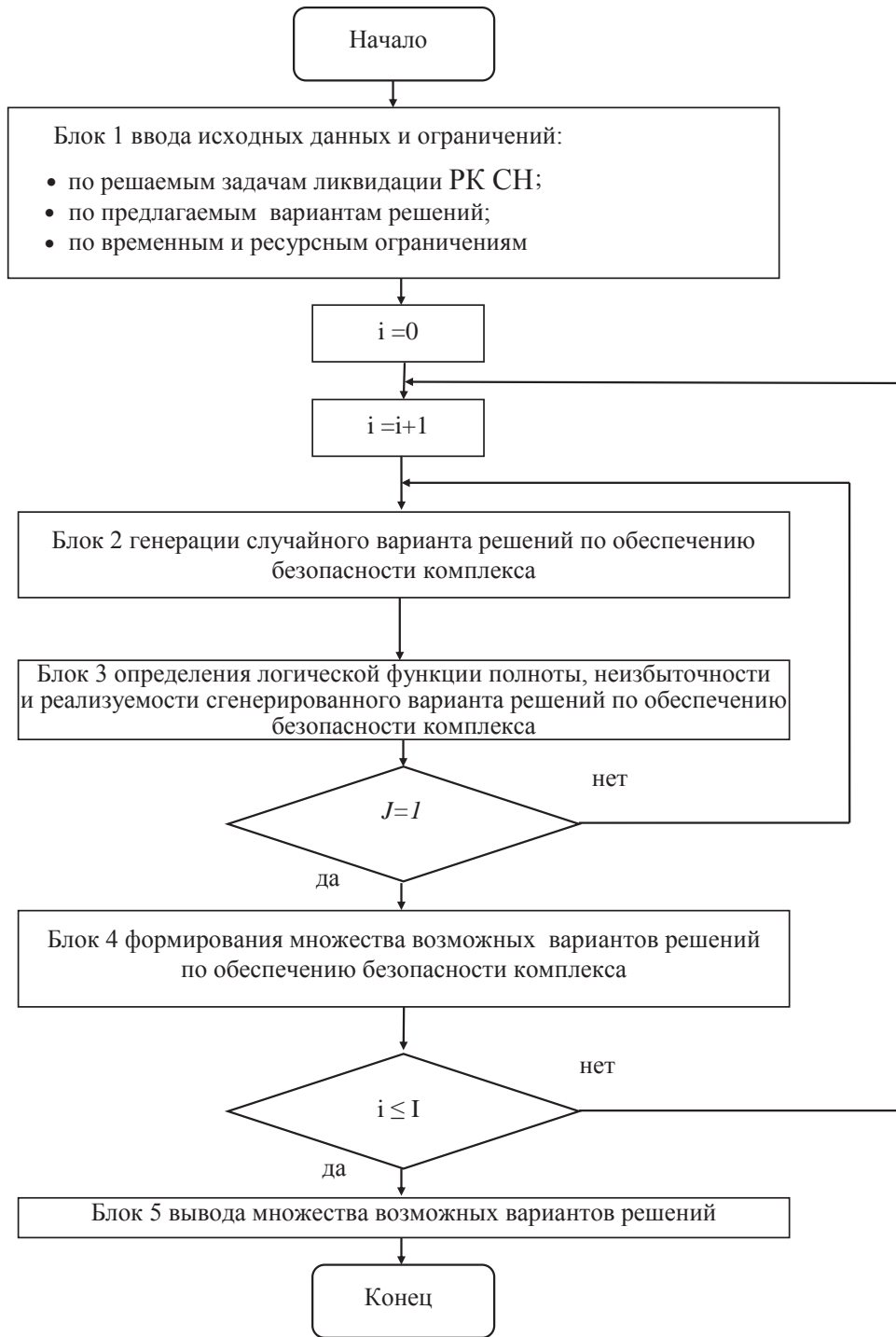


Рис.1. Алгоритм формирования возможных вариантов решений по ликвидации РК

множества  $\Omega$  возможных вариантов решений по обеспечению безопасности комплекса (РК) заданной размерности.

Далее, каждому элементу  $\vec{\omega}$  из множества  $\Omega$  ставится в соответствие ориентированный граф  $G_{\vec{\omega}} \in G$ , вершинам которого соответствуют определенные состояния исследуемого, а ребрам – работы, реализующие выбранные решения по ликвидации РК.

