

На правах рукописи



КУТНИК Ирина Владимировна

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ЦЕЛЕВЫХ РАБОТ
И НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:	Курицын Андрей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, главный специалист ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина», профессор кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ
Официальные оппоненты:	Клюшников Валерий Юрьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный ученый секретарь АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» Пичугин Сергей Борисович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»
Ведущая организация:	Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ имени М.В.Ломоносова)

Защита состоится « 12 » декабря 2024 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ по адресу: https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182712.

Автореферат разослан « __ » _____ 2024 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4 Учёный совет МАИ.

**Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.03
доктор технических наук**



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена формированию метода определения состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных пилотируемых космических комплексов (ПКК) путем разработки математического и программно-алгоритмического обеспечения данного процесса. Метод предназначен для формирования программ научно-прикладных исследований (НПИ)/ целевых работ (ЦР) и программ подготовки космонавтов по ЦР для перспективных ПКК с целью наиболее эффективного выполнения программ НПИ.

Объектом исследования является программа целевых работ на борту ПКК.

Предметом исследования является процесс выполнения космонавтами программ целевых работ на борту перспективных пилотируемых космических аппаратов.

Актуальность работы объясняется следующим.

Современная концепция развития пилотируемой космонавтики, как в нашей стране, так и за рубежом, предусматривает создание и развертывание ПКК, рассчитанных на длительный период эксплуатации, и тем самым значительно расширяющих потенциал НПИ в интересах социально-экономического развития стран мира.

Окончание программы Международной космической станции в ближайшие годы приведет к созданию и эксплуатации Российской орбитальной станции. Разрабатываемая в настоящее время программа освоения Луны и окололунного пространства будет также включать проведение значительного числа НПИ/ЦР.

Таким образом, исходя из следующих причин:

–увеличения объемов и направлений НПИ/ЦР на борту современных и перспективных ПКК;

–разработки перспективных космических программ, предусматривающих дальнейшее проведение научных исследований на околоземной орбите, на Луне и в дальнем космосе;

–возможности использования информационных технологий для выбора состава комплексов НА ПКК, формирования программ НПИ/ЦР и программ подготовки космонавтов,

с целью обеспечения наиболее эффективного выполнения космонавтами программ НПИ/ЦР на перспективных ПКК в работе поставлена основная научная задача исследований: *разработка методики математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных ПКК с учетом предъявляемых ограничений.*

Цель исследования: разработка метода определения состава ЦР и НА перспективных ПКК на основе системного подхода и фактографического описания ЦР с учетом опыта эксплуатации существующих ПКК для повышения эффективности выполнения космонавтами программ целевых работ.

Для достижения поставленной цели работы в диссертации поставлена и решена следующая совокупность задач:

1) Анализ опыта выполнения космонавтами программ космических экспериментов на борту существовавших и современных ПКК;

2) Формирование метода определения состава ЦР и НА перспективных ПКК с учетом требований к комплексу НА на основе фактографического описания ЦР и использования аппарата дискретной математики;

3) Разработка методики математического и программно-алгоритмического обеспечения процесса выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК с использованием современных информационных технологий;

4) Определение степени важности направлений НПИ на борту перспективных ПКК;

5) Разработка автоматизированной информационной системы учета ЦР (АИСУЦР) с целью формирования комплекса НА перспективных ПКК, определения программ целевых работ и программ подготовки экипажей ПКК.

В соответствии с поставленными задачами работа структурно состоит из 4-х разделов и 4-х приложений.

Методы исследования, используемые при решении поставленной в работе научной задачи: анализ опыта полетов экипажей ПКК, контент-анализ нормативных документов, теоретический анализ и обобщение научной и методической литературы, методы теории вероятностей, математической статистики, дискретной математики, теории четких множеств, метод математического моделирования, метод экспертных оценок.

Достоверность результатов подтверждается использованием для исследований известных апробированных теорий и методов, использованием результатов космических полетов экипажей МКС-1 – МКС-68, применением при исследованиях реальных статистических данных и экспертных оценок, проведением экспериментальных исследований при подготовке экипажей МКС.

Автор в своих исследованиях опирается на труды отечественных и зарубежных ученых в области управления космическими полетами, подготовки космонавтов, системного анализа, информационного управления: Акулова О.А., Боднера В.А., Бранца В.Н., Вентцель Е.С., Грешилова А.А., Дегтярёва Ю.И., Демина Л.С., Егорова А.И., Зинченко В.П., Жука Е.И., Климука П.И., Крючкова Б.И., Кубасова В.Н., Курицына А.А., Лысенко Л.Н., Любинского В.Е., Микрина Е.А., Наумова Б.А., Ногина В.Д., Новикова А.М., Подиновского В.В., Советова Б.Я., Соловьёва В.А., Сорокина И.В., Цехановского В.В., Шукшунов В.Е., Ярополова В.И., Russel L. Ackoff, J.G. Kemeny, J.L. Snell, G.L. Tompson, Gavriel Salvendy, Maurice W. Sasieni.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в результате проведенного исследования процесса подготовки космонавтов и выполнения космонавтами программы ЦР на борту МКС, разработаны составляющие математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК на основе опыта полетов экипажей ПКА:

- сформирован метод определения состава ЦР и НА перспективных ПКК с учетом требований к комплексу НА на основе фактографического описания бортовой ЦР с использованием аппарата дискретной математики;

- разработана математическая модель процесса формирования программы ЦР и состава НА ПКК, которая отличается от существующих использованием аппарата многокритериальной оптимизации с учетом разработанных критериев, логических и количественных параметров;

- сформирована новая методика математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава НА перспективных ПКК и формирования программ подготовки космонавтов с использованием АИСУЦР;

- впервые определены количественные показатели степени важности существующих направлений и разделов направлений НПИ на борту перспективных ПКК применительно к РОС и лунной программе;

- предложен автоматизированный алгоритм формирования программы ЦР и НА ПКК, включающий основные компоненты данного технологического процесса, который базируется на использовании АИСУЦР.

Все результаты, представленные в диссертации, **получены автором лично или при его непосредственном участии**. При непосредственном участии автора сформированы предложения по совершенствованию процесса выполнения космонавтами программ ЦР на борту современных и перспективных ПКК, представлено фактографиче-

ское описание ЦР применительно к функционированию ПКК, на основании которых автором лично разработаны математическая модель формирования программы ЦР и состава научной аппаратуры ПКК, методика программно-алгоритмического обеспечения выбора состава комплексов НА перспективных ПКК с использованием автоматизированной информационной системы управления целевых работ (АИСУЦР).

Автором разработан автоматизированный алгоритм формирования программы ЦР (комплекса научной аппаратуры (КНА)) для ПКК, структура АИСУЦР обеспечения выбора состава КНА перспективных ПКК.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что по результатам исследований разработаны методические основы математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава НА перспективных ПКК, формирования программ ЦР и программ подготовки космонавтов по ЦР для перспективных ПКК с целью обеспечения наиболее эффективного выполнения космонавтами программ пилотируемых полетов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Метод определения состава ЦР и НА перспективных ПКК на основе фактографического описания ЦР и использования аппарата дискретной математики;

2) Математическая модель процесса формирования программы ЦР и НА ПКК для решения задачи планирования с использованием математического аппарата дискретной математики, многокритериальной оптимизации, предложенного показателя эффективности;

3) Методика математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК, основывающаяся на выявленных факторах, влияющих на формирование программы ЦР на борту ПКК, сформулированных методических принципах, разработанных математической модели и алгоритме с использованием автоматизированной информационной системы учета ЦР;

4) Показатели степени важности направлений НПИ на борту перспективных ПКК, рассчитанные на основе экспертной оценки специалистов космической отрасли и профессиональных космонавтов;

5) Структура и порядок использования АИС учета ЦР с применением задач-запросов, позволяющая сократить время на выполнение расчётных операций.

Автор исследований является ведущим специалистом по подготовке космонавтов к выполнению программы НПИ/ЦР, непосредственно проводил подготовку 33-х основных экипажей МКС.

Результаты проведенных исследований применялись при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по выбору программ ЦР и состава НА перспективных ПКК, состава средств подготовки космонавтов, отчетов по итогам подготовки и выполнения космических полетов экипажей МКС, а также при создании нормативной документации и обеспечения подготовки космонавтов на технических средствах. Результаты, полученные в работе, использованы при формировании программ экспериментов при проведении международных экспериментальных исследований с участием человека «SIRIUS 21» на базе ГНЦ РФ-ИМБП РАН в 2021-2022 годах.

Апробация работы.

За время работы над диссертацией опубликовано 14 печатных работ, в том числе 10 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК (из них 8 работ по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)), 4 в сборниках, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus. Получено 1 свидетельство на изобретение о государственной регистрации на учебный тренажерно-моделирующий комплекс для подготовки экипажей космонавтов к проведению научных исследований на борту МКС.

