

## МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ НАЗЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Логунов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Специальное конструкторское бюро «Титан», Санкт-Петербург, Россия (195030, г. Санкт-Петербург, ул. Химиков, д. 24)

---

Характерной особенностью обоснования вариантов модернизации составных частей наземных комплексов в современных условиях является наличие существенной неопределенности, обусловленной сложностью решаемой задачи и ограниченным объемом доступных исходных данных. Эта неопределенность, с одной стороны, затрудняет оценку степени влияния модернизации на показатели надежности и эксплуатационных затрат. С другой стороны, она влияет и на сложность выбора наиболее предпочтительных вариантов модернизации из-за наличия многокритериальности и недетерминированности целевых функций выбора. С научной точки зрения задача модернизации составных частей наземных комплексов может рассматриваться в двух аспектах: в широком - как задача оптимального управления развитием сложных динамических систем в условиях неопределенности, в узком – как задача управления состоянием составных частей наземных комплексов на стадии эксплуатации. В данной статье приведены основные результаты исследований, посвященных решению научной задачи обоснования вариантов модернизации составных частей наземных комплексов с учетом прогнозируемых значений показателей надежности и эксплуатационных затрат.

---

Ключевые слова: показатели надежности, ракетно-космические комплексы, техническое состояние.

## METHOD OF FEASIBILITY STUDY OPTIONS FOR THE MODERNIZATION OF THE PARTS GROUND BASED COMPLEXES

Logunov A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise "Special Design Bureau "Titan", St. Petersburg, Russia (195030, St. Petersburg, Khimikov st., 24)

---

A characteristic feature of the study of upgrade components of ground facilities in modern conditions is the existence of a material uncertainty due to the complexity of the problem being solved and the limited amount of available raw data. This uncertainty, on the one hand, makes it difficult to estimate the degree of influence modernization reliability and operational costs. On the other hand, it also affects the difficulty of choosing the most preferred embodiments of modernization because of multicriteriality target and non-determinism of the wave functions of choice. From a scientific point of view, the task of modernizing the components of ground complexes can be viewed in two ways: a broad - as an optimal control by the development of complex dynamic systems under uncertainty, in a narrow - as the problem of state management of components of terrestrial systems at the operational stage. This article presents the main results of studies on solving the scientific study of the variants of the problem of modernization of components of terrestrial systems, taking into account the predicted values of reliability and operating costs.

---

Keywords: reliability, launching facilities, the technical condition.

### Введение

В настоящее время возрастает роль наземной космической инфраструктуры (НКИ) в обеспечении выполнения задач, возложенных на космические системы и комплексы различного назначения.

Важную роль в составе НКИ играют различные наземные комплексы (НК) и их составные части (СЧ), к которым относятся, в частности, агрегаты и системы наземного технологического оборудования, задействованные при подготовке к пуску, при пуске и управлении выведением космических аппаратов на орбиту, а также вспомогательное оборудование,

предназначенное для обеспечения условий нормального функционирования перечисленных объектов.

Вследствие неравнопрочности, объективно присущей составным частям НК, они неравномерно расходуют заложенный при проектировании и изготовлении запас технического ресурса. Часть систем и агрегатов подвергается не только физическому, но и моральному старению из-за изменения требований к составу и качеству выполнения целевых функций.

В этих условиях невозможно обеспечить выполнение задач, возлагаемых на СЧ НК, только за счет проведения технического обслуживания, ремонта оборудования и продления назначенных показателей его ресурса без модернизации.

### **Постановка задачи исследований**

К наиболее важным и ответственным СЧ НК, в частности, можно отнести элементы технологического и вспомогательного оборудования стартовых, технических комплексов и заправочно-нейтрализационных станций.

Проведенный анализ показал, что для СЧ НК характерны:

- важность и интенсивность выполняемых задач,
- структурная и функциональная сложность,
- динамичность изменения технического состояния,
- ограниченность имеющихся материальных и финансовых ресурсов,
- существенная ограниченность объема исходных данных как о фактическом состоянии СЧ НК, так и о возможностях его улучшения.