### 2.3. Математические модели оценки показателей эффективности процесса ликвидации ракетного комплекса

Математические модели и математические соотношения для оценки показателей эффективности процесса ликвидации РК представлены в работе [4]. С помощью данных соотношений для каждого рассматриваемого варианта решений  $\vec{\omega}$  из множества возможных реше-

ний  $\Omega$  определяются:

- вероятности  $P_{\Sigma}(T_{\Sigma} \leq t_n)$  своевременного выполнения комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК в целом;
- квантильные значения суммарного времени  $\bar{T}_{\Sigma, \beta}$  выполнения комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК в целом при заданной доверительной вероятности  $\beta$ ;
- квантильные значения стоимости  $\bar{c}_{\beta i}$  выполнения комплекса работ по подготовке к ликвидации и ликвидации РК в целом при заданной доверительной вероятности  $\beta$ .

#### 2.4. Алгоритм оптимизации процесса ликвидации ракетного комплекса

Для решения поставленной задачи (4) необходимо нахождение глобального экстремума функционала (минимума затрат на ликвидацию РК), что требует полного перебора всех возможных вариантов структур сетевых графиков и значений параметров работ, что может быть реализовано при относительно малом числе возможных вариантов решений.

При большом числе варьируемых параметров и их возможных значений поиск рационального решения на основе прямого перебора всех комбинаций параметров вектора решений становится невозможным. Поэтому необходимо применение алгоритма, позволяющего получить решение, близкое к оптимальному, с приемлемыми вычислительными затратами. Для решения данной задачи предлагается применить алгоритм глобального случайного поиска с обучением, основанный на байесовской процедуре, предложенный в работе [3].

Предлагаемый алгоритм в своей основе имеет такую организацию поиска с обучением на сужающемся множестве альтернатив, при которой постепенно выделяются все более предпочтительные допустимые решения.

Сущность алгоритма заключается в следующем.

1. Для анализируемого варианта  $\bar{\omega}_1 \in \Omega$  структуры комплекса работ по ликвидации РК (графа  $G_{\omega}$ ) проводится генерация случайных значений оптимизируемых параметров по априорным бета-распределениям, параметры которых определяются по результатам экспертной оценки.
2. Определяются временные показатели процесса ликвидации РК с использованием стохастической сети данного процесса. Из сгенерированного множества вариантов выбираются только те, которые удовлетворяют ограничениям по длительности процесса ликвидации РК.
3. Определяются значения вероятности своев-

ременного выполнения процесса ликвидации, соответствующие сгенерированному варианту с использованием стохастической сети данного процесса. Формируется множество вариантов ликвидации РК, где каждый вариант удовлетворяет заданным ограничениям.

4. Определяются затраты на ликвидацию РК с использованием моделей, описанных в работе [1]. Производится ранжирование вариантов организации процесса ликвидации РК по критерию минимума суммарных затрат. Варианты, обеспечивающие затраты на ликвидацию РК на уровне не более 10-15% от достигнутого минимального значения суммарных затрат (в пределах точности стоимостных оценок), достигнутого на всех шагах работы алгоритма, считаются успешными, а остальные – неуспешными.

5. Реализуется процедура обучения, для чего определяются параметры апостериорных бета-распределений для параметров решений и циклически повторяются шаги 1..4.

6. Условием прекращения вычислений служит стабилизация параметров бета-распределений значений оптимизируемых параметров и минимального достигнутого уровня суммарных затрат на ликвидацию РК.

Блок-схема алгоритма случайного поиска с обучением представлена на рис. 2.

Оператор 2 предназначен для ввода исходных данных, в частности:

- массива ориентированных дуг графов  $G_{\omega}$  стохастической сетевой модели процесса ликвидации РК;
- массивов априорных оценок временных  $(\hat{m}_i, \hat{\sigma}_i, t^{\min}, t^{\max})_{\omega}$  и стоимостных  $(\hat{m}_c, \hat{\sigma}_c, c^{\min}, c^{\max})_{\omega}$  показателей работ сетевых графов  $G_{\omega}$ ;
- массива минимальных, максимальных и наиболее вероятных значений оптимизируемых параметров.

Оператор 3 является счетчиком, который необходим для предотвращения заклинивания алгоритма оптимизации, когда задача оптимизации не будет иметь решения. Подобная ситуация, в частности, может возникнуть при невыполнении ни одного из ограничений в силу их заниженных (завышенных) значений. В этом случае при определенном значении счетчика произойдет останов программы.

Оператор 4 предназначен для моделирования априорного бета-распределения значений параметров.

Оператор 5 представляет собой подпрограмму определения квантильных оценок временных показателей процесса экспериментальной отработки.