Основные результаты работы докладывались:

- на XXXXIII-L научных чтениях, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина, г. Гагарин, 2017-2023 гг.;
- XIII-XV Международных научно-практических конференциях, Звездный городок, 2019 г., 2021 г., 2023 г.;
- на 55-58-х научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, 2020-2023 гг.;
- 71, 72, 74-м Международных астронавтических конгрессах, Вашингтон, 2020 г., Дубай, 2021 г., Баку, 2023 г.;
- на XLV и XLVII академических научных чтениях, посвященных памяти С.П. Королева, 2021, 2023 гг.;
- на X Международном аэрокосмическом конгрессе, Москва, 2021 г.;
- на рабочих встречах Международного рабочего комитета по управлению подготовкой экипажей МКС по полезной нагрузке (МРТР) в период 2017-2023 гг.

Создаваемые на основе исследований технические средства подготовки космонавтов с использованием современных информационных технологий относятся к перечню критических технологий (Раздел 3. Науки о жизни, пункт 3.1.2. дефис 4 «Технологии разработки систем информационного обеспечения, методов и средств повышения эффективности процессов отбора и подготовки космонавтов, их деятельности на борту пилотируемых космических средств»), разрабатываемых в целях выполнения плана мероприятий по научно-технологическому развитию и технологической модернизации экономики Российской Федерации (утверждены Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899).

Структура и объём работы. В соответствии с решением поставленных задач работа состоит из 4-х разделов и 4-х приложений. Работа содержит 184 страницы, 39 рисунков, 9 таблиц и 114 источников использованной литературы. По итогам исследований разработана автоматизированная информационная система учета целевых работ, которая подтверждается актом внедрения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, приведён перечень частых задач исследования и краткая аннотация содержания работы по разделам, дана оценка новизны и практической значимости работы, реализация и апробация полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведены системный анализ существующего процесса выполнения космонавтами программ НПИ на борту существовавших и современных ПКК и разработка предложений по его совершенствованию.

Мировая орбитальная пилотируемая космонавтика к настоящему времени прошла большой путь от первых орбитальных модулей до существующей в настоящее время МКС. Одной из основных целей создания орбитальных пилотируемых комплексов (станции «Салют», ОК «Мир», МКС) являлась и является выполнение национальной программы научных исследований в интересах развития науки, техники и экономики государства. За 25 лет эксплуатации МКС (на конец 2023 года) в режиме непрерывного пилотируемого полета на борту российского сегмента МКС в ходе 69-ти основных экспедиций и 20-ти экспедиций посещения реализовано почти 80 программ НПИ, выполнено более 32000 сеансов по 409 космическим экспериментам, включая 176 российских и 233 иностранных КЭ/ЦР. В настоящее время разрабатывается эскизный проект Российской орбитальной станции, которая позволит осуществлять научные исследования на борту высокоширотной космической станции после 2028 года.

Исходя из предложений по совершенствованию процесса выполнения космонавтами программ ЦР на борту ПКК актуальным является решение научной задачи разра-

ботки методики математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК с целью обеспечения наиболее эффективного выполнения космонавтами программ ЦР с учетом предъявляемых ограничений. Обработка больших объемов информации подразумевает использование автоматизированных информационных систем.

Математическая постановка задачи исследований

Для определения качества выполнения программы НПИ/ЦР на борту ПКК введем показатель эффективности выполнения программы НПИ/ЦР W .

В соответствии с программой ЦР на борту ПКК космонавты выполняют N целевых работ. При этом, вероятность выполнения им j -ой ЦР равна $P(\text{ЦР}_j)$, а важность (значимость) ЦР для практической реализации на борту ПКК равна $\alpha_{\text{важ}}(\text{ЦР}_j)$. Важность для практической реализации ЦР на борту ПКК $\alpha_{\text{важ}}(\text{ЦР})$ отражает в количественной форме степень влияния ЦР на результаты выполнения программы ЦР в целом, учитывает на основании опыта полетов ПКК приоритетность проведения данного направления исследований в полете, и может быть определена в виде десятичного числа с интервалом значений от 0 до 1. Тогда показатель эффективности выполнения космонавтами программы ЦР на борту ПКК W может быть определен выражением:

$$W = K_n \sum_{j=1}^N P(\text{ЦР}_j) \alpha_{\text{важ}}(\text{ЦР}_j) \quad , \quad (1)$$

где K_n – коэффициент, учитывающий снижение базовой надежности космонавта в условиях реального полета.

Проектные требования по выполнению программы полета в целом:

- вероятность выполнения программы полета $P_{\text{вып п.п.}} \geq 0,95$;
- вероятность обеспечения безопасности экипажа в полете $P_{\text{вып п.п.}} \geq 0,99$.

Соответственно, показатель эффективности подготовки космонавтов к выполнению программы ЦР на борту ПКК $W_{\text{подг}}$ может быть определен выражением:

$$W_{\text{подг}} = \sum_{j=1}^V P(\text{ЦР}_j) \alpha_{\text{важ}}(\text{ЦР}_j) \quad , \quad (2)$$

где V – набор ЦР, по которым космонавты прошли подготовку к полету ($V \in N$).

Математическую постановку задачи можно представить в следующем виде:

Имеется:

1 Множество целевых работ ЦР:

$$\text{ЦР} = \{\text{ЦР}_j, j \in N\}, N = \{1, \dots, n\}.$$

2 Множество типов режимов полета, связанных с выполнением ЦР экипажем на борту ПКК:

$$P = \{P_\nu, \nu \in L\}, L = \{1, \dots, p\}.$$

3 Множество членов экипажа:

$$S = \{S_\mu, \mu \in M\}, M = \{1, \dots, d\}.$$

4 Множество запланированных полетов экипажей $\Gamma = \{\gamma\}$.

Каждому γ -ому полету соответствует множество E_γ временных тактов m :

$$\gamma \leftrightarrow E_\gamma = \{m\}.$$

Каждому моменту начала и продолжительности τ_{jk} выполнения ЦР на борту ПКК должны соответствовать определенные временные такты m .

Тогда выражение для действия $y_{jk} = \langle m_{jk}, \gamma_{jk}, \mu_j, \nu_j \rangle$, где m_{jk} – номер временного такта выполнения j -ой ЦР на k -м интервале. Коротей $\langle j, k, \gamma, m \rangle$ соответствует продолжительности ЦР:

$$\langle j, k, \gamma, m \rangle \rightarrow \tau_{jk}. \quad (3)$$

Потенциальные возможности выполнения действий y_{jk} описываются множеством:

$$\Delta = \{ \langle m_{jk}, \gamma_{jk}, \mu_j, \nu_j \rangle \in E_\gamma \times \Gamma \times S \times P, jk \in N_{jk} \}. \quad (4)$$

Выполнение каждой целевой работы ЦР_j эквивалентно выполнению действия, под которым понимается кортеж:

$$\text{ЦР}_j \leftrightarrow y_j = \langle T_j, S_j, B_j, P^S_j, P^A_j \rangle, \quad (5)$$

где T_j – множество моментов времени, когда выполняется j -я ЦР; S_j – множество членов экипажа, выполняющих j -ю ЦР; B_j – множество НА, на которых выполняется j -я ЦР; P^S_j – множество режимов работы членов экипажа; P^A_j – множество режимов работы научной аппаратуры.

На проведение ЦР накладывается ряд условий их выполнения.

Таким образом, задача формирования программы ЦР ПКК сводится к поиску функции:

$$F_{j,k,\gamma,m,\mu,\nu} \leftrightarrow y_{jk} = \langle m_{jk}, \gamma_{jk}, \mu_j, \nu_j \rangle, \quad (6)$$

удовлетворяющей набору ограничений $C_{\text{огр}<d>}$ и определяющей показатель эффективности выполнения программы ЦР космонавтами $W \rightarrow \max$.

Методическая схема решения научной задачи исследований разработки методики математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК представлена на рисунке 1.

