

На правах рукописи



ЧУБ Николай Александрович

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММ
ПОДГОТОВКИ ЭКИПАЖЕЙ 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

2025

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, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ имени М.В.Ломоносова)

Защита состоится «25» декабря 2025 года в 15.00 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=186119.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4 Отдел подготовки кадров высшей квалификации МАИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.03
доктор технических наук, доцент



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности подготовки экипажей перспективных пилотируемых комплексов (ПКК) за счет совершенствования процесса формирования программ подготовки экипажей путем разработки математического, методического и программно-алгоритмического обеспечения данного процесса.

Объектом исследования является программа подготовки космонавтов для выполнения космического полета.

Предметом исследования является процесс формирования программ подготовки космонавтов для выполнения космического полета.

Актуальность работы объясняется следующим.

Программа полета МКС предусматривает одновременную подготовку 12 экипажей МКС, программа подготовки каждого экипажа включает около 100 дисциплин по различным видам подготовки. В ближайшее время планируется дополнительная подготовка экипажей пилотируемого транспортного корабля нового поколения (ПТК) и экипажей Российской орбитальной станции (РОС). Используемое на практике методическое обеспечение планирования и отсутствие автоматизированных систем планирования подготовки космонавтов не позволяет в полной мере учесть все факторы, влияющие на данный процесс.

Таким образом, учитывая:

- постоянный рост объемов подготовки космонавтов для современных и перспективных ПКК;
- разработку перспективных космических программ, включающих подготовку к полетам на околоземной орбите, лунных и дальних космических миссий;
- потенциал применения современных компьютерных технологий для формирования и хранения программ подготовки космонавтов с учетом накопленного опыта эксплуатации ПКК,

с целью обеспечения наиболее эффективной подготовки космонавтов к космическому полету научной задачей исследований будет являться: разработка методики формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК с учетом ограничений в условиях усложнения информационных связей и увеличения объема решаемых задач космонавтами в полете.

Цель исследования: разработка методики формирования программ подготовки экипажей перспективных пилотируемых космических комплексов на основе системного подхода с учетом опыта эксплуатации существующих ПКК для повышения эффективности подготовки космонавтов.

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

- 1 Системный анализ существующего процесса подготовки экипажей пилотируемых космических аппаратов и разработка предложений по его совершенствованию;
- 2 Формирование моделей управления подготовкой космонавтов ПКК на основе двухуровневой системы управления процессами;
- 3 Разработка методики формирования программ подготовки экипажей подготовки экипажей перспективных ПКК с использованием современных информационных технологий;
- 4 Статистический анализ длительности подготовки экипажей ПКК по результатам подготовки экипажей МКС;
- 5 Разработка структуры и порядка использования автоматизированной информационной системы с целью формирования программ подготовки экипажей ПКК.

В соответствии с поставленными задачами работа структурно состоит из 4-х разделов и 3-х приложений.

Методы исследования, используемые при решении поставленной в работе научной задачи: системный анализ опыта полетов экипажей ПКК, контент-анализ нормативных документов, теоретический анализ и обобщение научной и методической литературы,

методы математической статистики, дискретной математики, теории четких множеств, метод математического моделирования, методы многокритериальной оптимизации.

Достоверность результатов определяется применением общепринятых методов исследований, использованием в работе результатов выполнения космических полетов экипажей МКС-1 – МКС-72 и реальных статистических данных по результатам подготовки космонавтов, проведением экспериментальных исследований при подготовке экипажей МКС на базе ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина» (в дальнейшем – ЦПК), ознакомление с полученными результатами специалистов по подготовке космонавтов, специалистов организаций, участвующих в подготовке космонавтов.

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, Бранеца В.Н., Вентцель Е.С., Грешилова А.А., Дегтярёва Ю.И., Демина Л.С., Егорова А.И., Зинченко В.П., Климука П.И., Кубасова В.Н., Курицына А.А., Лысенко Л.Н., Любинского В.Е., Малышева В.В., Микрина Е.А., Ногина В.Д., Новикова А.М., Подиновского В.В., Советова Б.Я., Соловьёва В.А., 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 системного исследования процесса подготовки космонавтов с целью совершенствования данного процесса разработаны модели управления подготовкой космонавтов, а также составляющие математического и программно-алгоритмического обеспечения формирования программ подготовки космонавтов:

- разработана модель двухуровневой системы управления подготовкой космонавтов, которая отличается от существующих использованием теории иерархических многоуровневых систем;
- разработана модель управления подготовкой экипажа ПКК, позволяющая определить основные управляющие параметры данного процесса;
- разработана математическая модель процесса формирования программы подготовки экипажа ПКК, которая отличается от существующих использованием аппарата дискретной математики с учетом разработанных критериев и ограничений;
- разработана методика формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК на основе автоматизированного алгоритма, включающего основные компоненты технологических процессов (планирование, перепланирование, формирование программ с учетом представленных ограничений), базирующийся на использовании автоматизированной информационной системы;
- определены статистические показатели длительности подготовки экипажей МКС на основе результатов выполнения космических полетов.

Все результаты, представленные в диссертации, **получены автором лично или при его непосредственном участии.**

Автором **лично** получены следующие новые результаты:

теоретического характера: предложения по совершенствованию процесса подготовки экипажей ПКК, формализация постановки задачи определения наиболее эффективных программ подготовки экипажей ПКК, двухуровневая модель управления подготовкой космонавтов, модель управления подготовкой экипажей на технических средствах подготовки космонавтов (ТСПК), математическая модель и методика формирования программы подготовки экипажей ПКК;

прикладного характера: автоматизированный алгоритм формирования программы подготовки экипажей ПКК, структура автоматизированной информационной системы планирования программ подготовки.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что по результатам исследований разработаны методические основы математического и программно-алгоритмического обеспечения формирования программ подготовки

космонавтов для различных ПКК с целью обеспечения наиболее эффективного выполнения космонавтами программ пилотируемых полетов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Модель двухуровневой системы управления подготовкой космонавтов на основе теории иерархических многоуровневых систем;
- 2) Математическая модель процесса формирования программы подготовки экипажа ПКК для решения задачи планирования с использованием математического аппарата дискретной математики, разработанных критериев эффективности;
- 3) Методика формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК, базирующаяся на использовании методических принципах обучения и разработанного автоматизированного алгоритма планирования;
- 4) Статистические показатели длительности подготовки экипажей МКС на основе результатов выполнения космических полетов;
- 5) Структура и порядок использования автоматизированной информационной системы планирования подготовки, позволяющая минимизировать операции обработки данных.

Автор исследований является членом отряда космонавтов Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», выполнил космический полет в качестве бортинженера экипажа МКС-71/72, космических кораблей «Союз МС-24» и «Союз МС-25» длительностью 373 суток 20 часов 15 минут.

Результаты проведенных исследований применялись при формировании программ подготовки экипажей МКС-71/72, МКС-73, проведении НИОКР по формированию программ подготовки экипажей 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 исследований использованы при создании автоматизированной информационной системы подготовки космонавтов.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационного исследования опубликованы 12 научных работ, включая: 5 статей в рецензируемых журналах из Перечня ВАК, среди которых 3 публикации соответствуют специальности 2.3.1 "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика" (технические науки); 2 работы в сборниках, индексируемых в международной базе данных Scopus; 5 иных публикаций в научных изданиях. Данные публикации отражают основные научные результаты диссертационного исследования.

Основные результаты работы докладывались:

- на L научных чтениях, посвящённых памяти Ю.А. Гагарина, г. Гагарин, 2023 гг.;
- XIV, XV Международных научно-практических конференциях, Звездный городок, 2021, 2023 гг.;
- 55-х научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, 2020 г.;
- 71, 72 Международных астронавтических конгрессах, Вашингтон, США, 2020 г., Дубай, ОАЭ, 2021 г.;
- XLV академических научных чтениях, посвященных памяти С.П. Королева, 2021 г.

Исследования в данной работе проводятся в соответствии с требованиями Федеральной космической программы РФ и Основных положений основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу, утвержденных Президентом Российской Федерации от 19 апреля 2013 г. n пр-906 по дальнейшему развитию отечественной космонавтики.

Структура и объём работы. В соответствии с решением поставленных задач работа структурно состоит из 4-х разделов и 3-х приложений. Работа содержит 146 страниц, 26 рисунков, 4 таблицы и 109 источников использованной литературы. По итогам исследований

разработана структура и порядок использования автоматизированной информационной системы планирования подготовки космонавтов, что 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 проведен системный анализ технологического процесса подготовки экипажей ПКК, определены предложения по совершенствованию существующего процесса подготовки космонавтов на тренажерах, выполнена постановка задачи исследований.

Планирование подготовки космонавтов на всех этапах направлено на решение задач последовательного, своевременного и полного выполнения программ подготовки, оптимального распределения учебной нагрузки на космонавта (группу космонавтов, экипаж), эффективного использования технических средств подготовки космонавтов.

Проведенный в данном разделе анализ существующего процесса подготовки экипажей ПКК и программы дальнейшего развития пилотируемого освоения космоса показывает, что процесс подготовки космонавтов к полету имеет сложную структуру, включает в себя 13 видов подготовки и около 100 различных дисциплин подготовки на 3 этапах подготовки и зависит в первую очередь от задач пилотируемой космонавтики на текущем этапе.

