

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

## THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.786.2

### ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КОМПЛЕКСНОЙ ПОДГОТОВКИ ЭКИПАЖЕЙ ОРБИТАЛЬНЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ

Н.А. Чуб, Т.А. Копа, А.А. Курицын, Т.В. Данюк

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации, инструктор-космонавт-испытатель 2-го класса отряда космонавтов ГК «Роскосмос» Н.А. Чуб; Т.А. Копа; докт. техн. наук, доц. А.А. Курицын; Т.В. Данюк (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье обосновываются направления автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей орбитальных пилотируемых комплексов (ОПК) в условиях роста сложности тренировок и ограниченности временных ресурсов. Авторы анализируют существующую систему подготовки и предлагают решения для ее оптимизации. Основные предложения включают разработку математической модели управления подготовкой, создание автоматизированной информационной системы для хранения и обработки данных, а также внедрение комплексной обучающей системы. Показано, что автоматизация сократит время на подготовку документации, снизит риск ошибок и повысит эффективность анализа результатов.

**Ключевые слова:** Международная космическая станция, орбитальные пилотируемые комплексы, информационные технологии, космонавты, подготовка космонавтов, комплексные тренажеры

#### **Justification of Directions to Automating the Integrated Training Process for Crews of Orbital Manned Complexes. N.A. Chub, T.A. Kopa, A.A. Kuritsyn, T.V. Danyuk**

The article examines approaches to automating the comprehensive training process for crews of orbital manned complexes given the increasing complexity of training programs and limited time resources. The authors analyze the existing training system and propose optimization solutions. Key recommendations include the development of a mathematical model for training management, creation of an automated information system for data storage and processing, and the implementation of a complex training system. The study demonstrates that automation will reduce documentation preparation time, minimize error risks, and enhance the efficiency of results analysis.

**Keywords:** International Space Station, manned orbital complexes, information technology, cosmonauts, cosmonaut training, integrated simulator

Деятельность экипажа на борту многомодульного ОПК в течение длительной экспедиции существенно отличается от деятельности, например, экипажа на борту транспортного пилотируемого корабля. Общее количество взаимосвязанных между собой полетных операций и нештатных ситуаций (НшС) на борту современных и перспективных ОПК, выполняемых с участием экипажа, может достигать десятков тысяч [1]. Первые орбитальные станции по программам «Салют» включали в себя один орбитальный модуль, и набор выполняемых операций на станции был очень ограничен, орбитальный комплекс «Мир» состоял уже из семи модулей. МКС на данный момент представляет собой комплекс из 17 модулей, двух внешних ферм и двух управляемых манипуляторов. Соответственно, процесс комплексной подготовки экипажей ОПК в настоящее время представляет собой чрезвычайно сложную, зависящую от значительного количества факторов и связанную с множеством организаций систему. Дальнейшее усложнение информационных связей в процессе комплексной подготовки экипажей ОПК в условиях ограничения времени на принятие решения руководителем тренировки выдвигает требования к использованию методов и технологий автоматизированного управления [1, 2] и применению современных технологий обработки информации.

### **Анализ процесса комплексной подготовки экипажей ОПК**

Основной целью комплексной подготовки космонавтов является формирование у экипажа уровня профессиональной подготовленности, требуемого для выполнения программы космического полета на ОПК в составе экипажа, то есть совокупности знаний и навыков, необходимых членам экипажа для совместного выполнения поставленных задач внутрикорабельной деятельности, выходу из расчетных НшС, умений находить оптимальные пути решения проблем при планировании и организации работ на борту пилотируемого космического аппарата (ПКА), а также отработка взаимодействия членов экипажа между собой и Центром управления полетами (ЦУП) [3].

Основными формами комплексной подготовки космонавтов по российскому сегменту Международной космической станции (РС МКС) являются:

- теоретические занятия;
- практические занятия на штатных изделиях и на комплексных испытательных стендах и тренажерах;
- тренировки на технических средствах, в том числе на специализированных и комплексных тренажерах.