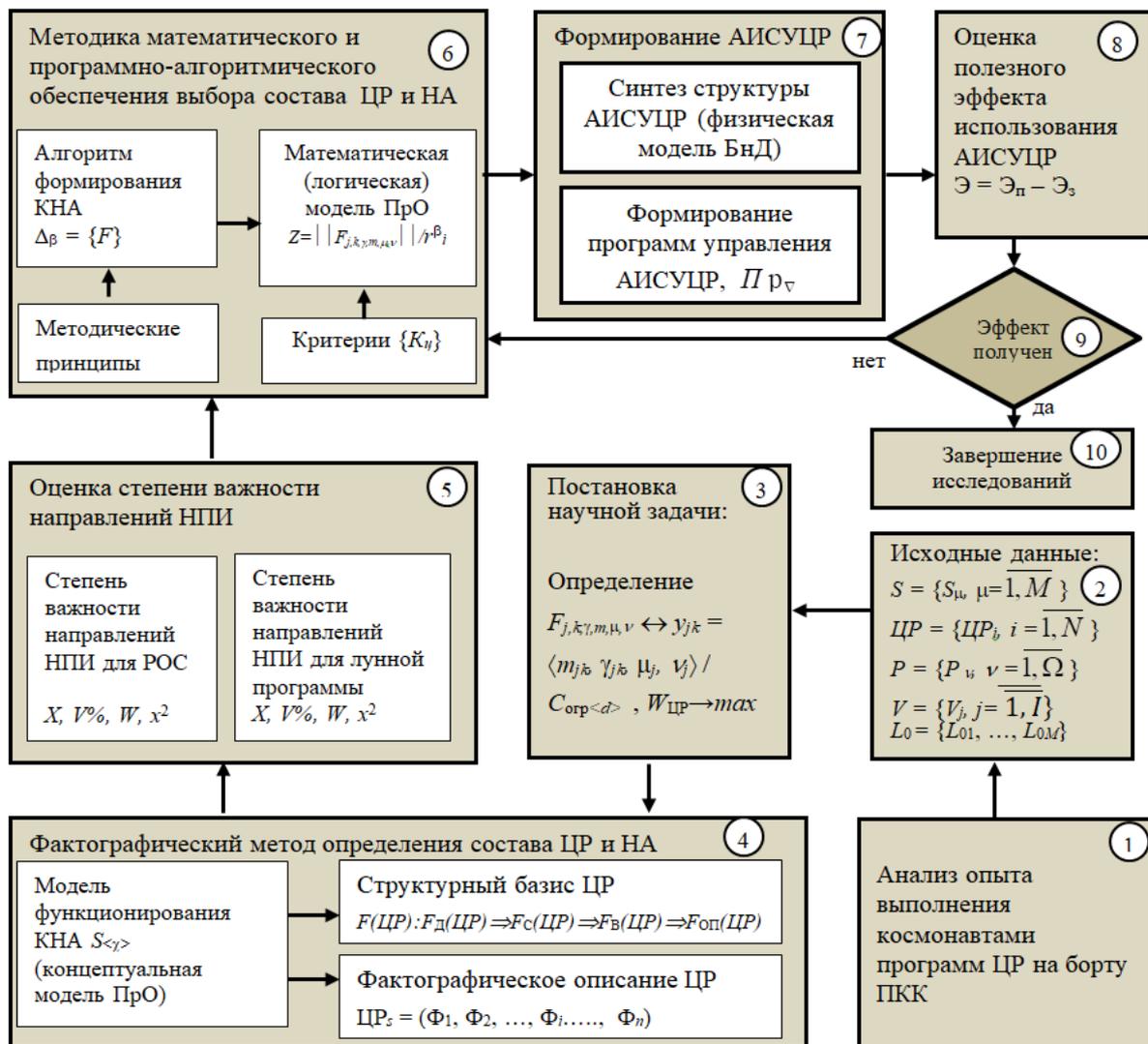


Рисунок 1 – Методическая схема решения научной задачи

Во втором разделе разработана методика математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава научной аппаратуры перспективных

научных модулей, основывающаяся: на выявленных факторах, влияющих на формирование программы целевых работ на борту ПКК, сформулированных методических принципах формирования программы ЦР и комплекса НА на борту ПКК, разработанных математической модели и алгоритме формирования программы целевых работ и комплекса научной аппаратуры пилотируемого космического комплекса.

Сформирован новый метод к определению состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных пилотируемых космических комплексов на основе фактографического описания бортовой целевой работы с учетом требований к комплексу научной аппаратуры. Для фактографического описания бортовой целевой работы впервые предложена пространственно-временная модель состояния (функционирования) КНА как в нештатных, так и в штатных ситуациях, которая позволила впервые создать математическую модель состояния КНА с использованием аппарата дискретной математики, булевой алгебры, теорий множеств и теории вероятностей. В интересах оптимизации процессов проектирования перспективных научных модулей, формализации деятельности космонавтов при выполнении ЦР дано математическое описание функционирования КНА в составе космического модуля.

Для определения модели функционирования КНА НМ на рисунке 2 рассмотрена обобщенная модель системы ПКК. Как любая составная часть ПКК КНА в процессе ее эксплуатации взаимодействует с внешней средой.

Взаимодействие КНА осуществляется посредством управлений $U_{<\eta>}$, возмущений $\Xi_{<\mu>}$ и реакций $Y_{<\nu>} = [y_1, y_2, \dots, y_\nu]$. Порядок преобразования $U_{<\eta>}$, $\Xi_{<\mu>}$, $Y_{<\nu>}$ и их взаимодействие для эксплуатации КНА представляются в виде алгоритма $G: U_{<\eta>} \times \Xi_{<\mu>} \times Z_{<\rho>} \Rightarrow Y_{<\nu>}$, где $Z_{<\rho>}$ – изменение вектора состояния КНА. При этом при фиксированном алгоритме G само функционирование КНА можно определить набором числовых параметров комплекса $\Psi_{<\xi>} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_\xi]$, $\Psi_{<\xi>} \in G$.

Основным содержанием деятельности экипажа на борту ПКК при эксплуатации КНА является выполнение перечня последовательности различных целевых работ ЦР_{*i*}. При отсутствии нештатных ситуаций процесс эксплуатации КНА космонавтами можно представить как последовательность выполнения набора ЦР_{*i*}, выполняемых экипажем станции, или автоматически по командам ЦУП. Данный процесс можно описать с использованием аппарата дискретной математики, где за оперативную единицу деятельности экипажа примем полетную операцию по выполнению ЦР.

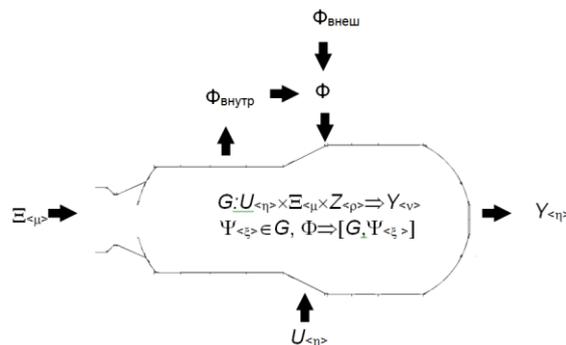


Рисунок 2 – Обобщенная модель системы ПКК

Для представления процесса эксплуатации космонавтами КНА с использованием аппарата дискретной математики рассмотрена пространственно-временная модель состояния (функционирования) КНА на борту ПКК (рисунок 3), которая представляет собой область всех возможных состояний КНА в условиях полета. Состояние КНА можно представить как набор параметров системы, множество которых образует вектор $S_{<\chi>} = [s_1, s_2, \dots, s_\chi]$ наблюдаемых параметров КНА. Применительно к КНА ком-

плекс значений вектора состояния $S_{\langle\chi\rangle} = [s_1, s_2, \dots, s_\chi]$ в процессе штатного и нештатного функционирования комплекса задает пространство его состояний $\{M_S\}$. Во всех режимах эксплуатации комплекса все множество состояний КНА $\{M_S\}$ может включать состояние: штатного состояния $\{M_{SHIC}\}$, нештатного состояния $\{M_{SHIC}\}$, аварийного состояния $\{M_{SAC}\}$, поглощающего состояния $\{M_{SIC}\}$, выход из поглощающего состояния невозможен.

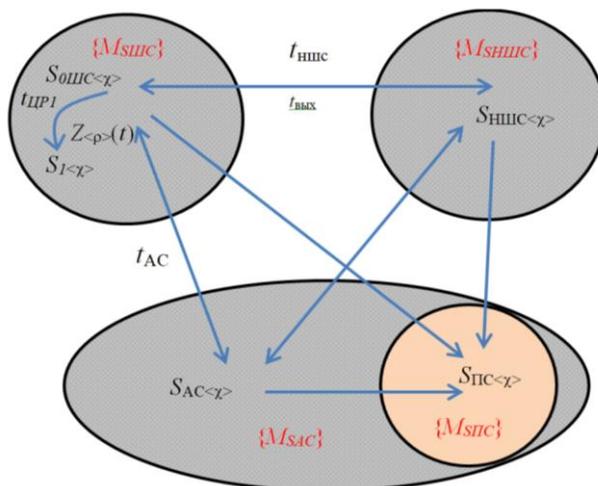


Рисунок 3 – Модель состояния (функционирования) КНА

Анализ пространственно-временной модели состояния (функционирования) КНА на борту ПКК позволяет определить содержание функционирования КНА при выполнении экипажем ЦР на борту ПКК.

Комплекс характеристик ЦР, содержащих: режим полета $P_{\langle q\rangle}$, факторы $\Pi_{\langle k\rangle}$, аппаратуру $B_{\langle n\rangle}$, категорию $K_{\langle l\rangle}$, длительность τ_i , число сеансов $N_{\text{СЦР}}$, важность $\alpha_{\text{важ}}$, приоритет планирования $\text{Пр}_{\text{ЦР}}$ составляют функцию описания ЦР $F_{\text{ОП}}(\text{ЦР})$: $[P_{\langle q\rangle}, \Pi_{\langle k\rangle}, B_{\langle n\rangle}, K_{\langle l\rangle}, N_{\text{СЦР}}, \tau_i, \alpha_{\text{важ}}, \text{Пр}_{\text{ЦР}}]$. Для описания этой функции оптимальным является язык, построенный на фасетной классификации. Так как представлением штатного состояния является функция $F_{\text{ОП}}(\text{ЦР})$, определяемая функцией состояния ЦР $F_{\text{С}}(\text{ЦР})$, то ее положение будет подчиненным по отношению к функциям состояния $F_{\text{С}}(\text{ЦР})$, выполнения $F_{\text{В}}(\text{ЦР})$ и функции динамики выполнения ЦР $F_{\text{Д}}(\text{ЦР})$. Отсюда следует соотношение $F_{\text{С}}(\text{ЦР}) \Rightarrow F_{\text{В}}(\text{ЦР}) \Rightarrow F_{\text{ОП}}(\text{ЦР})$. В совокупности взаимосвязанные функции $F(\text{ЦР}): F_{\text{Д}}(\text{ЦР}) \Rightarrow F_{\text{С}}(\text{ЦР}) \Rightarrow F_{\text{В}}(\text{ЦР}) \Rightarrow F_{\text{ОП}}(\text{ЦР})$ образуют структурный базис ЦР_{*i*} (рисунок 4).