Под модернизацией СЧ НК будем понимать один из путей улучшения функциональных свойств СЧ НК, повышения их эксплуатационной надежности, снижения эксплуатационных затрат, состоящий в изменении отдельных деталей и узлов СЧ НК, применении принципиально новых технических решений и совершенствования системы эксплуатации СЧ НК.

Характерной особенностью обоснования вариантов модернизации СЧ НК в современных условиях является наличие существенной неопределенности, обусловленной сложностью решаемой задачи и ограниченным объемом доступных исходных данных. Эта неопределенность, с одной стороны, затрудняет оценку степени влияния модернизации на показатели надежности и эксплуатационных затрат. С другой стороны, она влияет и на сложность выбора наиболее предпочтительных вариантов модернизации из-за наличия многокритериальности и недетерминированности целевых функций выбора.

Вопросы управления техническим состоянием заправочного оборудования стартовых комплексов с учетом частичной его модернизации исследованы в докторской диссертации Пенькова М.М., отдельные аспекты обоснования вариантов модернизации средств полигонного измерительного комплекса с учетом их физического и морального старения рассмотрено

ны в работе Шестопаловой О.Л. Однако в целом вопросы обоснования вариантов модернизации составных частей НК с учетом достигаемой надежности и степени снижения эксплуатационных затрат в условиях ограниченного объема исходных данных перечисленными авторами не рассматривались.

В связи с этим можно говорить об **актуальности решения научной задачи** обоснования вариантов модернизации составных частей наземных комплексов с учетом прогнозируемых значений показателей надежности и эксплуатационных затрат.

**Целью работы** является создание научно-методического обеспечения обоснования вариантов модернизации СЧ НК с учетом прогнозируемых значений показателей надежности и эксплуатационных затрат.

По причинам высокой сложности и большой размерности сформулированная научная задача была декомпозирована на ряд частных, логически связанных задач. Взаимосвязь частных задач и этапность их решения представлены на рисунках 1 и 2.

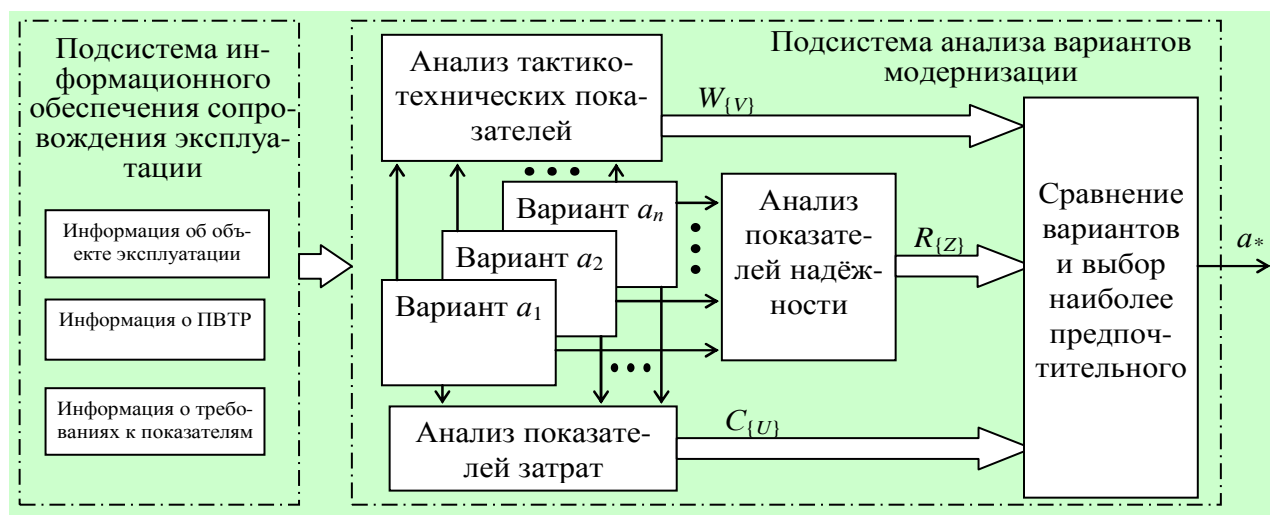


Рис. 1 - Взаимосвязь частных задач обоснования варианта модернизации составных частей наземных комплексов