В целях обеспечения комплексности подготовки и персональной ответственности за ее результаты для каждого сформированного экипажа назначается инструктор комплексной подготовки экипажа по ОПК. Инструктор экипажа непосредственно отвечает за разработку программы подготовки

экипажа, организацию и проведение занятий и тренировок экипажа, качество подготовленности экипажа по своему направлению. Инструктор экипажа обязан постоянно оценивать качество и подготовленность экипажа по результатам выполненных тренировок. Процесс комплексной подготовки представлен на рис. 1.

Опыт подготовки экипажей орбитального корабля (ОК) «Мир» и РС МКС показывает, что проведение тренировок на комплексных и специализированных тренажерах является основной и наиболее важной формой комплексной подготовки экипажей ОПК [3].



Рис. 1. Процесс комплексной подготовки экипажей ОПК

Программа тренировки космонавтов на комплексных и специализированных тренажерах представляет собой перечень  $\{Y_i\}$  упражнений и порядок  $\{Y_i \succ Y_j\}$  их отработки при подготовке. При этом упражнения  $Y_i$  включают в себя совокупность полетных операций  $\{O_i\}$ , целевых работ (ЦР)  $\{ЦР_i\}$  и НшС  $\{A_j\}$ , которые подбираются для них по определенным принципам.

Длительность подготовки экипажа космической станции является ограниченной, поэтому и срок (Тп), отводимый на подготовку на тренажерах, является ограниченным и зависит от ряда факторов. К располагаемым ресурсам относятся: ресурсы технических средств подготовки космонавтов (ТСПК), ресурсы экипажа, ресурсы инструкторско-преподавательского состава.

Перед началом проведения подготовки инструктор совместно со специалистами по системам и полезной нагрузке определяют перечень и количество  $\{O_i\}$ ,  $\{ЦР_i\}$  и  $\{A_i\}$  для отработки на тренажерах, исходя из задач программы полета экспедиции, опыта экипажа и наличия материально-технических средств реализации. Специалисты по системам и полезной нагрузке должны отслеживать дополнения и изменения требований подготовки в рамках своей ответственности, знать текущее реальное состояние бортовых систем и аппаратуры на МКС и по просьбе инструктора экипажа выдавать ему имеющуюся информацию.

## **Обоснование направлений автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей ОПК**

Автоматизация процессов предусматривает использование в деятельности человека вычислительных средств (компьютеров) и технических средств [2], с помощью которых человек-руководитель может осуществить эффективный выбор оптимального решения и снизить время на обработку необходимой информации.

Направлениями автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей ОПК на основе анализа данного процесса будут являться:

- формализация процессов принятия решения инструктором экипажа на основе математического моделирования системы управления процессом подготовки на тренажерах;
- обработка и хранение структурированной информации по программам подготовки и циклограммам тренировок;
- создание и использование автоматизированных информационных систем планирования и проведения подготовки космонавтов, включающих в себя базы данных циклограмм занятий и тренировок, полетных операций, нестандартных ситуаций и ЦР применительно к тренировкам экипажей.

### Разработка математической модели системы управления процессом подготовки экипажей ОПК на тренажерах

Математическая поддержка процесса принятия решения на основе математического моделирования позволяет рассмотреть все составляющие данного процесса, их взаимосвязь и является основным фактором эффективности автоматизированного управления [2].

В целом процесс управления подготовкой экипажей ОПК на специализированных и комплексных тренажерах можно представить математической моделью многоуровневой системы управления (рис. 2). Данный процесс в дальнейшем можно декомпозировать на процесс планирования и непосредственно управления. Решая обе задачи с учетом предъявляемых исходных данных, можно определять наиболее эффективные программы подготовки космонавтов.