Фасетная формула может быть представлена в виде вектора $V_{\langle h\rangle}$ признаков ЦР, каждый из которых представляет собой пару $(d, \{v_d\})$, где d – имя признака, а $\{v_d\}$ – непустое множество его значений. За основу фасетной классификации может быть взята функция $F_{\text{ОП}}(\text{ЦР})$ описания ЦР, число компонентов которой может быть дополнено признаками, необходимость включения которых в фасетную формулу обуславливается конкретным прикладным применением данных фактографического описания целевой работы. Принимая это во внимание, базовая фасетная формула $V_{\langle h\rangle}$ должна включать в себя следующие компоненты d (фасеты): номер ЦР, содержание ЦР, источник выполнения ЦР (НА), масса НА, объем НА, категория ЦР, факторы космического полета для ЦР, число сеансов выполнения ЦР, важность (значимость) ЦР, приоритет планирования ЦР, взаимосвязь ЦР с программой полета (накладываемые ограничения), длительность выполнения ЦР, способ выполнения ЦР, принадлежность ЦР к модулю ПКК, экипажи, выполняющие ЦР.

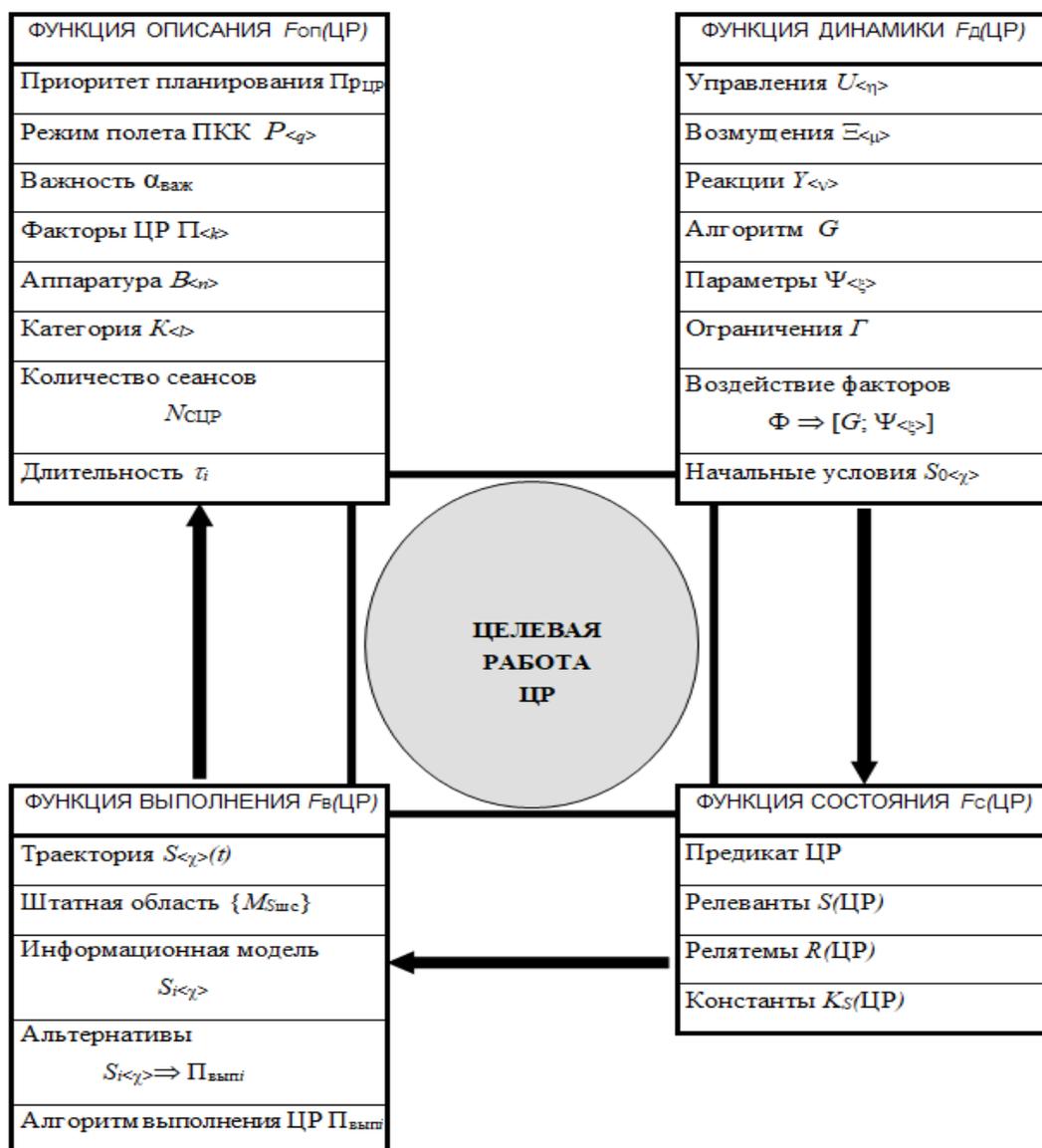


Рисунок 4 – Структурный базис ЦР

Программа ЦР экспедиции на борту ПКК включает в себя перечень $\{ЦР_i\}$ и порядок $\{ЦР_i \succ ЦР_j\}$ их выполнения. При этом каждая целевая работа $ЦР_i$ связан с определенным режимом полета P_v , и набором нештатных ситуаций $\{A_j\}$, которые относятся к конкретной ЦР.

Формирование программы ЦР экипажей пилотируемых комплексов зависит от целого комплекса факторов, основными из которых являются:

- 1) Организационные:
состав членов экипажа ПКК – S ;
распределение должностных и функциональных обязанностей между членами экипажа;
- 2) Временные:
продолжительность общего времени полета экипажа – $T_{п}$;
значение величины промежутка времени между сеансами проведения экспериментов $\tau_{пр}$;
продолжительность рабочего времени экипажа – $T_{рв}$.
- 3) Технические:
состав комплекса научной аппаратуры ПКК – $N_{трн}$;
возможность проведения i -ой ЦР во время полета экспедиции – $V_{црi}$.

4) Методические:

программа полета экипажа ПКК – $\Pi_{п}$;
 совокупность ЦР – $\{КЭ_i\}$;
 совокупность нештатных ситуаций – $\{A_j\}$;
 совокупность режимов полета ПКА – $\{P_v\}$;
 уровень подготовленности экипажа по научной программе – L_0 ;
 число членов экипажа, имеющих опыт полетов – M_o .

5) Баллистические:

параметры орбиты (высота H , наклонение i , период обращения T_0);
 зоны света и тени – $\{t_{Ti}^h, t_{Ti}^k\}$;
 зоны сеансов связи – $\{t_{Cci}^h, t_{Cci}^k\}$;
 трасса полета, номера витков – n_z .

6) Ресурсные:

масса комплекса научной аппаратуры – M ;
 занимаемый объем в модуле комплексов научной аппаратуры – V ;
 определенный на полет запас рабочего тела – V_{PT} ;
 определенный на полет запас электроэнергии – $V_{Э}$.

Процесс определения программы ЦР и, соответственно, состава НА экипажа ПКК основывается на использовании разработанных методических принципах формирования программы ЦР и комплекса НА на борту ПКК (таблица 1).

Разработанные в рамках данной информационной технологии методические принципы положены в основу алгоритма для автоматизированного формирования программы ЦР и комплекса НА на борту ПКК.

Задача формирования программы ЦР для ПКК может быть рассмотрена в следующей постановке: каждый из них должен удовлетворять предъявляемым требованиям, и характеризуется набором значений показателей оценки $OЦ = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$. Требуется оценить полученные проекты программ НПИ в соответствии предложенным показателем эффективности.

Эта задача может быть решена с использованием математического аппарата многокритериальной оптимизации. Для этого:

- на основе разработанного алгоритма формируется набор проектов V ;
- формируется набор критериев оценки $OЦ$.

Таблица 1 – Методические принципы формирования программы ЦР и комплекса НА на борту ПКК

№	Название методического принципа
1	Учет располагаемых возможностей по числу проводимых ЦР на борту
2	Регулирование частоты проведения ЦР в зависимости от дефицита времени экипажа
3	Определение требований к необходимому числу сеансов ЦР
4	Предварительная классификация ЦР по уровню важности для отработки и определение нормативного числа их повторений в полете
5	Учет при определении времени на борту на подготовку к ЦР и нормативного числа повторений ЦР величин временных интервалов от предыдущих подготовки к полету или полета
6	Прогноз наличия бортовой научной аппаратуры на борту ПКК
7	Использование «главной узловой точки» при размещении ЦР по программе полета
8	Выбор фиксированных временных интервалов планирования ЦР
9	Обеспечение преемственности ЦР
10	Увеличение времени на подготовку и проведению ЦР для восстановления навыка
11	Отсутствие наложения ЦР, использующих общую научную аппаратуру

Теоретически, каждая из программ v_i может формироваться произвольным образом, но при этом множество V может быть очень большим, и тогда процесс выбора наилучшего варианта будет занимать неоправданно большое время. Поэтому целесообразным является подход, при котором планы v_i формируются по отработанным экспертами алгоритмам и в той или иной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к программе ЦР.