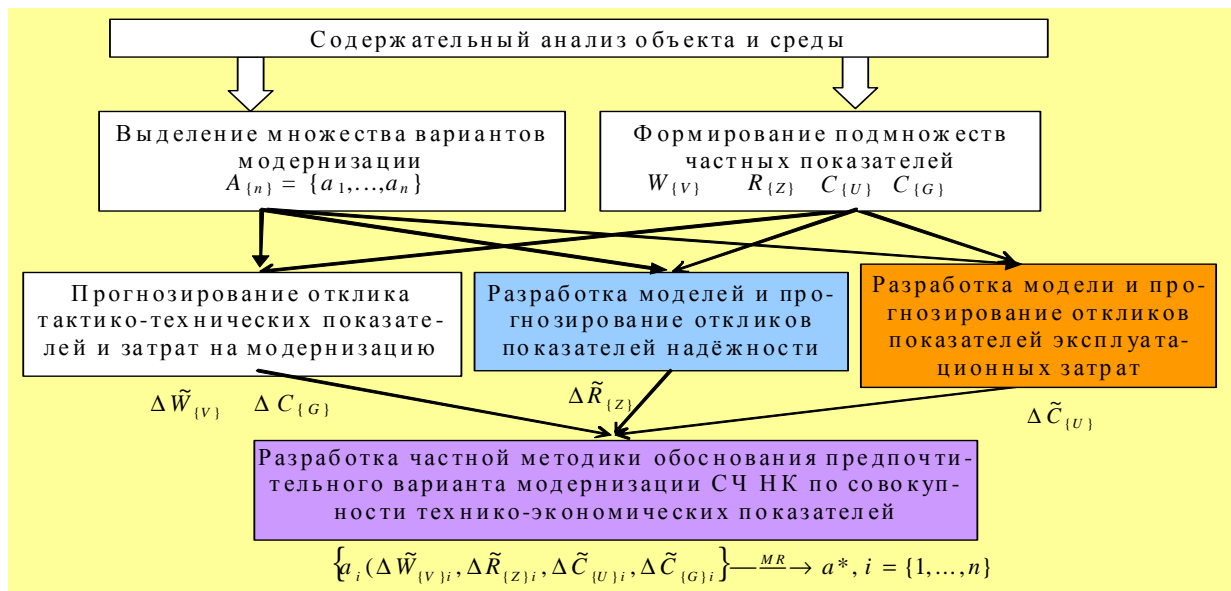


Рис. 2 - Этапы решения научной задачи исследований

Далее подробнее остановимся на рассмотрении полученных в работе результатов, позволяющих

- во-первых, провести анализ выделенных вариантов модернизации СЧ НК [3] с исследованием степени влияния решений по модернизации на характеристики надежности СЧ НК и эксплуатационные затраты;
- во-вторых, обосновать выбор наиболее предпочтительного варианта развития СЧ НК в условиях векторного характера предпочтений и фактической неопределенности исходных данных [1], носящей комбинированный нечетко-стохастический характер.

В ходе исследований разработаны модели прогнозирования совокупного отклика показателей надежности СЧ НК на модернизацию.

В основу моделей положено представление условий наступления отказов СЧ НК с помощью деревьев отказов (1-4), что позволяет связать изменения надежности отдельных элементов, достигаемые в ходе их модернизации, с общей надежностью СЧ НК.