Показано, что эффективность подготовки космонавтов зависит от множества факторов, в том числе от качества планирования подготовки космонавтов на всех этапах, которое направлено на решение задач последовательного, своевременного и полного выполнения программ подготовки, оптимального распределения учебной нагрузки на космонавта (группу космонавтов, экипаж), эффективного использования технических средств подготовки космонавтов.

Анализ процесса подготовки экипажей МКС показывает, что на процесс планирования и реализации процесса подготовки космонавтов оказывает влияние как ряд ограничений, связанных как с человеческими ресурсами, так и ограничениями, накладываемыми возможностями ТСПК, так и ряд факторов неопределенности. Выявлены и сформулированы 31 ограничение, влияющие на процесс планирования подготовки космонавтов и 5 факторов неопределенности при реализации плана подготовки экипажей ПКК.

Осуществлена постановка задачи исследования, основывающаяся на сформированных в работе предложениях по совершенствованию процесса подготовки космонавтов к космическому полету исходя из опыта подготовки и выполнения полетов экипажей МКС и базирующаяся на теоретических основах автоматизированного управления и проектирования автоматизированных информационных систем. Показано, что совершенствование процесса подготовки космонавтов перспективных ПКК с учетом необходимости обработки больших объемов информации и увеличения объема решаемых задач на борту ПКК может быть достигнуто путем использования методов автоматизированного управления и разработки специализированной информационной системы.

Математическая постановка задачи исследований

Программа подготовки экипажа ПКК к выполнению космического полета содержит определенное количество учебных занятий Y_i в программе D_i по видам подготовки Q_i , которые должны проводиться в определенной последовательности.

Если показатель эффективности выполнения подготовки космонавтов представить как зависимость от параметров управления подготовкой, получим:

$$W_{\text{подг}} = f[X, U, F, I, K],$$

где параметры управления подготовкой экипажей на тренажерах:

X – показатели деятельности космонавта;

U – управляющие воздействия на процесс подготовки космонавтов;

F – влияющие на процесс подготовки внешние воздействия;

I – показателей подготовленности членов экипажа к полету;

K – корректирующие воздействия на процесс подготовки.

При известной зависимости показателей экипажа в процессе подготовки, полученных на основании анализа деятельности космонавтов в процессе занятий (тренировок), и учета начального уровня подготовленности членов экипажа L_0 :

$$\frac{dX}{dt} = f[L_0, U, F, I, K],$$

может быть математически формализована решаемая научная задача исследования:

Исходные данные на формирование программы подготовки:

$S = \{S_{\mu}, \mu=1, M\}$ – множество членов экипажа, из них M_0 – количество членов экипажа, имеющих опыт полета;

$Y = \{Y_y, y=1, N\}$ – множество занятий для формирования программы подготовки с учетом программы полета ЦП и должностных обязанностей и квалификации членов экипажа;

$L_0 = \{L_{01}, \dots, L_{0M}\}$ – начальный уровень подготовленности членов экипажа.

Ограничения на формирование программ подготовки:

$T_{\text{доп}}$ – допустимая продолжительность подготовки;

τ – рациональный промежуток времени между двумя соседними занятиями;

$Y_{\text{ТР}}$ – множество занятий, которые требуется провести обеспечения выполнения программы полета;

$T_{\text{ПЗ}}$ – рациональная длительность практического занятия или лекции;

$T_{\text{ТР}}$ – рациональная длительность тренировки;

$n_{\text{треб}}$ – требуемое нормативное число занятий по дисциплине;

$C_{\text{доп}}$ – ограничение на суммарную сложность занятий (тренировок) в день (неделю).

Требуется:

С учетом начального уровня подготовленности членов экипажа и показателей космонавтов X в процессе подготовки определить оптимальный вектор параметров управления U^* , представляющий собой упорядоченный набор занятий $\{Y_i \prec Y_j\}$

$$\{U^*\} = \text{Arg}_{\{U\}} \max W_{\text{подг}}(L_0, X, F, I, U, K),$$

доставляющий показателю эффективности $W_{\text{подг}}(L_0, X, U, F, I, K)$ максимальное значение, но не ниже требуемого $W_{\text{подг}}(L_0, X, U, F, I, K) \geq W_{\text{тр}}$ при множестве условий проведения занятий C_i и ограничениях β_i :

$$T_{\text{П}} \leq T_{\text{доп}}; \tau_{\text{н, доп}} \leq \tau \leq \tau_{\text{в, доп}}; T_{\text{н, доп}} \leq T_{\text{ТР}} \leq T_{\text{в, доп}}; n_{Y_i} \geq n_{\text{треб}}; C_{\text{сум}} \leq C_{\text{доп}}; Y_{\text{ТР}} \subseteq Y_i.$$

где $Y_{\text{ТР}}$ – множество занятий, которые должны быть включены в программу подготовки обязательно.

Наличие изменяющихся начальных условий подготовки (состав и количество опытных членов экипажа M_0 , длительность подготовки экипажа $T_{\text{П}}$, программа полета экипажа ЦП, начальный уровень подготовленности членов экипажа L_0) и необходимость учета внешних воздействий среды F в процессе подготовки требуют при проведении исследований использования методов и средств теории управления.

На рисунке 1 представлена методическая схема решения научной задачи путем разработки моделей и алгоритмов управления данным процессом.

Во втором разделе разработана методика формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК, основывающаяся: на выявленных факторах, влияющих на формирование программы, сформулированных методических принципах формирования программы подготовки, разработанных математической модели и алгоритме формирования программы подготовки экипажа ПКК к полету.

Общее управление подготовкой космонавтов в ЦПК осуществляет координирующий орган, управление по видам подготовки космонавтов осуществляют структурные подразделения, которые являются нижестоящим уровнем управления.

Этому варианту рассмотрения соответствует модель управления подготовкой

космонавтов, представленная на рисунке 2.

Программы подготовки космонавтов представляют собой набор учебных дисциплин по 13 видам подготовки космонавтов. Каждая дисциплина представляет собой набор занятий (лекции, практические занятия, тренировки, зачеты, экзамены).

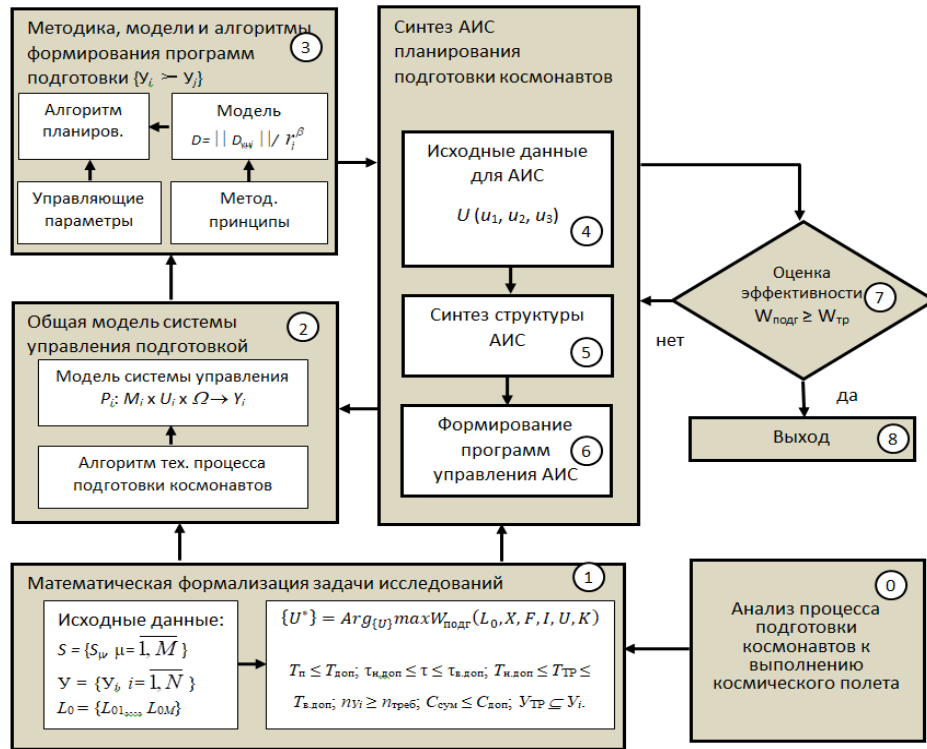


Рисунок 1 – Методическая схема решения научной задачи

Таким образом, программа подготовки космонавтов D для определенного этапа подготовки представляет собой упорядоченную определенным образом последовательность занятий Y_i , где занятие Y_i для программы подготовки D представляет собой оперативную единицу планирования.