Имеется:

1 Множество целевых работ, предполагаемых к включению в программу полета ЦР

$$\text{ЦР} = \{\text{ЦР}_j, j \in N\}, N = \{1, \dots, n\}.$$

Множество ЦР разбивается на подмножества:

– пар ЦР, связанных отношением предшествования

$g_{np} = \langle \text{ЦР}, G_{np} \rangle$, где $G_{np} \subseteq \text{ЦР} \times \text{ЦР}$, при этом $G_{np} = \{ \langle \text{цр}_i, \text{цр}_j \rangle / \text{цр}_i \prec \text{цр}_j \}, i, j \in N$, где знак “ \prec ” обозначает, что ЦР_{*i*} предшествует ЦР_{*j*};

– несовместных ЦР например, ЦР выполняемые на одном оборудовании

$$\text{ЦР}^H \subseteq \text{ЦР} = \{\text{цр}_j, j \in J \subseteq N\}, J = \{1, \dots, q\};$$

– пар ЦР, связанных отношением смежности

$g_{cm} = \langle \text{ЦР}, G_{cm} \rangle$, где $G_{cm} \subseteq \text{ЦР} \times \text{ЦР}$,

при этом $G_{cm} = \{ \langle \text{цр}_i, \text{цр}_j \rangle / \text{цр}_i \text{ смежна } \text{цр}_j \}, i, j \in N$.

2 Множество типов режимов полета, связанных с суточной программой выполнения ЦР

$$P = \{P_v, v \in \Omega\}, \Omega = \{1, \dots, d\},$$

где каждый v -й режим описывается кортежем

$$P_v = \langle \text{цр}_{jv}, t_{j,v}^H, \tau_{jv}, t_v^H, \tau_v \rangle, v \in \Omega, j \in N,$$

где цр_{jv} – j -я целевая работа, выполняемая в v -м режиме; t_{jv}^H – момент начала выполнения j -ой ЦР в v -м режиме; τ_{jv} – продолжительность выполнения j -ой ЦР в v -м режиме; t_v^H – момент начала v -го режима; τ_v – продолжительность v -го режима.

3 Множество членов экипажа

$$S = \{S_\mu, \mu \in M\}, M = \{1, \dots, p\}.$$

4 Множество запланированных полетов экипажей ПКК $\Gamma = \{\gamma\}$, каждому полету соответствует множество временных тактов:

$$\gamma \leftrightarrow E_\gamma = \{m\}.$$

5 Множество диапазонов полетов экипажей ПКК:

$$V = \{v_\gamma, \gamma \in \Gamma\}, I = \{1, \dots, \delta\}.$$

Каждая экспедиция ПКК задается парой $v_\gamma = \langle t_\gamma^H, t_\gamma^K \rangle, \gamma \in \Gamma$, где t_γ^H, t_γ^K – моменты начала и конца полета экипажа ПКК.

В соответствии с формулой 5 выполнение каждой ЦР_{*j*} эквивалентно действию, под которым понимается кортеж

$$\text{ЦР}_j \leftrightarrow y_j = \langle T_j, S_j, B_j, P_j^S, P_j^A \rangle. \quad (7)$$

На ЦР накладывается ряд условий их выполнения. Множество условий обозначается C_j .

Для каждой ЦР набор условий для формирования программы НПИ:

$$C_j = \langle C_{j1}, \dots, C_{j15} \rangle, j \in N, \quad (8)$$

где C_{j1} – важность ЦР; C_{j2} – продолжительность ЦР; C_{j3} – директивность ЦР; C_{j4} – время суток (признак); C_{j5} – номер суток; C_{j6} – отношение следования ЦР; C_{j7} – смежность ЦР; C_{j8} – совместность выполнения; C_{j9} – количество выполняющих космонавтов; C_{j10} – член экипажа; C_{j11} – необходимость динамической операции; C_{j12} – категория ЦР; C_{j13} – частота

выполнения (число сеансов) ЦР; C_{j14} – масса научной аппаратуры; C_{j15} – объем доставляемой научной аппаратуры.

Имеется множество вариантов Y_j выполнения действия y_j , $y_j \in Y_j$.

При этом,

$$y_j = \langle U_K(Q_{jk}^H, Q_{jk}^K), S_j, B_j \rangle, \quad (9)$$

где (Q_{jk}^H, Q_{jk}^K) – интервал планирования ЦР; k – множество моментов времени $k \in W$.

Вводится упорядочение по экипажам.

$$U_K(Q_{jk}^H, Q_{jk}^K) = U_K(t_{\gamma}^H, t_{\gamma}^K, \gamma_{jk}). \quad (10)$$

При этом,

$$y_j = \langle U_K(t_{\gamma}^H, t_{\gamma}^K, \gamma_{jk}), S_j, B_j \rangle. \quad (11)$$

В этом случае,

$$y_j = U_K \langle (t_{jk}^H, t_{jk}^K, \gamma_{jk}), S_j, B_j \rangle = U_K y_{jk}. \quad (12)$$

Если ввести временные такты $\{m\}$, то каждому моменту начала t_{jk}^H и продолжительности τ_{jk} выполнения ЦР будут соответствовать определенные временные такты m .

Тогда выражение для действия $y_{jk} = \langle m_{jk}, \gamma_{jk}, \mu_j, v_j \rangle$, где m_{jk} – номер временного такта выполнения j -ой ЦР на k -м интервале. Кортеж $\langle j, k, \gamma, m \rangle$ соответствует продолжительности ЦР $\langle j, k, \gamma, m \rangle \rightarrow \tau_{jk}$.

Потенциальные возможности выполнения действий y_{jk} описываются множеством Δ (4).

Каждый кортеж в множестве Δ однозначно характеризуется функцией

$$F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} : \Delta \rightarrow \{0,1\}. \quad (13)$$

Задача планирования программы НПИ и КНА сводится к поиску функции:

$$F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} \leftrightarrow y_{jk} = \langle m_{jk}, \gamma_{jk}, \mu_j, v_j \rangle. \quad (14)$$

Тогда каждая программа выполнения программы НПИ определяется в виде конечномерного вектора:

$$Z = // F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} //, j \in N, k \in W, \gamma \in \Gamma, m \in E_{\gamma}, \mu \in M, v \in L. \quad (15)$$

Множество альтернатив Δ соответствует множеству векторов Z . Множество допустимых альтернатив:

$$\Delta_{\beta} = \{Z = // F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} // / r_i^{\beta}, I = \overline{1,8}\}, \quad (16)$$

где $\{r_i^{\beta}, i = \overline{1,8}\}$ – множество ограничений.

Ниже приведен перечень ограничений:

1 Обязательное включение в программу ЦР, имеющих наиболее приоритетное значение для научных исследований:

$$\beta 1: \sum_{k,\gamma,m,\mu,v} F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} = I / j \in J_1, \quad j \leftrightarrow (\gamma, m, k, \mu), \quad (17)$$

где J_1 – подмножество приоритетных ЦР, $J_1 \subseteq N$.

2 Длительность полета экипажа ПМК ограничена и, соответственно, суммарный временной ресурс каждого члена экипажа на выполнение всех ЦР ограничен:

$$\beta 2: \sum_{k,\gamma,m,\mu,v} F_{j,k,\gamma,m,\mu,v} \cdot \tau_{j,k,\gamma,m} \leq b_{\mu}, \forall \mu \in M, \quad (18)$$

3 ЦР j_l может быть выполнена только при условии выполнения ЦР j_n :

$$\beta 3: F_{j_n, k_n, \gamma_n, m_n, \mu_n, v_n} - F_{j_l, k_l, \gamma_l, m_l, \mu_l, v_l} \leq 0 \quad (19)$$

для $\forall k_i, \gamma_i, m_i, \mu_i, v_i, i = n, l, j_n < j_l, j_n, j_l \in G_{np}$.

4 Каждый член экипажа в каждый момент времени может выполнять не более одной ЦР:

$$\beta 4: \sum_{k, \gamma, m, \mu, \nu} F_{j, k, \gamma, m, \mu, \nu} \leq 1, \forall \mu, \gamma, m. \quad (20)$$

5 Ограничение на совместность выполнения некоторых ЦР:

$$\beta 5: \sum_{j \in KЭ^H} F_{j, k, \gamma, m, \mu, \nu} \leq 1, \forall \mu, \gamma, m. \quad (21)$$

6 Ограничение на кратность выполнения j -ой ЦР в течение космического полета:

$$\beta 6: \sum_{k, \gamma, m, \mu, \nu} F_{j, k, \gamma, m, \mu, \nu} \leq C_{j13}, \forall j, \gamma. \quad (22)$$

7 Ограничение на суммарную массу НА на борту ПКК:

$$\beta 7: \sum_j F_j \cdot C_{j14} \leq M_{НА\gamma}, \quad (23)$$

где $M_{НА\gamma}$ – допустимая масса НА на борту ПКК.