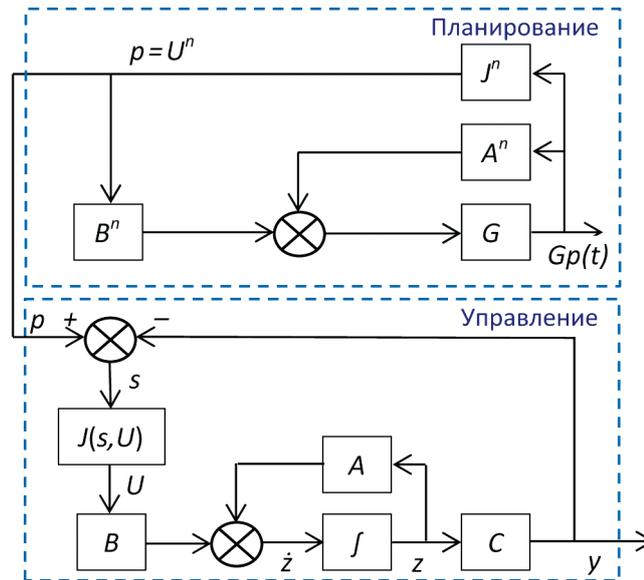


Рис. 2. Общая математическая модель системы управления подготовкой экипажей ОПК на тренажерах

Аппарат описания системы управления включает в себя два уровня: планирование и управление. Описание объекта управления будет иметь вид:

$$\dot{z} = Az(t) + Bu(t);$$

$$y(t) = Cz(t), u(t) \leq b(t).$$

Управляющая часть:

$$s(t) = p(t) - y(t), J \rightarrow \min,$$

где  $p, z, u, y, s, b$  – векторы плана, состояния, управления, выхода, отклонения, ресурсов на подготовку космонавтов;

$A, B$  – матрицы, характеризующие динамику изменения подготовки космонавтов;

$J$  – матрица, характеризующая ресурсы управления и планирования;

$C$  – оценка деятельности космонавтов на подготовке;

$G$  – функция планирования тренировок.

В дальнейшем при проведении исследований целесообразно рассмотреть каждую составляющую данного процесса.

### **Обработка и хранение информации по программам подготовки и циклограммам тренировок**

На каждую тренировку инструктор составляет методическую карточку, которая содержит следующие элементы:

– обложка, на которой указывается дата проведения тренировки, наименование экипажа, состав бригады специалистов, задействованных на тренировке, перечень бортовых инструкций, перечень НшС;

– циклограмма тренировки (перечень работ для каждого члена экипажа);

– радиограммы (обязательными являются три радиограммы):

• по Форме 24 (программа полета на день);

• по Форме 23 (расписание сеансов связи на день);

• по Форме 23-14 (баллистическая информация для выполнения срочного спуска);

• остальные радиограммы (р/г) создаются при необходимости в зависимости от планируемых работ;

– справка по состоянию бортовых систем и запасам расходуемых материалов на тренировке;

– замечания к работе экипажа с указанием итоговой оценки за тренировку;

– данные по размещению оборудования в системе управления инвентаризацией (при необходимости);

– замечания и предложения от экипажа (при наличии);

– замечания к тренажерному комплексу (при наличии);

– замечания и предложения к бортовой документации (при наличии).

Циклограмма тренировки является самой важной частью методической карточки, на ее основании создается большая часть документации (рис. 3). Соответственно разработка циклограммы тренировки является для инструктора наиболее трудоемким и ответственным процессом, который требует:

– определить, в соответствии с программой подготовки экипажа, тему тренировки;

– определить перечень тренировочных процедур, включаемых в тренировку;

Циклограмма проведения комплексной тренировки по эксплуатации бортовых систем РС МКС

03.02.2025 (14:00-17:50)