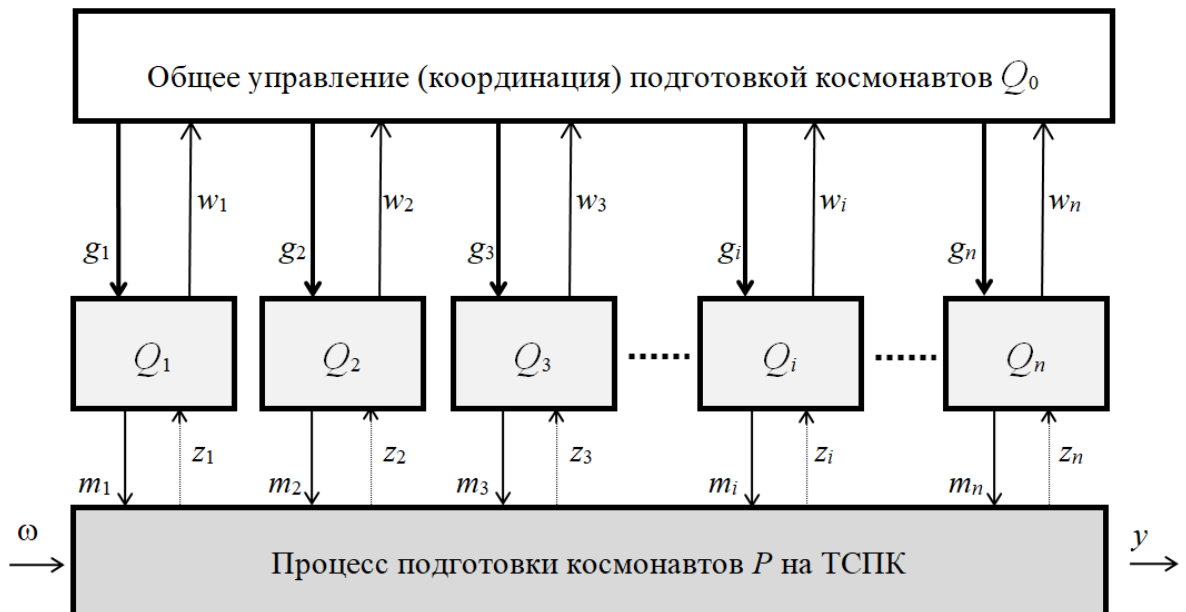


Рисунок 2 – Модель двухуровневой системы управления подготовкой космонавтов с n нижестоящими управляющими системами и единственной вышестоящей управляющей системой

Процесс подготовки космонавтов P представляет собой управляемую систему, к которой поступают управляющие воздействия от систем управления нижнего уровня по видам подготовки Q_1, \dots, Q_n .

Воздействие на процесс подготовки космонавтов P можно представить в виде отображения

$$P: M \times \Omega \rightarrow Y.$$

Поскольку имеется n систем управления нижнего уровня подготовкой космонавтов Q_1, \dots, Q_n , представим множество управляющих сигналов M для процесса P в виде декартова произведения n множеств

$$M = M_1 \times \dots \times M_i \times \dots \times M_n,$$

где i -ая система Q_i имеет i -ю компоненту m_i управляющего сигнала m , оказывая тем самым соответствующее воздействие на процесс подготовки космонавтов.

К элементам управляющей системы второго уровня, соответствующих определенному виду подготовки Q_i , поступают входные воздействия двух видов: координирующий сигнал g , $g \in G$, поступающий от координирующего органа, и информационный сигнал z_i (сигнал обратной связи), поступающий от процесса подготовки космонавтов P . Выходом Q_i является локальное воздействие m_i , выбираемое из множества M_i

$$Q_i: G \times Z_i \rightarrow M_i,$$

где Z_i – набор сигналов обратной связи, $z_i \in Z_i$; G – набор координирующих сигналов.

Разработанная модель управления подготовкой космонавтов показывает сложность оптимизации процесса подготовки космонавтов. В теории иерархических многоуровневых систем показано, что прямые математические методы оптимизации таких систем могут быть использованы только при выполнении следующих условий:

- система является двухуровневой;
- внешние возмущения отсутствуют;
- отсутствуют ограничения на управления.

Как показано выше, первое условие для обеспечения возможности использования математических методов оптимизации процесса управления подготовкой космонавтов выполняется. Однако два последующих условия не могут быть выполнены, так как на процесс подготовки космонавтов воздействуют многочисленные возмущения в виде директивных указаний, изменений условий деятельности и т.п.; подготовка космонавтов проводится в условиях многочисленных ограничений.

Учитывая, что условия для обеспечения возможности использования математических методов оптимизации применительно к процессу подготовки космонавтов не выполняются, для оптимизации данного процесса можно использовать только методы, к числу которых относятся: оптимизация при выборе наилучшего решения по выбранным критериям, адаптивная оптимизация (устранение выявленных недостатков), вмешательство в критических ситуациях.

Для определения управляющих параметров подготовки экипажей пилотируемых космических комплексов на средствах подготовки космонавтов необходимо рассмотреть модель управления подготовкой экипажей на ТСПК (рисунок 3), представляющую собой взаимодействие космонавта, координатора подготовки, инструктора и содержания обучения. На схеме ТСПК включает в себя тренажеры и стенды подготовки космонавтов, технические и программные средства, предназначенные для обеспечения подготовки экипажей.

На борту пилотируемого транспортного корабля «Союз МС» введены должности:

- командир корабля;
- бортинженер;
- бортинженер-1;
- бортинженер-2;
- участник космического полета.

На борту МКС в настоящее время определены следующие должности:

- командир экипажа;
- бортинженер;
- участник космического полета.

В соответствии с функциональными обязанностями членов экипажей МКС определены три классификационных уровня их ответственности за эксплуатацию бортовых систем станции. Члены экипажа экспедиции МКС могут иметь следующие квалификации:

- пользователь;
- оператор;
- специалист;
- испытуемый.

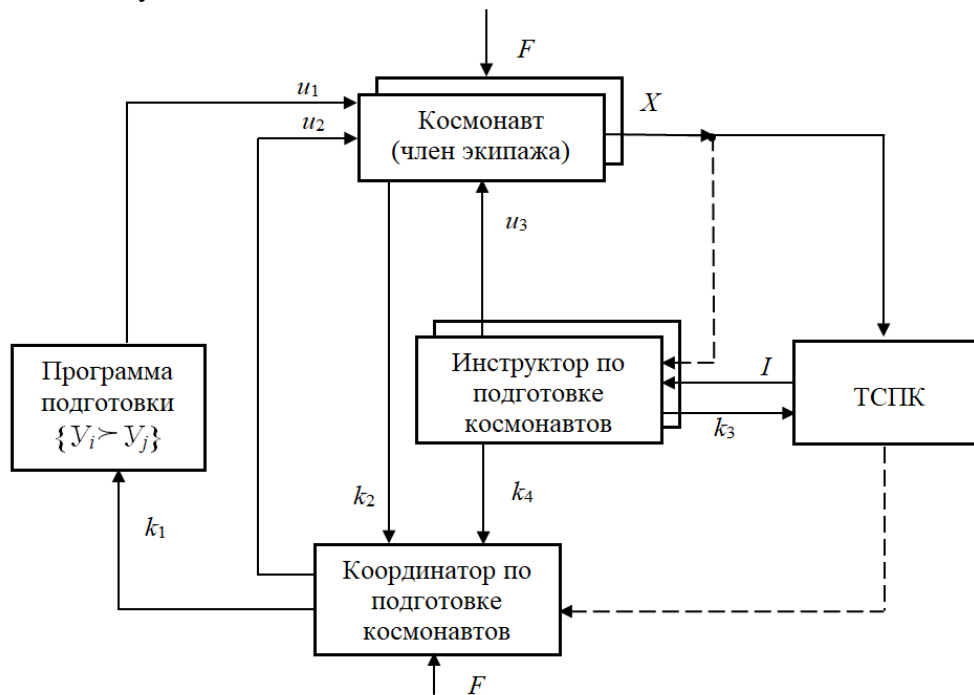


Рисунок 3 – Модель управления подготовкой экипажей на ТСПК

Для перспективных ПТК нового поколения и РОС на борту планируется введение новых полетных должностей: пилот и испытатель соответственно.

Планирование программы подготовки экипажей ПКК с использованием технических средств подготовки космонавтов зависит от целого комплекса факторов, основными из которых являются:

1) Организационные:

- состав членов экипажа ПКК на подготовке – S ;
- распределение должностных и функциональных обязанностей между членами экипажа;

2) Временные:

- длительность общего времени подготовки – T_n ;
- длительность непрерывной подготовки экипажа в России (длительность учебной сессии при проведении подготовки на базах различных международных партнеров) – T_c ;
- рациональное значение величины промежутка времени между двумя соседними тренировками $\tau_{тр.}$;

– длительность времени занятия (тренировки): для теоретического занятия $T_{теор.}$ – 2 часа; продолжительность тренировки $T_{тр.}$ – 4 часа, длительность типовых полетных суток составляет $T_{тпс}$ – 8 часов.

1) Технические:

- состав тренажной базы подготовки экипажей ПКК – $N_{трени.}$

2) Методические:

- программа полета экипажа ПКА – $I_{\text{п}}$;
- множество видов подготовки – $\{V_j\}$;
- множество занятий по виду подготовки – $\{Y_i\}$;
- множество целевых работ в программе полета – $\{ЦР_v\}$;
- начальный уровень подготовленности экипажа – L_0 ;
- количество членов экипажа, имеющих опыт полетов – M_o ;
- количество членов экипажа с квалификацией «Специалист» – S ;
- количество членов экипажа с квалификацией «Оператор» – O ;
- количество членов экипажа с квалификацией «Пользователь» – P .