Оператор 7 представляет собой подпрограмму расчета вероятности  $P_m$  своевременной ликвидации РК

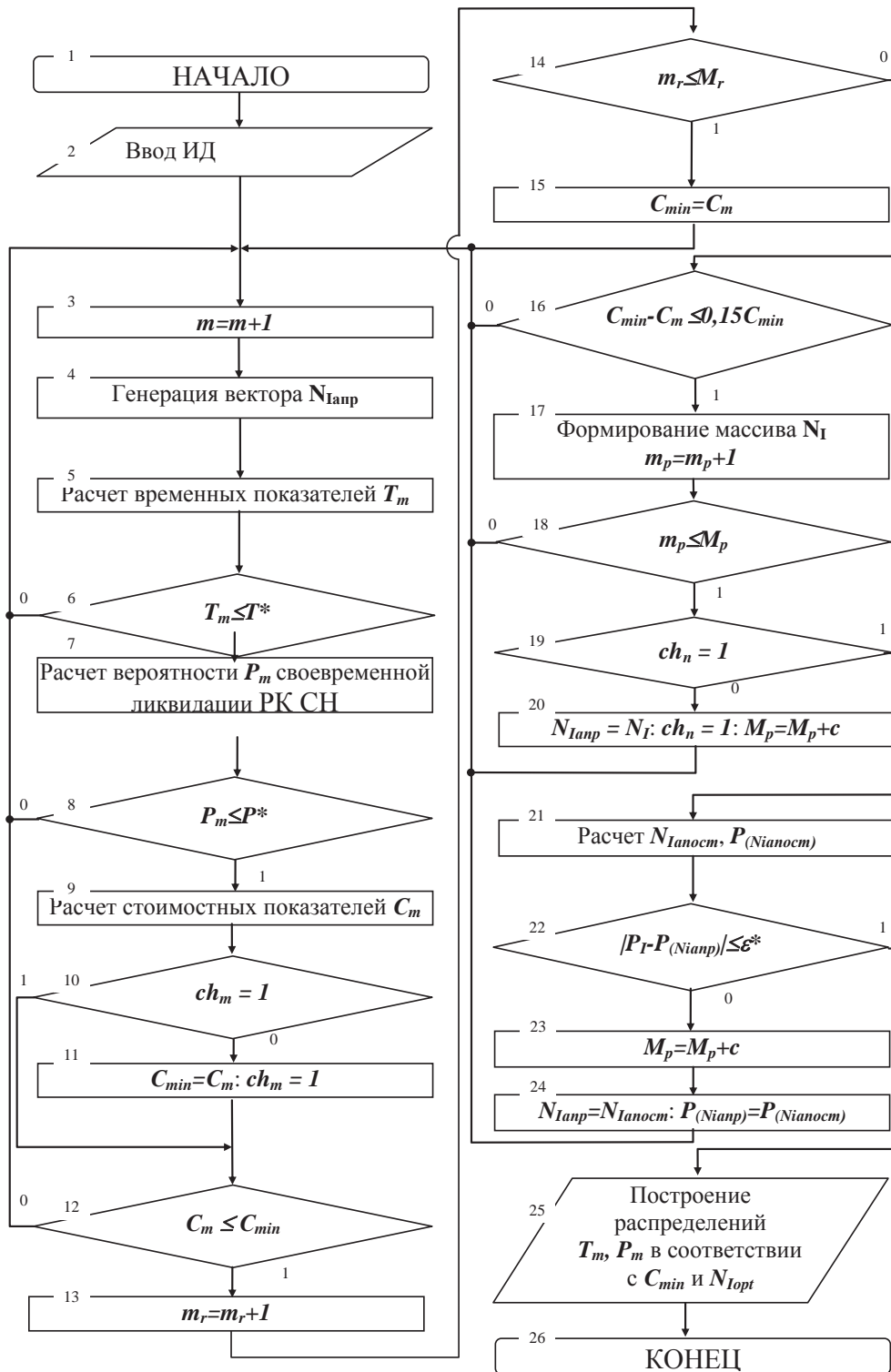


Рис.2. Блок-схема алгоритма случайного поиска с обучением

с использованием преобразований, представленных в разделе 2.

Оператор 8 предназначен для выбора рационального варианта решений среди  $m$ -х циклов моделирования алгоритма оптимизации.

Оператор 9 представляет собой подпрограмму определения квантильных оценок суммарной стоимости процесса экспериментальной отработки.

Для расчета стоимости в алгоритме оптимизации не требуется определение вероятностных параметров распределения стоимостных показателей процесса отработки, поэтому достаточно единичной реализации цикла моделирования.