СЕАНС СВЯЗИ	SG 1	13:40-14:38					14:59-16:50					17:04-18:10				
	ШСС	14:41-14:58					16:47-17:09									
GMT		14:00	14:10	14:20	14:30	14:40	14:50	16:20	16:30	16:40	16:50	17:00	17:10	17:20	17:30	17:50
КЭ (Космонавт 1)	Работа 1 / б/и п. XX стр. XX	Ежедневная конференция по планированию (S-band)					Работа 3 / п/с XXXX поУЗ Работа 4 Работа 6 / б/и XXX п. XX стр. XX по XXX					Мероприятие по связям с общественностью. Проведение ТВ-репортажа (Клп-S-band) / п/с XXXX				
БН-5 (Космонавт 2)	Работа 2 / п/с XXXX															
КОМАНДЫ НА ПКУ, НшС												НшС				
		Ежедневная конференция по планированию (S-band)					Ежедневная конференция по планированию (S-band)					Разбор тренировки				

Рис. 3. Пример фрагмента циклограммы тренировки экипажа МКС

- определить перечень НшС, обрабатываемых на тренировке;
  - установить оптимальную последовательность действий членов экипажа;
  - составить последовательность сеансов связи;
  - разработать план радиообмена с экипажем;
  - в соответствии с циклограммой тренировки определить перечень задействованных тренажеров и используемой аппаратуры;
  - определить исходные состояния используемых тренажеров перед началом комплексной тренировки;
  - определить состав бригады на тренировку из числа специалистов по системам и полезной нагрузке в соответствии с циклограммой тренировки.
- Циклограмма тренировки содержит следующую информацию:
- дата и время проведения тренировки;
  - состав и должности членов экипажа;
  - выполняемые работы для каждого члена экипажа с распределением по времени выполнения;
  - сеансы связи;
  - перечень вводимых НшС и планируемое время их ввода;
  - перечень и время выдачи команд инструктором с пульта контроля и управления (ПКУ);
  - примерный план радиообмена.

Остальные документы методической карточки формируются на основании информации, содержащейся в циклограмме, и по результатам проведенной тренировки, например замечания по работе экипажа.

Тренировки предполагают самостоятельную работу экипажа по разработанному инструктором сценарию тренировки. Инструктор контролирует действия космонавтов в процессе тренировки, а также имитирует работу специалистов ЦУПа, ведет голосовую связь и выдает указания и рекомендации по работе экипажа.

После завершения программы тренировки бригада, проводящая тренировку, выполняет анализ деятельности экипажа во время тренировки и выработывает заключение, в котором отражаются:

- полнота выполнения программы тренировки;
- введенные НшС, аварийные ситуации, реакция экипажа по их обнаружению, локализации и устранению;
- положительные моменты в деятельности экипажа при выполнении тренировочного задания;
- отклонения экипажа от нормы деятельности с анализом их причин и последствий;
- количество суммарных штрафных баллов, полученных экипажем;
- оценка деятельности экипажа во время тренировки.

По результатам тренировки, с учетом оценки деятельности членов экипажа, инструктор, если необходимо, корректирует программу подготовки, выдает рекомендации на проведение восстановительных занятий по системам.

Понятие сложности  $i$ -й полетной операции  $O_i$  введено в нормативных документах по организации и проведению комплексной подготовки экипажей к выполнению программы полета на борту РС МКС. Сложность полетной операции  $S(O_i)$  определяется, с одной стороны, ее объективной сложностью, а с другой – той нагрузкой, которую создает эта задача для данного конкретного оператора и его способностью успешно преодолевать препятствия, существующие в данной задаче, и выдерживать связанную с этим нагрузку.

Используя методику определения уровня сложности полетной операции, НшС применительно к тренировкам экипажей на комплексных тренажерах космических станций при подготовке экипажей, был проведен анализ циклограмм экзаменационных комплексных тренировок экипажей МКС, проводимых в Центре подготовки космонавтов за последние 20 лет. Для оценивания сложности тренировок  $S_{тр}$  производилось суммирование сложности отдельных работ, за исключением научных исследований и экспериментов, а также медицинских обследований. В результате анализа выявлена тенденция увеличения  $S_{тр}$  экипажей МКС в период с 2004 по 2023 г. (рис. 4). В первую очередь это связано с дооснащением РС МКС (увеличением количества модулей, систем, блоков), а также с расширением технической базы комплексного тренажера.