3) Личностные: индивидуальные психофизиологические показатели космонавта.

В работе показано, что планирование подготовки экипажей ПКК с использованием ТСПК проводится на основе определенных методических принципов обучения. На основе опыта подготовки экипажей ПКК сформулированы методических принципов обучения, которые учитывают как дидактические принципы обучения, так и особенности подготовки космонавтов на технических средствах подготовки (таблица 1).

Таблица 1 – Методические принципы обучения

№	Основные методические принципы формирования программы подготовки экипажей ПКК
1	Учет располагаемых возможностей по числу занятий (тренировок)
2	Регулирование частоты проведения тренировок в зависимости от дефицита времени на подготовку
3	Предварительная классификация занятий в соответствии с квалификацией членов экипажа
4	Определение требований к необходимому числу тренировок
5	Учет опыта подготовки и выполнения полетов членами экипажа
6	Классификация тренировок на тренажерах по уровню важности и сложности при обучении и определения нормативного числа их повторений
7	Выдерживание в процессе подготовки существующей последовательности проведения занятий
8	Обеспечение преемственности тренировок

Задачу формирования программы подготовки можно представить как последовательность решения руководителем частных оптимизационных задач с учетом условий выполнения и ограничений.

Начальные условия решения задачи:

1 Множество видов подготовки космонавтов в составе экипажа

$$V_{\text{ЭК}} = \{V_i\} \in V,$$

где V – множество видов подготовки космонавтов на всех этапах.

2 Множество занятий для программы подготовки D экипажа ПКК

Множество теоретических занятий Y_3 и тренировок $Y_{\text{тр}}$, требующих включения в программу подготовки, зависит от должности членов экипажа и его квалификации на борту РС МКС

$$Y = \{Y_y, y \in N\}, N = \{1, \dots, n\}.$$

Каждый вид подготовки экипажей включает в себя множество занятий

- комплексная подготовка экипажей ПКК

$$K = \{Y_v, v \in \Omega\}, \Omega = \{1, \dots, d\};$$

- техническая подготовка по бортовым системам

$$T = \{Y_x, x \in \Lambda\}, \Lambda = \{1, \dots, w\};$$

- подготовка по научно-прикладным направлениям и исследованиям

$$N = \{Y_s, s \in \Xi\}, \Xi = \{1, \dots, q\};$$

- подготовка к внекорабельной деятельности

$$W = \{Y_c, c \in Z\}, Z = \{1, \dots, k\};$$

- подготовка к действиям после посадки

$$P = \{Y_p, p \in \Theta\}, \Theta = \{1, \dots, u\};$$

- медико-биологическая подготовка

$$B = \{Y_b, b \in \Psi\}, \Psi = \{1, \dots, l\}.$$

тогда $Y = K \cup T \cup N \cup W \cup P \cup B$.

3 Множество членов экипажа

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

Возможные должности членов экипажа на борту ПКК: КЭ, БИ, УКП.

Возможные квалификации членов экипажа на борту ПКК для учета при подготовке: специалист, оператор, пользователь, зарубежный КЭ.

4 Длительность подготовки – T_n , включающая в себя множество недель подготовки $\Gamma = \{\gamma\}$ в программе подготовки.

5 Продолжительность теоретического занятия – T_3 .

6 Продолжительность времени тренировки – $T_{тр}$.

7 Продолжительность подготовки в течение недели (дня) (без учета административного времени, времени на физподготовку и медконтроль) – $T_H = 30$ часов ($T_d = 6$ часов).

Необходимая длительность подготовки $T_{треб.}$ определяется по формуле 2.1.

При разработке программы подготовки учитывается множество условий C_i планирования i -го занятия (тренировки). Для формирования программы множество условий выполнения занятий (тренировок)

$$C_i = \langle C_{i1}, \dots, C_{i8} \rangle, i \in Z,$$

где C_{j1} – важность для подготовки (высокая – влияет на обеспечение безопасности полета, средняя – влияет на обеспечение выполнения программы полета, низкая); C_{j2} – сложность для подготовки (уровень 3 сложности – тренировки, связанные со сложной операторской деятельностью (тренировки на центрифуге, гидролаборатории, тренировки на тренажере ТПК с комплексом средств спасения, тренировки на комплексных тренажерах в аварийных ситуациях), уровень 2 сложности – тренировки на ТСПК; уровень 1 сложности – практические и теоретические занятия), сложность определяется с учетом конкретного периода планирования (дискретность 2 часа); C_{j3} – продолжительность; C_{j4} – число членов экипажа для ее выполнения; C_{j5} – отношение к члену экипажа (КЭ, БИ, УКП); C_{j6} – наличие предварительной подготовки; C_{j7} – специализация (специалист, оператор, пользователь, иностранный КЭ); C_{j8} – отношение к виду подготовки.

Формально, внесение занятия Y_i в программу подготовки экипажа можно представить как действие, описываемое кортежем

$$Y_i \leftrightarrow u_i = \langle \gamma_i, S_i, \tau_i \rangle,$$

где γ_i – номер недели подготовки, когда проводится i -е занятие (тренировка); S_i – множество членов экипажа, планируемых на i -е занятие (тренировку); τ_i – длительность i -го занятия (тренировки).

Предварительная программа подготовки космонавтов формируется по неделям подготовки. Затем составляется расписание на предстоящую неделю.

Имеется множество вариантов D_j программ подготовки, определяющие выполнения действий $u_i, u_i \in Y_j$.

Все множество D_j^B возможных вариантов программ подготовки

$$D_j^B \subseteq D_j.$$

Упорядочение j занятий (тренировок) в программе D_j^B , выбранных для подготовки по γ неделям координатором подготовки вводится в соответствии с необходимостью соблюдения последовательности проведения занятий (тренировок) при освоении соответствующей дисциплины (вида) подготовки. При этом

$$\bigcup_j u_{j\gamma} = \bigcup_j \langle \gamma_j, S_j, \tau_j \rangle.$$

Потенциальные возможности выполнения набора действий $u_{j\gamma}$ для программы D_j^B описываются множеством

$$\Delta = \{ \langle \gamma_j, \mu_j, y_j \rangle \in \Gamma \times S \times Y, j \in F \}.$$

Каждый кортеж в множестве Δ однозначно характеризуется функцией

$$D_{\gamma, \mu, y}: \Delta \rightarrow \{0, 1\}.$$

Задача планирования сводится к поиску функции

$$D_{\gamma, \mu, y} \leftrightarrow u_{j\gamma} = \langle \gamma_j, \mu_j, y_j \rangle.$$

Исходя из вышесказанного программу подготовки D экипажа ПКК можно формализовать как конечномерный вектор

$$D = \left\| \left\| D_{\gamma, \mu, y} \right\| \right\|, \gamma \in \Gamma, \mu \in M, y \in N.$$

Тогда математическая задача сводится к определению оптимально возможной программы

$$D_{\text{опт. воз.}} = \text{Sel} \{ D_{\text{воз.}} = \left\| \left\| D_{\gamma, \mu, y} \right\| \right\| / r_i^B \} /$$

по критериям $f_1(D)$ и $f_2(D)$ с учетом дополнительных критериев (штрафных функций).

Ниже приведен перечень ограничений:

1 *Необходимость внесения тренировок, требуемых для комплексной подготовки экипажа к выполнению программы полета с учетом основных режимов полета (старт, выведение, стыковка, расстыковка, перестыковка, спуск, действия на борту ПКК):*

$$\beta 1: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} = I_1 / I_1 \in \Omega, \forall y,$$

где I_1 – подмножество тренировок, необходимых для комплексной отработки программы полета, $I_1 \subseteq \Omega$.

2 *Необходимость внесения в программу тренировок, требуемых для подготовки экипажа к выполнению программы научно-прикладных исследований:*

$$\beta 2: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} = I_2 / I_2 \in \Xi, \forall y,$$

где I_2 – подмножество занятий, необходимых для отработки программы ЦР, $I_2 \subseteq \Xi$.

3 *Необходимость внесения в программу всех тренировок, требуемых для подготовки экипажа к выполнению программы ВКД:*

$$\beta 3: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} = I_3 / I_3 \in Z, \forall y,$$

где I_3 – подмножество занятий, необходимых для отработки циклограмм ВКД, $I_3 \subseteq Z$.

4 *Ограничение на общую длительность подготовки экипажа к полету определяет требование ограничения суммарного временного ресурса каждого члена экипажа на выполнение всех занятий (тренировок):*

$$\beta 4: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \cdot \tau_{y, \gamma} \leq T_{\Pi}, \forall \mu \in M.$$

5 *Ограничение на суммарный временной ресурс каждого члена экипажа на выполнение всех занятий (тренировок) в течение недели:*

$$\beta 5: \sum_{\mu, y} D_{\mu, y} \cdot \tau_{y, \gamma} \leq T_{\Pi}, \forall \mu \in M.$$

6 *Занятие (тренировка) y_l может быть выполнена только после выполнения y_n :*

$$\beta 6: D_{y_n, \gamma_n, \mu_n} - D_{y_l, \gamma_l, \mu_l} \leq 0, \forall y = n, l, y_n < y_l, y_n, y_l \in N_{\text{пр.}},$$

где $N_{\text{пр.}}$ – множество занятий (тренировок), связанные между собой условием предшествования.