Операторы 10 и 11 технологические. Предназначены для формирования первоначального минимального значения затрат на проведение отработки при первой

$m$ -й реализации алгоритма оптимизации, при которой сгенерированный вариант проведения экспериментальной отработки удовлетворяет ограничениям по времени ( $T_m \leq T^*$ ) и требованиям к вероятности своевременного выполнения работ по ликвидации РК.

Оператор 12 предназначен для выбора из пространства возможных исходов варианта решений, обеспечивающей минимум затрат на ликвидацию РК  $R_m \leq R^*$ .

Счетчик 13 предназначен для подсчета вариантов  $m_r$ -х реализаций алгоритма оптимизации ( $m_r \in M$ ), при которых сгенерированный вариант решений удовлетворяет ограничениям по времени ( $T_{pm} \leq T^*$ ) и требованиям по вероятности своевременного выполнения работ.

Оператор 14 предназначен для контроля необходимого количества  $M_r$  реализаций вариантов организации процесса ликвидации РК, предназначенных для поиска минимума оптимизационной задачи.

Оператор 15 фиксирует каждый новый  $m_r$ -й вариант решений, удовлетворяющий условию оператора 12 и соответствующее этому варианту значение затрат на ликвидацию РК.

Оператор 17 предназначен для формирования гистограмм распределения значений оптимизируемых параметров по результатам  $M_p$  реализаций вариантов экспериментальной отработки, удовлетворяющих условию

$$\left| (\bar{C}_{\Sigma\beta}^{\min}) - (\bar{C}_{\Sigma\beta^*}^{\min}) \right| \leq 0,15 (\bar{C}_{\Sigma\beta}^{\min}).$$

Оператор 18 контролирует количество реализаций алгоритма  $M_p$ , необходимых для корректного определения параметров распределений значений оптимизируемых параметров.

После получения  $M_p$  реализаций для следующей итерации построения гистограмм распределения счетчик  $M_p$  наращивается на  $s=M_p$  циклов.

По аналогии с набором операторов 10, 11, набор технологических операторов 19, 20 предназначен для формирования при первой  $m_p$ -й реализации алгоритма оптимизации значений априорных бета-распределений количества циклов испытаний (в виде количества "попа-

даний" и частотности «попаданий» значений параметров в  $k$ -й интервал гистограммы с тем, чтобы по результатам следующей ( $m_p+1$ )-й реализации получить уточненную оценку параметров распределения

Оператор 21 предназначен для объединения априорного и апостериорного значений распределений значений оптимизируемых параметров по окончании серии  $M_p$  циклов оптимизации с целью повышения точности полученных результатов.

Оператор 22 предназначен для контроля за отключением частотностей, полученных на  $m_p$ -м шаге оптимизации от значений, полученных на ( $m_p-1$ )-м шаге, являющегося признаком останова процесса оптимизации.

Оператор 25 предназначен для построения распределений временных и стоимостных показателей процесса ликвидации РК для рационального варианта решений, полученного по результатам оптимизации и удовлетворяющего заданным требованиям

В результате решения оптимизационной задачи среди альтернативных вариантов решений по ликвидации РК находится вариант, являющийся рациональным с точки зрения минимума суммарных затрат и удовлетворяющий ограничениям по своевременности реализации процесса

Таким образом, в статье предложен методический подход к оптимизации процесса ликвидации данных комплексов, включающий:

- комплекс показателей и критериев эффективности процесса ликвидации РК;
- математические модели и алгоритмы оценки показателей эффективности процесса ликвидации РК;
- обобщенный алгоритм оптимизации процесса ликвидации РК, включающий алгоритмы формирования множества возможных вариантов решений по ликвидации РК и алгоритм оптимизации процесса ликвидации РК.

#### Литература

1. Богданов Ю.В., Ульянов С.В. Показатели оценки эффективности процесса отработки системы эксплуатации РКК. –М.: НИИЦПТ МИА, "Космос на страже Родины", том 2, 2001, с. 7-8.
2. Богданов Ю.В., Лут МА, Шаргин Ю.Г. Методический подход к определению оптимальной структуры процесса наземной экспериментальной отработки перспективных КАДФ и их составных частей. –М.: НИИЦПТ МИА "Двойные технологии" №4, 2005, с. 5-9.
3. "Богданов Ю.В., Ульянов С.В., Бакланов В.И. Алгоритм обоснования контрольных уровней эксплуатационно-технических характеристик РКК на этапе отработки. –М.: НИИЦПТ МИА, "Космос на страже Родины", том 2, 2001, с. 8-10.
4. Богданов Ю.В., Меньшиков В.А. Отработка системы эксплуатации РКК. М.: КОСМО, 1997, 384 с.

Материал поступил в редакцию 19. 06. 2014 г.