### Логическая функция работоспособности СЧ НК

$$y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) = y(X_{\langle n \rangle}). \quad (1)$$

а) расчет через минимальные пути

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigvee_{l=1}^d R_l = \bigvee_{l=1}^d \left[ \bigwedge_{i \in K_{R_l}} x_i \right] = 1, \quad (2)$$

б) расчет через минимальные сечения

$$y(x_1, \dots, x_n) = \bigwedge_{j=1}^m S_j = \bigwedge_{j=1}^m \left[ \bigvee_{i \in K_{S_j}} x_i \right] = 1, \quad (3)$$

## Вероятностная функция работоспособности СЧ НК

$$P\{y(X_{<n>}) = 1\} = \varphi(p_1, \dots, p_i, \dots, p_n). \quad (4)$$

Получены аналитические выражения, описывающие зависимости прогнозных оценок совокупных откликов показателей надежности СЧ НК от приращений вероятностей безотказной работы элементов, а именно:

- для совокупного отклика вероятности безотказной работы;
- для совокупного отклика средней наработки на отказ;
- для совокупного отклика коэффициента готовности;
- для совокупного отклика коэффициента оперативной готовности.

В представленных в работе моделях при расчетах значений совокупного отклика показателей надежности СЧ НК на модернизацию используются оценки коэффициентов значимости и надежности [4] только модернизируемых элементов, что позволяет значительно уменьшить размерность решаемой задачи и снизить затраты времени и ресурсов на подготовку исходных данных.

Для учета степени влияния модернизации СЧ НК на характеристики экономичности процесса эксплуатации разработана модель прогнозирования совокупного отклика показателей эксплуатационных затрат на модернизацию СЧ НК (выражения 5 и 6).

$$\Delta C_{\mathcal{O}} = \sum_{i=1}^K [\tilde{S}_{T_{MOD}i}^{Cp} - (-1)^{\nu} \beta_i^{\text{Эф.МОД}} \tilde{S}_{T_{MOD}i}^{Cp}], \quad (5)$$

где  $\tilde{S}_{T_{MOD}i}^{Cp}$  - прогнозная оценка наиболее вероятных значений  $i$ -й составляющей средних удельных эксплуатационных затрат без модернизации, рассчитанная на планируемый момент модернизации  $T_{MOD}$ ;

$K$  - число составляющих средних удельных эксплуатационных затрат;

$\nu$  - коэффициент направленности модернизации (при  $\nu=0$  модернизация положительно влияет на сокращение эксплуатационных затрат, соответственно, при  $\nu=1$  эксплуатационные затраты после модернизации возрастают);

$\beta_i^{\text{Эф.МОД}}$  - коэффициент эффективности влияния модернизации СЧ НК на изменение  $i$ -й составляющей средних удельных эксплуатационных затрат:

$$\beta_i^{\text{Эф.МОД}} = \frac{\bar{C}_i^{\text{МОД}}}{C_i}, \quad (6)$$

где  $\bar{C}_i^{\text{МОД}}$  - усредненная экспертная оценка значения  $i$ -й составляющей эксплуатационных затрат СЧ НК после модернизации;

$\bar{C}_i$  - усредненная экспертная оценка значения  $i$ -й составляющей эксплуатационных затрат СЧ НК до модернизации.

При этом проанализирована структура эксплуатационных затрат, выделены ее основные составляющие и получены аналитические выражения для прогнозирования их значений.

В условиях невозможности или нежелательности преобразования нескольких частных показателей вариантов модернизации к одному обобщенному показателю в работе предложена *частная методика обоснования предпочтительного варианта модернизации СЧ НК по совокупности технико-экономических показателей*, представленная на рисунке 3.

Предполагается, что множество возможных альтернативных вариантов модернизации сформировано (блок «Шаг 1»). Рассматриваются несколько частных показателей предпочтительности вариантов, сгруппированных в три подмножества: тактико-технические показатели, показатели надежности и показатели затрат (блок «Шаг 2»). Для каждого частного показателя варианта модернизации задано свое критическое значение, приближаться к которому при выборе альтернатив крайне нежелательно.