8 Ограничение на суммарный объем НА на борту ПКК:

$$\beta 8: \sum_j F_j \cdot C_{j14} \leq V_{НА\gamma}, \quad (24)$$

где $V_{НА\gamma}$ – допустимый объем НА на борту ПКК.

Критерии оценки плана:

1 Включение в программу максимального числа из отобранных с учетом представленных ограничений ЦР:

$$f_1(Z) = \sum_{k, \gamma, m, \mu, \nu} F_{j, k, \gamma, m, \mu, \nu} \rightarrow \max, \forall j \in ЦРот, \quad (25)$$

где $ЦР_{от}$ – множество ЦР, отобранных с учетом ограничений $\beta_1 \dots \beta_8$.

2 Включение в программу наиболее важных ЦР:

Все ЦР, имеющие наибольший уровень важности для научно-прикладных исследований с учетом представленных ограничений, должны быть включены в программу НПИ.

Для важных ЦР:

$$f_2(Z) = \sum_j F_j \cdot C_{j1} \rightarrow \max. \quad (26)$$

На этапе формирования программ НПИ строится (ψ) вариантов программ (Z_γ) с учетом ограничений $\beta_1 \dots \beta_4, \beta_6 \dots \beta_8$ по критериям $f_1(Z)$ и $f_2(Z)$ на основе паретовских решений.

По результатам исследований разработан автоматизированный алгоритм формирования программы ЦР (НА) для ПКК, базирующийся на использовании АИСУЦР. Разработка программы начинается с формирования полного состава $\{ЦР_{jn}\}$ космических экспериментов для перспективного ПКК. Формирование состава $\{ЦР_{jn}\}$ проводится путем рассмотрения всех ЦР, предлагаемых организациями-постановщиками ЦР. Автоматизированный алгоритм формирования программы ЦР и НА ПКК включает в себя основные компоненты данного процесса: планирование, перепланирование, формирование программ ЦР и НА ПКК с учетом представленных ограничений.

Раздел три работы посвящен оценке степени важности направлений НПИ/ЦР на борту перспективных ПКК.

Для определения степени важности направлений НПИ/ЦР на борту перспективных ПКК применительно к РОС и лунной программе составлен опросный лист. Координационно-технический совет (КНТС) ГК «Роскосмос» определяет 8 направлений НПИ на борту ПКК. Каждое из 8 направлений включает в себя несколько разделов, определенных секциями КНТС. Направления и разделы направлений включены в опросный лист. Использовалась следующая шкала оценки степени важности направлений НПИ на борту перспективных ПКК (балл): 1 – очень низкий; 2-3 – низкий; 4-6 –

средний; 7-8 – высокий; 9-10 – очень высокий. В ходе исследования опрошено четыре группы экспертов: специалисты по подготовке космонавтов по космическим экспериментам ($n = 5$), специалисты по научно-исследовательской работе ($n = 6$), специалисты организаций-постановщиков ЦР и разработчики НА ($n = 4$) и профессиональные космонавты ($n = 5$).

В процессе обработки опросных листов направлений (разделов) НПИ проведены следующие расчеты: среднее арифметическое значение – X , стандартное отклонение – S , коэффициент вариации – $V\%$, коэффициент конкордации (согласованность мнений экспертов) – W и достоверность коэффициента конкордации (критерий Пирсона) – χ^2 по всем направлениям НПИ применительно к РОС и лунной программе по каждой группе экспертов.

В результате проведенных исследований по оценке степени важности направлений НПИ применительно к РОС можно отметить:

- к наиболее важным направлениям исследований в целом на борту перспективной пилотируемой РОС по мнению экспертов можно отнести: *Технические исследования и технологии ПКП* $X_{cp} = 9,1$; *Космическое материаловедение* $X_{cp} = 8,5$; *Космическая биология и физиология и Исследование Земли из космоса* $X_{cp} = 8,3$;

- к наиболее важным разделам направлений исследований на борту перспективной РОС по мнению экспертов относятся: *Изучение особенностей функционирования в условиях космического полета сложных технических систем, Экспериментальная отработка технических систем, с целью создания служебного и научного бортового оборудования нового поколения, Изучение и оценка эффективности работ членов экипажей при выполнении научных исследований и служебных операций с целью совершенствования процессов операторской деятельности на борту* $X = 9,6$; *Развитие новых технологий для обеспечения решения задач дистанционного зондирования Земли из космоса, Совершенствование технологии, методов и средств строительства, технического обслуживания и ремонта КА в условиях космического полета* $X = 9,5$.

В результате проведенных исследований по оценке степени важности направлений НПИ применительно к лунным ПКК можно отметить:

- к наиболее важным направлениям исследований в целом на борту перспективных лунных ПКК (в том числе, лунных баз) по мнению экспертов можно отнести: *Исследование Луны из космоса* $X_{cp} = 9,0$; *Технические исследования и технологии ПКП* $X_{cp} = 8,8$; *Физика космических лучей* $X_{cp} = 7,9$; *Солнечная система* $X_{cp} = 7,5$;

- к наиболее важным разделам направлений исследований на борту перспективной лунных ПКК (в том числе, лунных баз) по мнению экспертов относятся: *Экспериментальная отработка роверов и робототехнических систем* $X = 9,7$; *Экспериментальная отработка технических систем, с целью создания служебного и научного бортового оборудования нового поколения* $X = 9,6$; *Изучение характеристик лунного грунта, Исследование поверхности Луны, Исследования в области гидрогазодинамики и теплообмена* $X = 9,5$.

Полученные значения коэффициента конкордации W и критерия Пирсона χ^2 показывают высокую степень достоверности полученных результатов.

В четвертом разделе приводятся научно-технические основы синтеза структуры АИСУЦР для обеспечения выполнения программ ЦР на борту перспективных ПКК.

Разработана структура и порядок использования АИСУЦР, позволяющей сократить время на выполнение операций путем привлечения для этой цели соответствующих обрабатывающих программ, диалоговых систем информационной базы данных (рисунок 5).

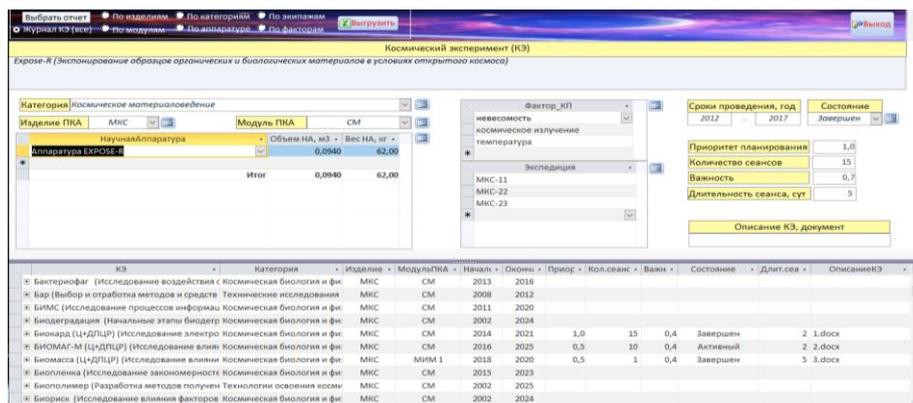


Рисунок 5 – Главный формат АИСУЦР

Основными элементами, подлежащими формализации являются:

- разработка программ ЦР;
- разработка перечня НА КНА;
- определение соответствия массы и объема НА допускам;
- учет НА в существующих модулях ПКК;
- учет длительности выполнения ЦР;
- определение важности ЦР применительно к программам полетов;
- определение порядка отработки ЦР в полете;
- учет важности ЦР для формирования программ подготовки экипажей ПКА;
- разработка программ подготовки космонавтов по ЦР.

На рисунке 6 представлена схема данных АИСУЦР, где:

- формат List KE – формат перечня ЦР;
- формат EquipmScience – формат перечня научной аппаратуры;
- формат Factors_KP – формат учета факторов космического полета;
- формат Expedition – формат учета экспедиций, выполнявших ЦР;
- формат SPR_Condition – формат перечня ПКК;
- формат SPR_Product_PKA – формат учета текущего состояния ЦР;
- формат SPR_Category_KE – формат учета категорий ЦР;
- формат SPR_Module_PKA – формат перечня модулей ПКК;
- формат SPR_Equipment – формат описания НА;
- формат SPR_Expedition – формат представления номера экспедиции ПКК;
- формат SPR_Factors_KP – формат представления факторов космического полета.

полета.

Предложен порядок взаимодействия составных частей АИСУЦР в процессе функционирования в зависимости от типа решаемой задачи. Сформулировано 7 основных задач-запросов.

Разработанная на основании проведенных в работе исследований АИСУЦР создана с использованием реляционной системы управления базами данных (СУБД) Access корпорации Microsoft, которая входит в состав пакета Microsoft Office. В соответствии со своими характеристиками имеет широкий спектр функций, включая связанные запросы, связь с внешними таблицами и базами данных. Для построения полноценных клиент-серверных приложений на базе MS Access рекомендуется использовать в качестве движка базы данных СУБД MS SQL Server.