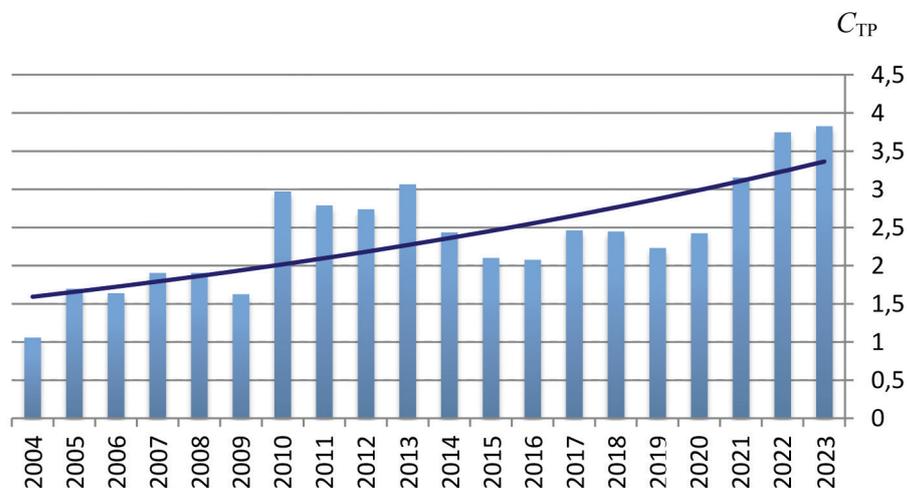


Рис. 4. Сложность экзаменационных комплексных тренировок экипажей МКС

Увеличение  $C_{тр}$ , а также появление дополнительного программного обеспечения для экипажа затрудняет процедуру подготовки к тренировке. На данный момент инструктор создает порядка 10 различных документов в нескольких форматах. Также большое количество времени затрачивается на отображение одной и той же информации в разных документах. Например, составляется циклограмма тренировки с указанием работ, выполняемых каждым членом экипажа, а далее на ее основании формируется радиограмма по Форме 24, с которой работает экипаж. Информация переносится вручную, что, помимо больших временных затрат, повышает вероятность совершения ошибки. Помимо этого, огромное количество данных затрудняет качественный анализ результатов подготовки.

В таблице представлена информация о документах, оформляемых инструктором на каждую тренировку, а также указаны источники информации для данных документов.

#### Документы проведения тренировки для обработки и хранения в информационных системах

Документ	Описание	Создается на основании	Пользователь	Формат
Обложка методической карточки	–	Расписание, Циклограмма	Инструктор	.xls
Циклограмма	–	–	Инструктор, специалисты тренажера	.xls
Радиограмма Ф24	Работы экипажа с привязкой по времени	Циклограмма	Экипаж	.xls .pdf

Окончание табл.

Документ	Описание	Создается на основании	Пользователь	Формат
Радиограмма Ф23	Информация о сеансах связи	Циклограмма	Экипаж	.xls .pdf
Радиограмма Ф23-14	Баллистическая информация	Циклограмма	Экипаж	.xls .pdf
Исходные данные	Состояние систем на начало тренировки	Циклограмма	Специалисты тренажера	.xls
Справка по состоянию борта	Р/г с описанием состояния систем	Циклограмма, Исходные данные	Экипаж	.doc .pdf
Messages	Файл для работы Execute Package	Циклограмма, р/г	Экипаж	.txt
Данные IMS	Данные по размещению оборудования в базе IMS	Циклограмма, база IMS	Инструктор, экипаж	.xls IMS
Радиограммы	Р/г по работам	Циклограмма, радиограммы из ЦУП	Экипаж	.doc .pdf
Замечания к экипажу	Замечания и рекомендации к работе экипажа с оценкой за тренировку	Проведенная тренировка	Инструктор	.xls
Замечания и предложения от экипажа	–	Проведенная тренировка	Инструктор	.xls
Замечания к тренажерному комплексу	–	Проведенная тренировка	Инструктор, специалисты тренажера	.xls
Замечания и предложения к бортовой документации (БД)	–	Мнение экипажа, специалистов по результатам тренировки	Инструктор, специалисты по БД	.xls