7 *Ограничение на суммарную сложность занятий (тренировок) в течение одной недели:*

$$\beta 7: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \cdot C_{y2} \leq h_{\gamma}, \forall \gamma.$$

Критериями оценки плана являются следующие показатели эффективности плана:

1 *Включение в программу наиболее важных Y :*

Все занятия (тренировки), имеющие наибольший уровень важности для выполнения

программы полета в соответствии с должностными обязанностями и квалификацией на борту ПКК с учетом представленных ограничений, должны быть включены в программу подготовки.

Для важных Y_j :

$$f_1(D) = \sum_y D_y \cdot C_{y1B} \rightarrow \max.$$

2 Включение в программу максимального числа Y с учетом представленных ограничений:

$$f_2(D) = \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \rightarrow \max, \forall y \in N.$$

Исходя из предложенных критериев интегральный критерий оценки плана подготовки космонавтов к полету будет иметь вид $f = a_1 \cdot f_1 + a_2 \cdot f_2$, где a_1 и a_2 – весовые коэффициенты (исходя из проведенной экспертной оценки, в которой участвовали 7 космонавтов, имеющих опыт подготовки и космических полетов, $a_1 = 0,75$, $a_2 = 0,25$);

$f_1 = \frac{N_B^\Pi}{N_B}$, где N_B^Π – число занятий с высокой важностью, включенных в программу подготовки экипажа, N_B – общее возможное число занятий с высокой важностью;

$f_2 = \frac{N^\Pi}{N}$, где N^Π – число занятий, включенных в программу подготовки экипажа, N – общее возможное число занятий.

Дополнительные **критерии** оценки плана в виде «штрафных функций»:

1 Учёт располагаемых возможностей по числу тренировок по ТПК и ПКК

Резльтирующее число тренировок K_{TP} должно соответствовать возможному числу тренировок $K_{TP.B}$.

При проведении тренировок существует оптимальное значение между двумя соседними тренировками $\tau_o^* = \{t_{1,0}^0, t_{2,0}^0, \dots, t_{\infty,0}^0\}$. Если известно время, имеющееся для подготовку экипажа T_Π , тогда оптимальный вектор перерывов для конкретной программы подготовки

$$\tau^* = \{t_{1,0}^*, t_{2,0}^*, \dots, t_{K_{TP}-1,0}^*\},$$

где K_{TP}^* – идеальное число тренировок;

$$\sum_{j=1}^{K_{TP}^*-1} t_j^* = T_n^{K_{TP}^*}, \text{ при } t_o^* = t_o^0.$$

В процессе итераций планирования возможны некоторые отклонения от τ^* (календарь, необходимость увеличения числа тренировок и т.д.), тогда реальный вектор перерывов:

$$\tau^p = \{t_1, t_2, \dots, t_{N^p-1}\}$$

где K_{TP}^p – реальное число тренировок;

$$\sum_{j=1}^{K_{TP}^p-1} t_j = T_n^{K_{TP}^p} \leq T_n;$$

$$t_j \in [t_j^H, t_j^G] = \Delta t_j^*.$$

Таким образом, $\Delta t_j^* = f(t_n)$ или $f(j)$.

Аддитивный квадратичный критерий степени несоблюдения рациональной частоты тренировок имеет вид:

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{K_{TP}^p - 1} \sum_{j=1}^{K_{TP}^p-1} \frac{4(t_j^* - t_j)^2}{(t_j^*)^2}}.$$

При $\tau_p = \tau^*$, $\chi = 0$;

при $\tau_p = [t_1^* \pm (\Delta t_1^*/2), \dots, t_j^* \pm (\Delta t_j^*/2), \dots, t_{N^p-1}^* \pm (\Delta t_{N^p-1}^*/2)]$, $\chi = 1$;

χ может быть больше единицы, если имеют место случаи, когда $\Delta t_j > [t_j^H, t_j^G]$.

2 Соблюдение оптимальной длительности тренировок

Каждая тренировка должна иметь оптимальный (с точек зрения методической, педагогической, психологической и физиологической):

$$T_{TP}^* \approx 3T_{\text{витка}} \pm \Delta T_{TP}$$

Существует среднее время выполнения каждой полетной операции

$$\bar{t}_i^{\text{по}} = f(\lambda_i),$$

где λ_i – уровень тренированности по i -той полетной операции.

Тогда
$$T_{\text{Tp}j}^{\text{P}} = \sum_{i=1}^{N_j^{\text{T}}} \bar{t}_i^{\text{по}},$$

где N_j^{T} – число последовательных операций, выполняемых при проведении j -той тренировки.
 $T_{\text{Tp}j}^{\text{P}}$ – запланированное время j -той тренировки.

Тогда степень соблюдения T_{Tp}^* можно охарактеризовать величиной:

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{K_{\text{Tp}}^{\text{P}}} \sum_{j=1}^{K_{\text{Tp}}^{\text{P}}} \frac{(T_{\text{Tp}}^* - T_{\text{Tp}j}^{\text{P}})^2}{T_{\text{Tp}}^{*2}}}$$

3 Учет отработки необходимых медицинских мероприятий и занятий по физической подготовке

Все запланированные медицинские мероприятия при подготовке к космическому полету и программа физической подготовки с учетом индивидуальных особенностей космонавта должны быть включены в программу подготовки. В противном случае программа подготовки не может быть утверждена:

$$\eta = \begin{cases} 0, & \text{если включены в программу;} \\ 1, & \text{если не включены в программу.} \end{cases}$$

4 Выдерживание порядка возрастания сложности подготовки экипажей по неделям подготовки

В процессе подготовки должна сохраняться тенденция постепенного возрастания сложности подготовки по неделям (идеальная функция $C^*(t_{\text{П}})$ – монотонно возрастающая). Также не допускается резкого возрастания сложности подготовки, например, планирования в один день два занятия высокого уровня сложности. Обозначим:

$C_i(Y_i)$ – сложность i -того занятия (тренировки);

$C_H(Y_i) = \sum_{i=1}^n C_i(Y_i)$ – сложность занятий (тренировок) за неделю;

где n – число полетных занятий, запланированных на неделю подготовки (учитываются каждые 2 часа подготовки в соответствии с дискретностью планирования);

С точки зрения рассматриваемого показателя, программа составлена наилучшим образом, когда в нем осуществляется последовательное возрастание сложности подготовки. Стремление к такому построению упражнений аналогично требованию минимизации функционала:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{K_H} \sum_{i=1}^{K_H} \left[\frac{\max_{i=1, K_H} C_H(Y_i) - \min_{i=1, K_H} C_H(Y_i)}{K_H} i + \min_{i=1, K_H} C_H(Y_i) - C_H(Y_i) \right]^2}$$

где K_H – количество недель подготовки в программе.

Интегральный критерий оценки плана в виде «штрафных функций» будет иметь вид

$$\pi = b_1 \cdot \chi + b_2 \cdot \theta + b_3 \cdot \eta + b_4 \cdot \varepsilon,$$

где b_1, \dots, b_4 – весовые коэффициенты (исходя из проведенной экспертной оценки, в которой участвовали 7 космонавтов, имеющих опыт подготовки и космических полетов, $b_1 = 0,3$, $b_2 = 0,2$, $b_3 = 0,3$, $b_4 = 0,2$).

Разработанные показатели качества программы тренировок являются элементами вектора показателя качества K и могут быть использованы для выбора окончательного варианта программы подготовки космонавтов к космическому полету.

В диссертационной работе разработан и описан алгоритм формирования программы подготовки экипажа ПКК с использованием автоматизированной информационной системы.

Данный алгоритм разработан на основе разработанных методических принципов и сформированной математической модели формирования программы подготовки экипажей ПКК с учетом опыта проведения подготовки экипажей. Разработанный алгоритм является основой методики формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК.

Планирование подготовки в целом должно обеспечить достижение необходимого уровня подготовленности членов экипажа в соответствии с требованиями к подготовке и программой предстоящего полета.

Раздел три работы посвящен статистическому анализу длительности подготовки экипажей пилотируемых космических комплексов по результатам подготовки экипажей Международной космической станции.

Одним из основных факторов, влияющих на формирование программы подготовки космонавтов является длительность подготовки T_{Π} . К примеру, нормативно, длительность подготовки экипажа МКС определена как 2,5 года, однако, на практике, длительность подготовки меньше и зависит от даты назначения экипажа. Целесообразно рассмотреть фактическую длительность подготовки экипажей МКС для использования в интересах формирования программ подготовки экипажей ПКК. Для анализа рассмотрим длительность подготовки российских членов основных экипажей МКС, стартовавших на российских кораблях «Союз» и американских кораблях «Space Shuttle» и «Dragon V2».

Представим на общей числовой оси полученные выше выборки по продолжительности подготовки космонавтов к полету на МКС для полетов на российских кораблях и на американских кораблях, соответственно $K_t^{\text{Рус}}$ и $K_t^{\text{Амер}}$ (рисунок 4).