При этом как сами оценки частных показателей, так и их критические значения в условиях недостаточности исходной информации могут представляться в нечеткой форме [5] (блок «Шаг б»), что позволяет смягчить условия информационных ограничений за счет привлечения для решения задачи дополнительной экспертной информации.

Выбор вариантов модернизации предложено осуществлять по максиминному критерию (выражение 1 на рисунке 3).

Задача выбора наиболее предпочтительной альтернативы сводится при этом к задаче поиска минимальной нечеткой оценки удаления каждой альтернативы от критического значения по всем частным показателям и затем выбора среди таких альтернатив наилучшей по максимальному удалению.

Основные результаты работы апробированы при обосновании варианта модернизации автоматической системы пожаротушения технического комплекса ракет космического назначения «Протон».

При этом были исследованы возможные виды систем автоматического пожаротушения, из них выбраны газовые и водяные, как наиболее пригодные для помещений монтажно-испытательного корпуса космодрома. С использованием опубликованных в технической литературе сведений (в частности, в работах профессора В.В. Козлова) уточнена модель расчета обобщенного показателя эффективности пожаротушения [2]. Оценены частные показатели для трех вариантов модернизации системы автоматического пожаротушения (газовой, водяной с тонкодисперсной водой и водяной дренчерной).

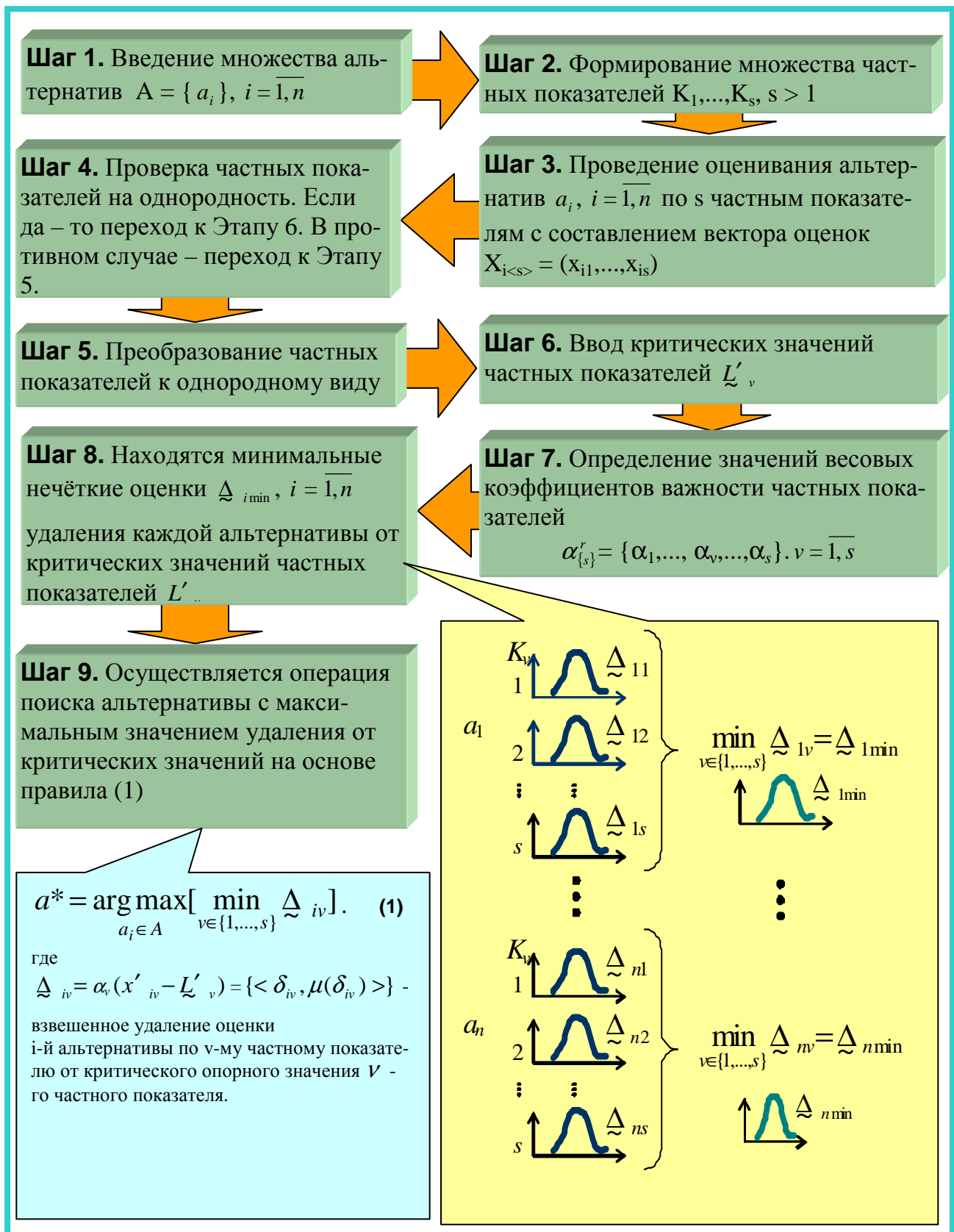


Рис. 3 - Частная методика обоснования предпочтительного варианта модернизации СЧ НК по совокупности технико-экономических показателей

Обоснован в качестве предпочтительного вариант водяной системы пожаротушения тонкодисперсной водой (вариант 3 в таблице 1). Одновременно разработаны технические

предложения по повышению эффективности автоматической системы пожаротушения тонкодисперсной водой, защищенные тремя патентами на полезные модели. Научная обоснованность полученных результатов подтверждается достаточно малым (на 5-7%) расхождением показателей, полученных теоретическими расчетами и практическими исследованиями.