При подготовке экипажей ОПК на комплексных и специализированных тренажерах основными элементами данного процесса, подлежащими формализации, являются:

- разработка программы подготовки;
- разработка циклограммы тренировки;
- формирование программы ввода НшС;
- разработка вариантов изменения хода тренировки;
- формирование нормативных требований к деятельности экипажа в НшС;
- учет результатов тренировки.

## Создание и использование автоматизированных информационных систем планирования и проведения подготовки космонавтов

Основная причина, обуславливающая необходимость формализации этих операций, заключается в требовании учета больших объемов информации, а также в больших затратах времени на их проведение. Использование комплексной автоматизированной обучающей системы подготовки космонавтов (КАОСПК) может позволить сократить время на выполнение данных операций путем привлечения для этой цели соответствующих обрабатывающих программ, диалоговых систем и информационных баз данных. При этом автоматизируется не только сам логико-аналитический процесс решения этих задач, но и изготовление необходимых для проведения тренировки документов. Все указанные операции могут выполняться инструктором с одного и того же рабочего места. КАОСПК (рис. 5) включает в себя тренажерную систему и автоматизированную информационную систему планирования и проведения тренировок (АИСПТ). АИСПТ должна включать в себя:

- автоматизированные рабочие места подготовки к тренировке инструкторского состава и космонавтов;
- подсистему управления и информационного обеспечения;
- подсистему планирования деятельности экипажа;
- подсистему программного ввода НшС;
- подсистему обнаружения и распознавания НшС;

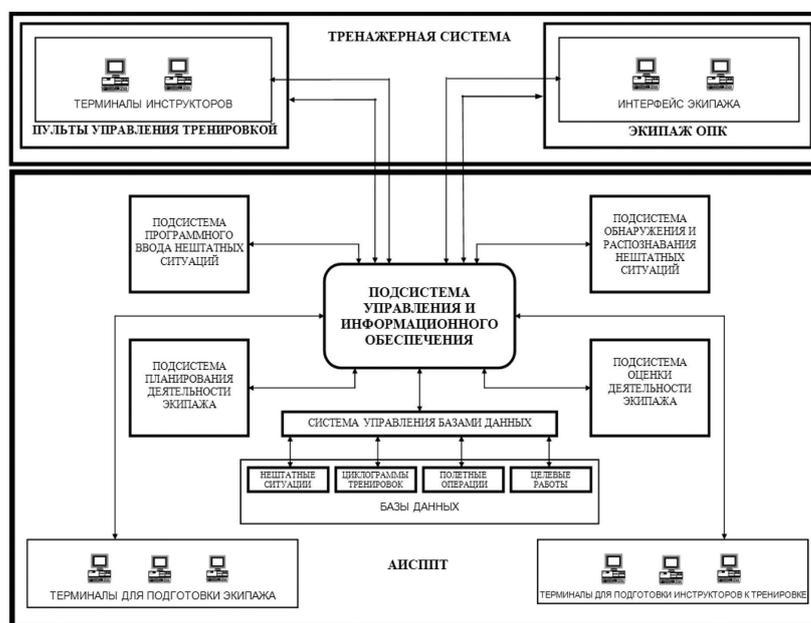


Рис. 5. Структура единой КАОСПК на тренажерах

- подсистему оценки деятельности экипажа;
- базы данных НшС, циклограмм тренировок, полетных операций, ЦР.