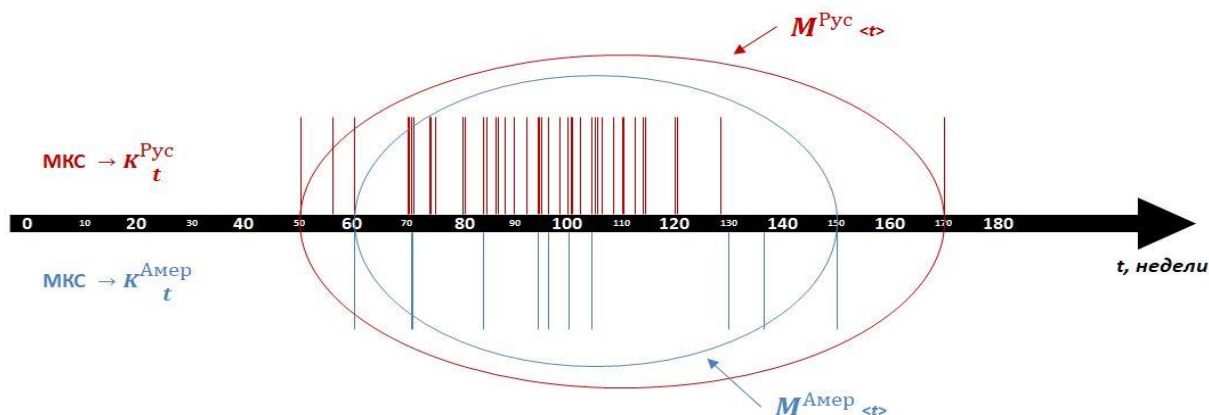


Рисунок 4 – Графическое представление пересечения множеств $M^{\text{Рус}}_{<t>}$ и $M^{\text{Амер}}_{<t>}$

Видно, что множество $M^{\text{Амер}}_{<t>}$ является собственным подмножеством $M^{\text{Рус}}_{<t>}$, т. е. $M^{\text{Рус}}_{<t>} \subset M^{\text{Амер}}_{<t>}$. Расстояние между множествами равно нулю, что свидетельствует о подобии продолжительности рассматриваемых процессов. Соответственно, можно рассматривать фактор продолжительности подготовки экипажей МКС T_{Π} вместе по всем кораблям доставки экипажей МКС

$$M^{\text{МКС}}_{<t>} = M^{\text{Рус}}_{<t>} \cup M^{\text{Амер}}_{<t>}$$

В рамках решения поставленной в работе задачи требуется провести статистический анализ длительности подготовки экипажей МКС для прогнозирования подготовки экипажей перспективных ПКК. Так как вместе с увеличением МКС увеличилась численность экипажа, целесообразно провести данный анализ с учетом количественного состава экипажа.

Для представленной в исследованиях выборки результаты расчетов представлены в таблице 2, построены диаграммы размаха по длительности подготовки экипажей (рисунок 5).

Для рассмотрения плотности распределения продолжительности подготовки

экипажей МКС целесообразно рассмотреть графики плотности $\tilde{\varphi}_t^*(t)$ и функции распределения $\tilde{F}_t^*(t)$ элементов множества $M_{<t>}^{\text{МКС}}$. Для построения последних сформирован статистический ряд (таблица 3), включающий 74 фактических значения длительностей подготовки экипажей МКС за период экспедиций МКС-1 – МКС-71 с учетом подготовки космонавтов в составе экипажей шаттлов и Crew («Dragon V2»). По сути, материалы этой таблицы являются набором данных по продолжительности полета в расчёте на один экипаж.

Таблица 2 – Определение доверительных интервалов по длительности подготовки экипажей

Параметры	Для экипажа из 2-3 человек	Для экипажа из 6 человек	Для экипажа из 7 человек	Для всех экипажей
Среднее арифметическое значение, $X_{\text{ср}}$	101,5	94,8	88,5	95,4
Дисперсия, D	908,3	296,0	278,9	454,4
Стандартное отклонение, σ	30,14	17,2	16,7	21,32
Доверительный интервал $X_{\text{ср}} \pm \sigma$	71,36 – 131,64	77,6 – 112	81,9 – 105,2	73,08 – 116,72
Доверительный интервал $X_{\text{ср}} \pm 3\sigma$	11,08 – 191,92	43,2 – 146,4	38,4 – 138,6	31,44 – 159,36

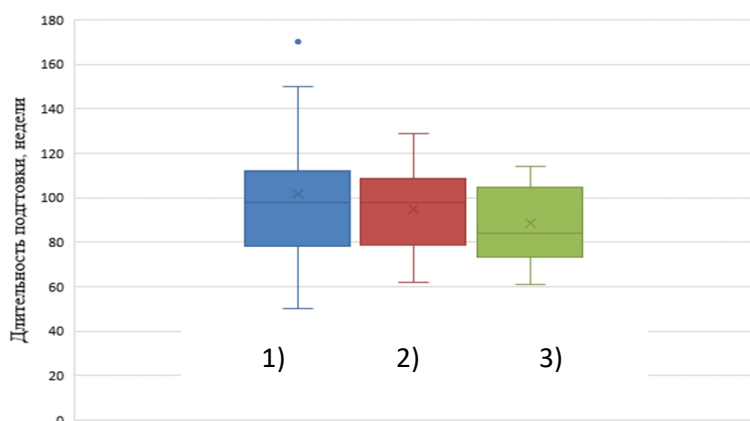


Рисунок 5 – Диаграмма размаха по длительности подготовки: 1) для экипажа из 2-3 человек; 2) для экипажа из 6 человек; 3) для экипажа из 7 человек

Распределение элементов выборки $K_t^{\text{МКС}}$ по разрядам J_i и их частоты $P_{t_i}^*$ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Интервальный вариационный ряд t_i для длительности подготовки экипажей МКС

Разряды J_i	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120	121-130	131-140	141-150	151-160	161-170	171-180	181-190
Число t_i в J_i	0	0	0	0	1	1	7	9	11	16	15	9	3	1	1	0	1	0	0
Частота $P_{t_i}^*$	0	0	0	0	0,01	0,01	0,09	0,12	0,16	0,22	0,20	0,13	0,04	0,01	0,01	0	0,01	0	0

На основании вариационного ряда t_i сформирована гистограмма распределения длительности подготовки для 74 основных экипажей МКС в виде полигона $\varphi_t^*(t)$ и огибающей в виде соответствующей статистической функции $\tilde{\varphi}_t^*(t)$ (рисунок 6).

При этом функция $\tilde{\varphi}_t^*(t)$ имеет вид:

$$\tilde{\varphi}_t^*(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}},$$

где μ_t – математическое ожидание;

σ_t – среднеквадратическое отклонение.

Кривая $\tilde{\varphi}_t^*(t)$ симметрична относительно оси ординат, проходящей через центр

рассеивания $X_{cp} = \mu$, имеет максимум в этой точке, перегиб в точках $X_{cp} \pm \sigma_{\hat{t}}$, с достоверностью 0,94 все значения \hat{t} лежат на промежутке $[X_{cp} \mp 3\sigma_{\hat{t}}] = [95,4 - 3 \cdot 21,32; 95,4 + 3 \cdot 21,32] = [31,44; 159,36]$, что говорит о принадлежности функции $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$ к нормальному распределению. Таким образом, при прогнозном оценивании проектов, например, РОС] можно ожидать, что длительность подготовки экипажей к полету будет находиться в рассчитанных границах.

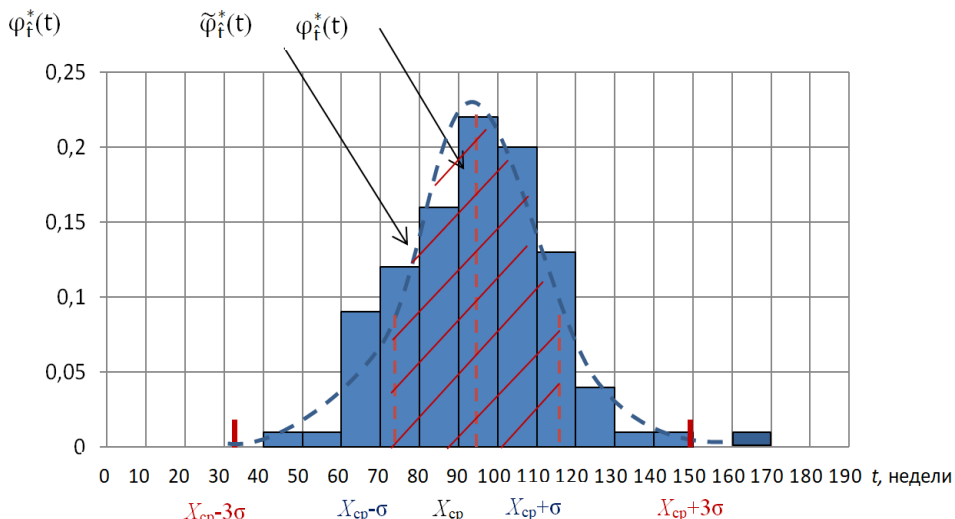


Рисунок 6 – Плотность распределения по разрядам длительности подготовки экипажей МКС

В четвертом разделе приводятся научно-технические основы синтеза структуры автоматизированной информационной системы планирования подготовки экипажей ПКК.