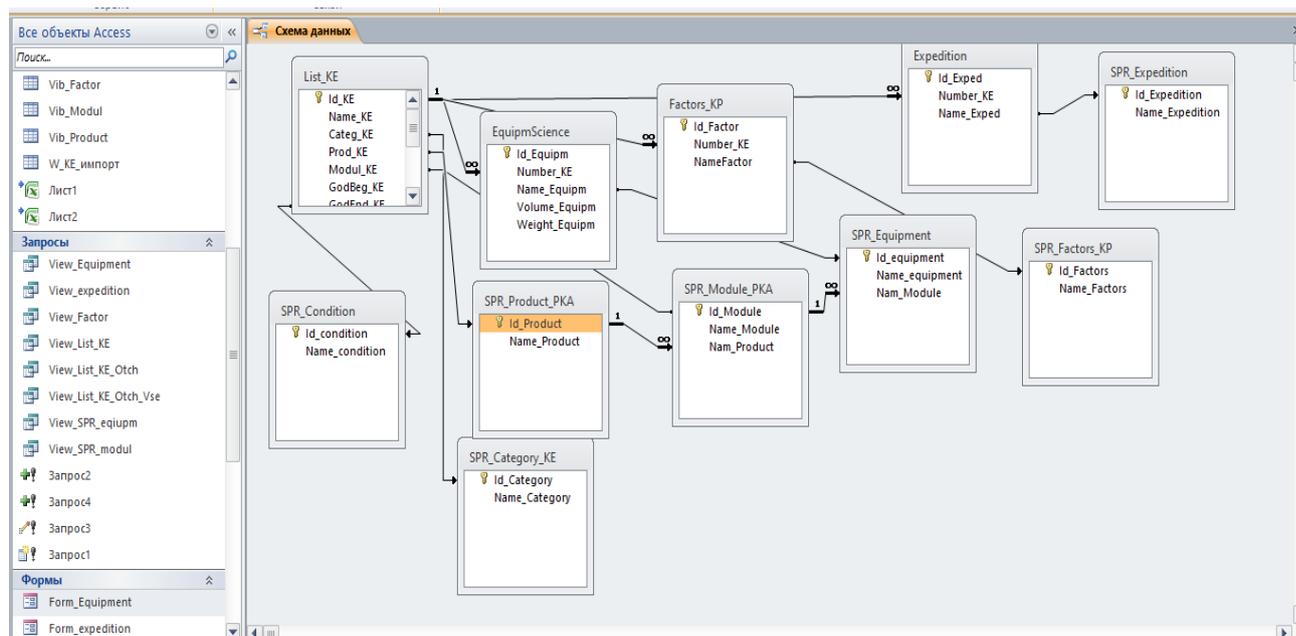


Рисунок 6 – Схема данных АИСУЦР

В работе разработана методика технико-экономического обоснования использования АИСУЦР, в основу которой положен интегральный показатель эффективности, исчисляемый как годовой экономический эффект от использования системы, представляющий собой разность между получаемым в течение года полезным эффектом и затратами на создание и эксплуатацию системы в годовом исчислении.

Выявлен полезный эффект использования АИСУЦР, включающий в себя:

эффект от сокращения затрат времени специалистов при создании средств подготовки космонавтов ПКК;

эффект от сокращения затрат времени инструкторского состава на подготовку и проведение тренировок экипажей ПКК по НПИ;

эффект от сокращения затрат времени специалистов при проектировании КНА перспективных ПКК;

эффект от повышения уровня подготовленности экипажей к выполнению ЦР и действиям в нештатных ситуациях при выполнении программы полета.

Показано, что результаты исследований внедрены:

при выборе программ ЦР и состава НА перспективных ПКК в рамках проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (3 работы);

подготовке экипажей МКС для формирования программ подготовки и создания технических средств подготовки космонавтов;

проведении международных экспериментальных исследований с участием человека «SIRIUS 21» на базе ГНЦ РФ-ИМБП РАН в 2021-2022 годах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научная задача по разработке математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава ЦР и НА перспективных ПКК на основе опыта эксплуатации существовавших орбитальных пилотируемых комплексов в условиях изменения вектора входных параметров и ограничения на ресурсы для повышения качества выполнения космонавтами программ целевых работ на борту перспективных ПКК.

Проведенные в работе исследования находятся в русле требований федеральной космической программы, предусматривающих создание после окончания эксплуатации

МКС Российской орбитальной станции и формирование научно-технических заделов в интересах создания перспективных пилотируемых комплексов для будущих полетов к Луне и в дальний космос.

По итогам решения поставленных в работе задач можно сделать следующие выводы:

1) Проведен системный анализ процесса выполнения космонавтами программ НПИ/ЦР на борту существовавших и современных ПКК, разработаны предложения по совершенствованию данного процесса. Формализована и поставлена математическая задача исследований.

2) Сформирован метод определения состава ЦР и НА перспективных ПКК на основе системного подхода и фактографического описания бортовой ЦР с использованием аппарата дискретной математики с учетом требований, предъявляемых к комплексу научной аппаратуры.

3) С целью формирования АИС поддержки деятельности специалистов при разработке комплексов научной аппаратуры выполнено фактографическое описание и определена базовая фасетная формула ЦР применительно к функционированию пилотируемого космического комплекса с использованием аппарата дискретной математики, для чего впервые разработаны пространственно-временная модель состояния (функционирования) комплекса НА и структурный базис описания ЦР.

4) Разработанная математическая модель для формирования наиболее оптимальной программы ЦР и комплекса НА ПКК представляет собой последовательность частных оптимизационных задач, анализ и отбор вариантов решений которых осуществляет руководитель на основе представленных критериев с учетом выявленных ограничений.

5) Разработана методика математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных ПКК, основывающаяся: на выявленных факторах, влияющих на формирование программы космических экспериментов на борту ПКК, сформулированных методических принципах формирования программы ЦР и комплекса НА ПКК, разработанных математической модели и автоматизированном алгоритме принятия решений.

6) Предложенный автоматизированный алгоритм формирования состава ЦР и НА ПКК, включающий основные компоненты технологических процессов (планирование, перепланирование, формирование программ ЦР и комплекса научной аппаратуры модуля ПКК с учетом представленных ограничений), базируется на использовании АИС учета ЦР.

7) Определены количественные показатели степени важности существующих направлений и разделов направлений научно-прикладных исследований и экспериментов на борту перспективных ПКК применительно к РОС и лунной программе. Рассчитаны коэффициенты конкордации и проведена оценка достоверности коэффициентов конкордации согласованности мнений групп специалистов о важности направлений НПИ на борту перспективных ПКК с использованием критерия χ^2 (Пирсона), которые показывают высокую достоверность полученных результатов опросов.

8) Разработана АИС учета ЦР с применением задач-запросов, позволяющая сократить время на выполнение расчётных операций путем привлечения для этой цели соответствующих обрабатывающих программ, диалоговых систем информационной базы данных.

Результаты исследований внедрены:

в рамках проведения НИОКР (3 работы);

подготовке экипажей МКС для формирования программ подготовки и создания технических средств подготовки космонавтов;

проведении международных экспериментальных исследований с участием человека «SIRIUS 21» на базе ГИЦ РФ-ИМБП РАН в 2021-2022 годах.

Реализация составляющих математического и программно-алгоритмического обеспечения выбора состава научной аппаратуры ПКК позволяет:

- решать с использованием АИСУЦР оптимальные задачи по формированию планирования, учету и контролю подготовки и деятельности экипажей ПКК при заданных начальных условиях: длительности подготовки $T_{п}$, программе полета $\Pi_{п}$, составе экипажа S с учетом начального уровня подготовленности членов экипажа L_0 ;
- повысить качество подготовки и деятельности в полете за счет учета и обработки всех целевых работ;
- снизить трудозатраты специалистов и инструкторско-преподавательского состава при работе с базами перечней ЦР за счет сокращения времени на обработку информации;
- формировать требования по разработке новых и совершенствованию существующих технических средств подготовки космонавтов.

Дальнейшие исследования в рамках сформулированной в диссертации научной задачи целесообразно проводить в направлении использования для моделирования процессов деятельности космонавтов идей и способов теории искусственного интеллекта.

Полученные результаты соответствуют пунктам 2, 4, 5, 12 паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), в работе рассматривается решение задачи системного анализа по выбору наиболее оптимального состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных пилотируемых космических комплексов с использованием компьютерных методов обработки информации.

Цель работы достигнута, поставленные в работе задачи исследований решены полностью. Достоверность полученных результатов подтверждается опытом выполнения космических полетов космонавтов на борту ПКК, использованием реальных данных на основе программ НПИ/ЦР на борту МКС, а также результатов проведенных экспериментальных исследований с участием ведущих специалистов космической отрасли, РАН, космонавтов отряда космонавтов Госкорпорации по космической деятельности «Роскосмос».