КАОСПК на тренажерах позволяет объединить тренажную систему, включающую в себя терминалы инструкторов и интерфейсы экипажа, с терминалами для подготовки экипажей к тренировке и терминалами подготовки инструкторов к тренировке. С использованием данной системы должен осуществляться обмен информационными потоками и документооборот обеспечения процесса подготовки экипажей на тренажерах ОПК.

С целью создания единой КАОСПК целесообразно дальнейшее объединение существующей автоматизированной системы информационного обеспечения отбора и подготовки космонавтов с информационными системами управления подготовкой космонавтов на ТСПК [3].

## Выводы

1. Показаны проблемные вопросы, которые обосновывают необходимость автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей ОПК:

- цена ошибки космонавта на борту высока, требуется максимально эффективная подготовка его к полету;
- постоянное увеличение сложности тренировок, а также процесса подготовки к ним;
- время на подготовку ограничено, необходимо использовать его максимально эффективно;
- автоматизация позволит проводить более глубокий анализ результатов подготовки и учитывать эти результаты в будущем.

2. Идея автоматизации заключается в том, чтобы с помощью используемых для этой цели вычислительных средств осуществлять те операции процесса подготовки, для которых логика выполнения и необходимые исходные данные могут быть достаточно просто и надежно формализованы.

3. Впервые предложены и обоснованы направления автоматизации процесса комплексной подготовки экипажей ОПК:

- формализация процессов принятия решения инструктором экипажа на основе математического моделирования системы управления процессом подготовки на тренажерах;
- обработка и хранение структурированной информации по программам подготовки и циклограммам тренировок;
- создание и использование автоматизированных информационных систем планирования и проведения подготовки космонавтов.

4. Впервые предложена математическая модель системы управления подготовкой экипажей ОПК на тренажерах, основывающаяся на теории автоматизированного управления, которая позволяет формализовать данный процесс, рассмотреть все составляющие данного процесса и их взаимосвязь.

5. Показано, что эффективным средством повышения производительности труда инструктора комплексной подготовки экипажа по ОПК и повышения качества разрабатываемых документов по подготовке является автоматизация процесса разработки этих документов.

6. С целью повышения эффективности процесса комплексной подготовки экипажей ОПК на комплексных и специализированных тренажерах целесообразно создание единой КАОСПК, включающей в себя тренажерную систему и автоматизированную информационную систему планирования и проведения тренировок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курицын, А.А. Основы организации деятельности экипажа на борту орбитального пилотируемого космического комплекса: монография / А.А. Курицын, Д.А. Темарцев, А.Н. Шкаплеров. – Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2024. – 314 с.
2. Советов, Б.Я. Теоретические основы автоматизированного управления: учебник для вузов / Б.Я. Советов, В.В. Цехановский, В.Д. Чертовский. – Москва: Высшая школа, 2006. – 463 с.
3. Курицын, А.А. Система подготовки космонавтов в Российской Федерации: монография / А.А. Курицын, М.М. Харламов, В.П. Хрипунов. – Звездный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2020. – 317 с.

#### REFERENCES

1. Kuritsyn A.A. Fundamentals of Crew Activity Organization on Board the Manned Space Orbital Complex: Monograph / A.A. Kuritsyn, D.A. Temartsev, A.N. Shkaplerov. – Star City: FSBO “Yu.A. Gagarin R&T CTC”, 2024. – 314 p.
2. Sovetov B.Ya. Theoretical Foundations of Automated Control: Textbook for Universities / B.Ya. Sovetov, V.V. Tsekhanovsky, V.D. Chertovsky. – Moscow: Higher School, 2006. – 463 p.
3. Kuritsyn A.A. Cosmonaut training system in the Russian Federation: Monograph / A.A. Kuritsyn, M.M. Kharlamov, V.P. Khripunov. – Star City: FSBO “Yu.A. Gagarin R&T CTC”, 2020. – 317 p.