Для обеспечения необходимыми наборами данных для формирования программ подготовки разработан генератор тестовых наборов данных. Полученный генератор позволяет получать любое количество, в рамках требований к размерности наборов данных, тестовых данных для проверки алгоритмов планирования (рисунок 7). Получаемые данные, соответствуют набору дисциплин, включаемых в программу подготовки экипажей ПКК.

Реализация генератора выполнена на языке Python версии 3.12 в среде Spyder.

В программе используются следующие библиотеки с открытым исходным кодом:

1 Модуль Random. Реализует генераторы псевдослучайных чисел. Используется для генерации уникальных имен для каждого узла графа.

2 Пакет NetworkX. Предоставляет инструменты для работы со сложными сетевыми структурами. В работе используется для создания графов и операций с ними.

3 Пакет Matplotlib. Используется для визуализации полученных наборов данных.

На рисунке 8 представлен сгенерированный граф подготовки на примере формирования программы подготовки экипажа МКС-70/71.

Сгенерированный граф представляет собой набор графов, каждый из которых соответствует дисциплине с определенной длительностью проведения.

Исходя из проведенных в работе исследований и с учетом проведенного анализа существующих образовательных платформ, на рисунке 10 представлена структура единой автоматизированной системы (онлайн-платформы) информационной поддержки космонавтов, необходимой для доступности обучения и простоты получения знаний во время самоподготовки и повторения материала.

В настоящее время ведутся работы по созданию в ЦПК единой автоматизированной системы (онлайн-платформы) информационной поддержки космонавтов в рамках существующей в ЦПК автоматизированной системы информационного обеспечения подготовки космонавтов.

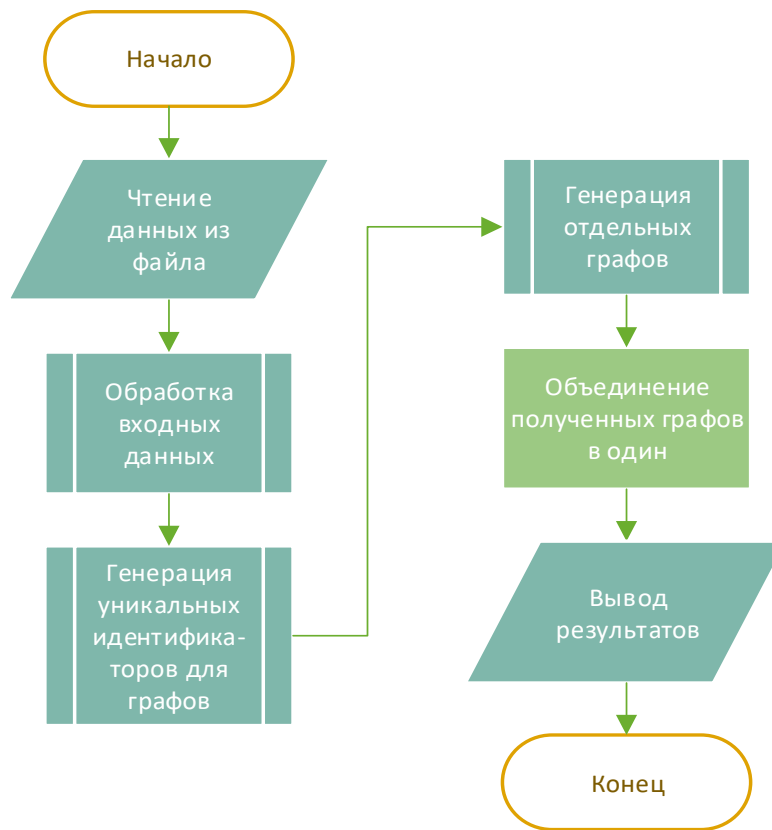


Рисунок 7 – Алгоритм генерации тестовых данных для обеспечения формирования программ подготовки экипажей ПКК

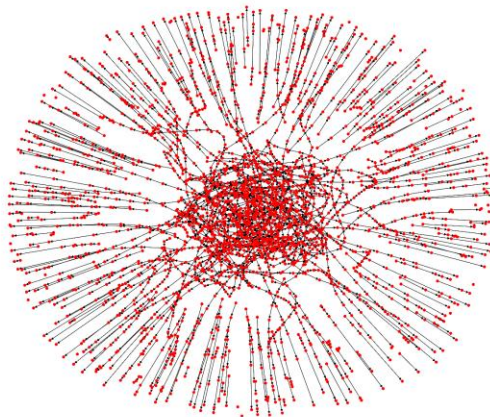


Рисунок 8 – Пример визуализации сгенерированного графа подготовки для экипажа МКС-70/71

Результаты исследований внедрены в процесс подготовки экипажей для формирования наиболее оптимальных программ подготовки экипажей МКС к космическому полету. Впервые предложены направления автоматизации процесса планирования подготовки космонавтов с применением АИС. Результаты проведенных исследований использованы при формировании программ подготовки экипажей экспедиций на Международную космическую станцию МКС-70/71, МКС-72, МКС-73 за счет введения количественных и качественных показателей эффективности программ подготовки космонавтов. Автор работы являлся членом экипажа годовой космической экспедиции МКС-70/71, что позволило ему непосредственно применить результаты исследований в процессы планирования и управления подготовкой космонавтов.

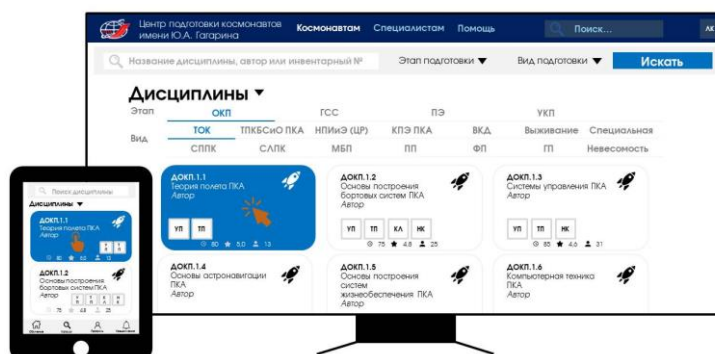


Рисунок 9 – Структура единой автоматизированной системы (онлайн-платформы) информационной поддержки космонавтов

Для оценки эффективности программы подготовки экипажей МКС к космическому полету используются показатели эффективности f_1 , f_2 , χ , Θ , η , ϵ , приведенные ранее. Указанные показатели эффективности рассчитаны для программ подготовки экспедиций МКС-56/57, МКС-64, МКС-70/71 с учетом длительности подготовки данных экипажей. Результаты расчетов представлены на рисунке 11.

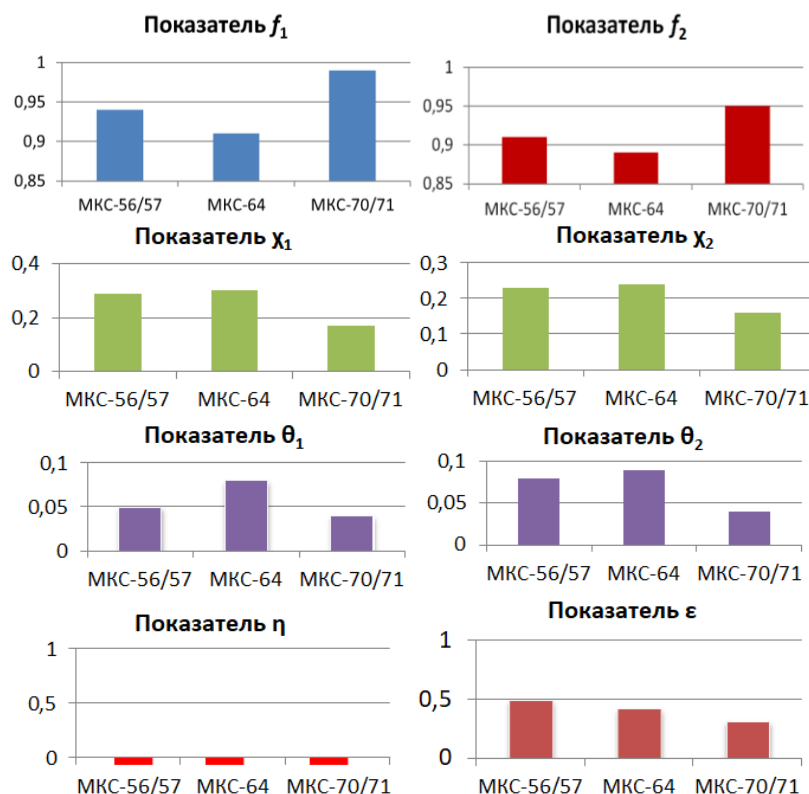


Рисунок 10 – Сравнительная оценка эффективности программ подготовки экипажей экспедиций МКС-56/57, МКС-64, МКС-70/71

Использование представленной в работе АИС подготовки космонавтов позволяет в полной мере учитывать весь занятия и тренировок для подготовки экипажей ПКК с учетом предъявляемых ограничений.

При расчетах учитывалось, что оптимальный интервал между проведением комплексных тренировок экипажей, исходя их опыта подготовки космонавтов, составляет: для ТПК «Союз» – $\tau = 2$ недели, для РС МКС – $\tau = 3$ недели.