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в системе цитирования Scopus:

1. Development Of A Multi-Segment Technology For Training Cosmonauts For Flight On The International Space Station. Kharlamov M.M., Skripochka O.I., Dmitriev V.N., Kuritsyn A.A., Kutnik I.V., Chub N.A., Blinov O.V., Petelin D.A., Yurchenko E.V., Andreev E.V. В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Сер. "IAF Human Spaceflight Symposium 2021 - Held at the 72nd International Astronautical Congress, IAC 2021", Dubai, 2021.
2. Innovative Solutions In The Process Of Designing And Realization The Simulator To Train Cosmonauts For Visual Instrumental Observations From The Board Of The ISS. Chub N.A., Fokin V.E., Kharlamov M.M., Kuritsyn A.A., Kutnik I.V., Vasilieva N.V., Vasiliev V.I., Vlasov P.N. В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 71, Connecting @II Space People. Сер. "71st International Astronautical Congress, IAC 2020 - The CyberSpace Edition" 2020.

3. Особенности образования микробных сообществ пробиотическими бактериями *Lactobacillus Plantarum* 8РА-3 на различных носителях в условиях космического полета. Рыбальченко О.В., Орлова О.Г., Капустина В.В., Попова Е.В., Кутник И.В. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2022. Т. 56. № 5. С. 85-95.

4. Development of the Cosmonaut Remote Training Technology Using Limited Communication

with the Simulation of Work in Long-Duration Interplanetary Flights. Kuritsyn A.A. Blinov O.V., Kikina A.Yu., Kovrigin S.N., Kondratiev A.S., Kutnik I.V., Krylov A.I., Popova E.V., Temartsev D.A., Chebotarev Yu.S. В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Сер. "IAF Human Spaceflight Symposium 2023 - Held at the 74 International Astronautical Congress, IAC 2023", Baku, 2023.

Научные статьи в журналах Перечня ВАК Минобрнауки РФ по специальности 2.3.1:

5. Отработка технологии удаленного обучения космонавтов с использованием ограниченных средств связи при выполнении космических экспериментов. Курицын А.А., Попова Е.В., Кутник И.В., Блинов О.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2023. № 3 (48). С. 59-69.

6. Методы оценки тренированности космонавтов при проведении подготовки экипажей Международной космической станции. Курицын А.А., Ярополов В.И., Ковинский А.А., Копнин В.А., Кутник И.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2019. № 2 (31). С. 44-62.

7. Старицын Н.А., Синчурина Е.В., Крашенинникова Т.К., Кутник И.В., Попова Е.В., Сабуров П.А., Кузнецов Е.П., Алексюк В.Л. Биотехнологические эксперименты на борту российского сегмента МКС: содержание, особенности проведения, перспективы // *Пилотируемые полеты в космос*. - 2024. - N 3(52). - С. 44-62.

8. Кобатов А.И., Полынцев Д.Г., Савин И.И., Верлов Н.А., Кулаков И.А., Бурдаков В.С., Попова Е.В., Кутник И.В. Определение радиозащитной эффективности кислomолочного пробиотического продукта, получаемого в ходе реализации космического эксперимента «Пробиовит» // *Пилотируемые полеты в космос*. - 2024. - N 3(52). - С. 44-62.

9. Космический эксперимент «Пробиовит»: итоги и перспективы (часть 1). Кобатов А.И., Полынцев Д.Г., Савин И.И., Попова Е.В., Кутник И.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2023. № 1 (46). С. 74-87.

10. Космический эксперимент «Пробиовит»: итоги и перспективы (часть 2). Кобатов А.И., Полынцев Д.Г., Савин И.И., Попова Е.В., Кутник И.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2023. № 2 (47). С. 87-98.

11. Пробиотики на борту Международной космической станции: от космического эксперимента к изготовлению бортовых продуктов. Попова Е.В., Кутник И.В., Кобатов А.И., Вербицкая Н.Б., Чурилова И.В., Леонова Н.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020. № 1 (34). С. 104-119.

12. Снижение последствий влияния мутагенных факторов на организм человека в условиях длительного космического полета. Попова Е.В., Кутник И.В., Кобатов А.И., Вербицкая Н.Б., Добролеж О.В. *Пилотируемые полеты в космос*. 2019. № 1 (30). С. 96-113.

Научные статьи в журналах Перечня ВАК Минобрнауки РФ:

13. Подход к формированию комплексов научной аппаратуры перспективных пилотируемых научных модулей с использованием аппарата дискретной математики. Курицын А.А., Кутник И.В., Чуб Н.А. *Космонавтика и ракетостроение*. 2021. № 4 (121). С. 66-81.

14. Проектирование стенда-тренажера для подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений. Васильева Н.В., Дедкова Е.В., Кутник И.В.,

Фокин В.Е., Чуб Н.А., Юрченко Е.С. Вестник Московского авиационного института. - 2021. - Т. 28. - № 1. - С. 115-125.

Объекты интеллектуальной собственности:

15. Учебный тренажерно-моделирующий комплекс для подготовки экипажей космонавтов к проведению научных исследований на борту МКС. Шукшунов В.Е., Шукшунов И.В., Фоменко В.В., Крючков Б.И., Сохин И.Г., Гапонов В.Е., Бирюков Ю.Б., Чуланов А.О., Янюшкин В.В., Потоцкая А.С., Шабуров Д.В., Сабуров П.А., Попова Е.В., Лукьянова О.А., Бондаренко С.С., Умнова Л.А., Кутник И.В., Кондратенко Ю.Г., Васильев В.А. Патент на изобретение RU 2617433С, 25.04.2017.

Публикации в научных изданиях:

16. Эмпирическая оценка степени важности направлений научно-прикладных исследований и экспериментов на борту перспективных ПКК. Кутник И.В. В сборнике: Идеи К.Э. Циолковского в теориях освоения космоса. Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 2023. С. 192-195.

17. Разработка методов и бортовых технических средств обеспечения асептических условий проведения биотехнологических экспериментов в условиях пилотируемого космического полета. Кузнецова И.В., Бондаренко Д.С., Кутник И.В. В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2023. С. 137-139.

18. Анализ проведения подготовки космонавтов в рамках космического эксперимента "культивирование микроводорослей в условиях микрогравитации (КЭ «Фотобиореактор»). Попова Е.В., Кутник И.В., Фролова А.А. В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции. Звездный городок, 2023. С. 145-146.

19. Пути повышения эффективности деятельности космонавтов при выполнении программ научно-прикладных исследований. Юрченко Е.С., Курицын А.А., Кутник И.В. XLVII Академические чтения по космонавтике 2023. Сборник тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва. Москва, 2023. С. 404-405.

20. Анализ процесса выполнения космонавтами программ научно-прикладных исследований и экспериментов на борту существовавших и современных орбитальных космических станций и формирование предложений по его совершенствованию. Курицын А.А., Попова Е.В., Кутник И.В. К.Э. Циолковский. История и современность: материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 20-22 сентября 2022 г.: в 2 ч. Ч.2. С. 220-223.

21. История и современность: материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 20-22 сентября 2022 г.: в 2 ч. Ч.2. Использование и развитие комплекса функционально-моделирующих стендов «ФМС Наука» для подготовки космонавтов по целевым работам. Сабуров П.А., Попова Е.В., Кутник И.В., Кондратенко Ю.Г., Умнова Л.А., Кузнецов К.Б. С. 226-229.

22. Перспективы развития тренажерных средств подготовки космонавтов по выполнению целевых работ на борту РС МКС. Курицын А.А., Попова Е.В., Кутник И.В., Сабуров П.А. Идеи и новации. 2022. Т. 10. № 1-2. С. 86-92.

23. Особенности деятельности космонавтов при выполнении программ научно-прикладных исследований на борту орбитальных пилотируемых комплексов. А.А. Курицын, Е.В. Попова, И.В. Кутник, Н.А. Чуб. XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва (Москва, 30 марта - 02 апреля 2021 г.): сб. тезисов. В 4 т. - Москва, 2021. -Т. 3. - С. 65-66.

24. Системный подход к выбору целевой аппаратуры перспективных пилотируемых космических аппаратов. Курицын А.А., Кутник И.В.: К.Э. Циолковский и прогресс

науки и техники в XXI веке. Материалы 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 2021. С. 158-161.

25. Современное состояние и перспективы развития тренажерных средств подготовки космонавтов по выполнению целевых работ на борту РС МКС. Курицын А.А., Кутник И.В., Попова Е.В., Сабуров П.А. 10-й Международный Аэрокосмический Конгресс IAC'2021, Москва 2021, ISBN 978-5-919762058, С.247-249.

26. Развитие комплекса функционально-моделирующего стенда "ФМС Наука" при выполнении задач подготовки космонавтов по научно-прикладным исследованиям и экспериментам в космосе. Попова Е.В., Кутник И.В. Идеи и новации. 2020. Т. 8. № 3-4. С. 88-91.

27. Использование основ системы менеджмента качества для совершенствования подготовки космонавтов к выполнению программы научно-прикладных исследований на борту РС МКС. Кутник И.В. В книге: Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского. Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. 2019. С. 320-323.

28. Использование информационных технологий в процессе подготовки космонавтов по программе научно-прикладных исследований и экспериментов. Кутник И.В., Сабуров П.А., Попова Е.В.: Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность. Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. 2020. С. 198-201.