Таблица 1 – Результаты прогнозирования абсолютных значений частных показателей вариантов модернизации системы автоматического пожаротушения

Вариант АСП	Эффективность пожаротушения АСП	Надежность АСП		Экономичность АСП	
		Коэф-т опер. готовности (примерно)	Технический ресурс (лет)	Затраты на создание (млн руб)	Затраты на эксплуатацию (млн руб в год) (примерно)
1	10,2	0,95	10,6	1,5	0,36
2	8,3	0,97	10,5	0,75	0,45
3	7,7	0,999	15,3	0,35	0,25

Вариант 1 – газовая АСП. Вариант 2 – водяная дренчерная АСП.

Вариант 3 – АСП с ТДВ

Технический эффект подтверждается тем, что разработанные технические предложения положены в основу формирования вариантов модернизации СЧ НК и защищены тремя патентами на полезные модели.

Экономический эффект заключается в снижении затрат на модернизацию и последующую эксплуатацию примерно в 1,3 раза.

Таким образом, по совокупности полученных результатов можно сделать вывод о том, что поставленная научная задача в целом решена и цель работы достигнута.

### Список литературы

1. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига : Зинатне, 1990. - 184 с.
2. Козлов В.В. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры (монография) / В.В. Козлов, Н.Д. Аникейчик, О.В. Антропов и др. — СПб. : БХВ-Петербург, 2006. - Т. 1. Объекты космической инфраструктуры. - 400 с.
3. Логунов А.В. Моделирование изменения технического состояния потенциально опасных объектов наземных комплексов на основе принципа многоуровневой идентификации / П.Е. Бессонов, А.В. Логунов // Вестник СПбО АИН. – СПб., 2009. – № 6.
4. Миронов А.Н. Методы анализа надёжности и критичности отказов сложных систем / В.Г. Афанасьев, В.А. Зеленцов, А.Н. Миронов. – МО РФ, 1992. – 99 с.
5. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. - М. : Наука, 1981. – 208 с.



**Рецензенты:**

Смагин В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

Миронов А.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.