Оценка эффективности программ подготовки экипажей МКС-56/57, МКС-64, МКС-

70/71 по разработанным показателям указывает, что показатели f_1 , f_2 имеют наибольшее значение у программы подготовки МКС-70/71, также для данного экипажа показатели χ , Θ , η , ε (штрафные функции для программы подготовки) имеют наименьшее значение.

Также результаты проведенных исследований использованы в рамках проведения научно-исследовательских работ как внутри ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», так и по заказу ГК «Роскосмос», в которых автор являлся соисполнителем, в части новых подходов к процессу подготовки космонавтов с учетом опыта полета на борту ТПК «Союз» и эксплуатации РС МКС и в части разработки предложений по развитию перспективных средств и технологий в части отбора, подготовки космонавтов для реализации пилотируемых программ до 2040 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена поставленная научная задача по разработке методики формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК с учетом предъявляемых ограничений на ресурсы планирования и опыта эксплуатации существовавших орбитальных ПКК в условиях усложнения информационных связей и увеличения объема решаемых задач космонавтами в полете для повышения эффективности подготовки экипажей.

В работе проведены системные исследования, формирующие концептуальное представление процесса планирования подготовки экипажей ПКК с использованием современных информационных технологий.

Проведенные в работе исследования находятся в русле требований Федеральной космической программы, предусматривающих создание после окончания эксплуатации МКС Российской пилотируемой 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 подготовки космонавтов к полету на борту существовавших и современных ПКК, разработаны предложения по совершенствованию данного процесса, формализована и поставлена математическая задача исследований.

2) Рассмотрение сформированного в работе алгоритма единого технологического процесса подготовки космонавтов к выполнению космического полета показывает, что Российская система подготовки космонавтов представляет собой многоцелевую, многоуровневую систему, состоящую из элементов, наделенных правом принимать решения, и по совокупности этих признаков она относится к иерархическим многоуровневым системам управления.

3) Разработанная модель двухуровневой системы управления подготовкой космонавтов, которая отличается от существующих использованием теории иерархических многоуровневых систем, показывает сложность оптимизации процесса подготовки космонавтов.

4) На основе опыта подготовки экипажей ПКК сформулированы 12 методических принципов обучения для формирования программ подготовки космонавтов, которые учитывают как дидактические принципы обучения, так и особенности подготовки космонавтов на технических средствах подготовки.

5) Определены основные управляющие параметры подготовки экипажей ПКК на основе разработанной модели управления подготовкой экипажей ПКК на средствах подготовки космонавтов, представляющей собой взаимодействие главных дидактических отношений космонавта, координатора подготовки, инструктора и содержания обучения.

6) Разработанная математическая модель формирования программы подготовки экипажей ПКК основана на методах дискретной математики и реализована как последовательность взаимосвязанных оптимизационных подзадач, при этом окончательный выбор решений из множества возможных вариантов осуществляется руководителем на основе заданных критериев эффективности с учетом выявленных системных ограничений,

что обеспечивает гибкость принятия управленческих решений при сохранении обоснованности предлагаемых вариантов программ подготовки.

7) Разработан и показан на примере трех экспедиций МКС многомерный показатель оценки эффективности подготовки космонавтов (6 показателей) для решения оптимизационной задачи формирования программы подготовки экипажа ПКК к космическому полету.

8) Разработана методика формирования программ подготовки экипажей перспективных ПКК, базирующаяся на методических принципах обучения и автоматизированном алгоритме формирования программ подготовки с учетом представленных ограничений.

9) Разработан автоматизированный алгоритм формирования программ подготовки экипажей ПКК, интегрирующий ключевые технологические процессы: планирование, динамическое перепланирование и формирование программ с учетом системных ограничений, основанный на использовании специализированной автоматизированной информационной системы, что позволяет повысить эффективность процесса подготовки космонавтов за счет обеспечения соответствия программ подготовки требованиям планов полетов и оперативной адаптации к изменяющимся условиям подготовки при сохранении требований безопасности и индивидуального подхода к каждому члену экипажа.

10) Проведен прогнозный статистический анализ длительности подготовки экипажей для перспективных пилотируемых космических комплексов по результатам фактической длительности подготовки российских космонавтов-членов экипажей МКС, стартовавших на российских кораблях «Союз», американских кораблях «Space Shuttle» и «Dragon V2», получена соответствующая статистическая функция плотности распределения по разрядам длительности подготовки экипажей МКС к полету и подтверждена принадлежность полученной функции к нормальному распределению, что показывает возможность использования данных статистических результатов для оценивания проектов перспективных ПКК.

11) В целях автоматизированной поддержки процесса формирования программы подготовки экипажа ПКК разработаны: генератор тестовых наборов данных, в котором на основании полученного распределения с учетом выявленных ограничений генерируется набор графов, каждый из которых представляет собой модель учебной дисциплины; структура единой автоматизированной системы (онлайн-платформы) информационной поддержки космонавтов для обеспечения процессов планирования и поддержки обучения космонавтов.

Полученные результаты соответствуют пунктам 3, 4 паспорта научной специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки), в ней рассматривается решение задачи системного анализа по выбору наиболее оптимального состава занятий и дисциплин для подготовки экипажей перспективных ПКК путем разработки критериев, моделей и алгоритмов решения задач оптимизации, управления и принятия решения с использованием компьютерных методов обработки информации.

Цель работы достигнута, поставленные в работе задачи исследований решены полностью. Достоверность полученных результатов подтверждается опытом выполнения космических полетов на борту ПКК, использованием реальных данных на основе программ полета экипажей МКС.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах ВАК по специальности 2.3.1.

1. Кононенко, О.Д. Основные результаты подготовки и деятельности 70-й и 71-й экспедиций МКС при выполнении программы космического полета / О.Д. Кононенко, Н.А. Чуб, А.И. Кондрат, Д.А. Темарцев, П.А. Сабуров // Пилотируемые полеты в космос. 2025. № 1 (54). С. 5-21.
2. Чуб, Н.А. Обоснование направлений автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей орбитальных пилотируемых комплексов / Н.А. Чуб, Т.А. Копа, А.А. Курицын, Т.В. Данюк // Пилотируемые полеты в космос. 2025. № 2 (55). С. 17-30.

3. Курицын, А.А. Подход к оценке эффективности эксплуатации космонавтами бортовых систем пилотируемых космических комплексов / А.А. Курицын, П.Ф. Пронина, С.Н. Микаев, Н.А. Чуб // Космонавтика и ракетостроение. 2025. №2 (139). С. 23-37.

В журналах ВАК

4. Васильева, Н.В. Проектирование стенда-тренажера для подготовки космонавтов к выполнению визуально-инструментальных наблюдений / Н.В. Васильева, Е.В. Дедкова, И.В. Кутник, В.Е. Фокин, Н.А. Чуб, Е.С. Юрченко // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 1. С. 115-125.

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

В материалах Scopus

6. Chub, N.A. Innovative Solutions In The Process Of Designing And Realization The Simulator To Train Cosmonauts For Visual Instrumental Observations From The Board Of The ISS / N.A. Chub, V.E. Fokin, M.M. Kharlamov, A.A. Kuritsyn, I.V. Kutnik, N.V. Vasilieva, V.I. Vasiliev, P.N. Vlasov В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. 71, Connecting @ll Space People. Сер. "71st International Astronautical Congress, IAC 2020 – The CyberSpace Edition" 2020 – B3.4-B6.4.6x58610. Conference Paper.

7. Kharlamov, M.M. Development Of A Multi-Segment Technology For Training Cosmonauts For Flight On The International Space Station / M.M. Kharlamov, O.I. Skripochka, V.N. Dmitriev, A.A. Kuritsyn, I.V. Kutnik, N.A. Chub, O.V. Blinov, D.A. Petelin, E.V. Yurchenko, E.V. Andreev // В сборнике: Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. Сер. "IAF Human Spaceflight Symposium 2021 - Held at the 72nd International Astronautical Congress, IAC 2021" 2021 – Dubai, UAE, IAC Paper IAC-21,B3.5.2x65332. Conference Paper.

В материалах научных конференций

8. Чуб, Н.А. Внедрение автоматизированных систем в процесс планирования подготовки космонавтов / В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»; Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» – Звездный городок, 2021. С. 38-39.

9. Чуб, Н.А. Особенности планирования подготовки экипажей пилотируемых космических кораблей / В книге: Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность. Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского – Калуга, 2020. С. 225-227.

10. Ковинский, А.А. Анализ возможности использования технологий современных информационных интернет-платформ для обеспечения процесса подготовки космонавтов / Ковинский А.А., Чуб Н.А. // В книге: Пилотируемые полеты в космос. Материалы XV Международной научно-практической конференции – Звездный городок, 2023. С. 106-107.

11. Курицын, А.А. 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 научные чтения, посвященные памяти С.П. Королева – Москва, 2021. ISBN 978-5-7038-5668-0 (т. 3), С.65-66.

12. Курицын, А.А. Использование аппарата дискретной математики для формирования программ научных исследований перспективных пилотируемых космических комплексов / А.А. Курицын, И.В. Кутник, Чуб Н.А. // Материалы 50 Международных общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А.Гагарина, том 2 – Гагарин: Смоленская область: ФГБУК «Музей-заповедник Ю.А. Гагарина», 2024. – С.164-173. – ISBN 978-5-6046023-8-6.