

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С.К. Крикалёв

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ

Б.И. Крючков –
заместитель
главного редактора,

А.В. Кальмин –
ответственный секретарь,

Ю.М. Батурин,

М.Н. Бурдаев,

Л.К. Васильева,

С.П. Власенков,

Н.В. Волкова,

О.С. Гордиенко,

П.П. Долгов,

В.М. Жуков,

С.А. Жуков,

О.В. Котов,

Г.Д. Орешкин,

В.И. Почуев,

В.Н. Саев,

И.Г. Сохин,

М.В. Сураев,

М.М. Харламов,

В.М. Усов,

В.И. Ярополов.

СОДЕРЖАНИЕ

- Национальный радиационно-гигиенический
регистр космонавтов России: возможности
и перспективы. *И.Б. Ушаков,
А.Ю. Бушманов, В.М. Петров, А.П. Бирюков* 5
- Пилотируемые космические программы –
выбор пути. *В.В. Борисов* 13
- К формированию методологии выбора
и обоснования программ пилотируемых
космических полетов. *Д.Б. Пайсон* 26
- Особенности проведения и контроля
подготовки экипажей МКС из шести человек.
М.М. Харламов, А.А. Курицын, А.В. Темеров 36
- Текущее состояние и перспективы развития
системы управления полетами космических
аппаратов (*продолжение*). *В.А. Соловьёв,
В.Е. Любинский, Е.И. Жук* 44
- Об оценивании эффективности технического
обслуживания и ремонта КА. *Б.И. Крючков* 52
- Исследование возможности повышения
точности расчета отвода тепла из скафандра
при тренировках космонавтов
в гидролаборатории. *Е.Ю. Иродов,
П.П. Долгов, И.В. Галкина* 67
- Заменит ли робот космонавта в операциях
внекорабельной деятельности.
О.С. Цыганков, Д.В. Бабайцев 74
- И-сети для моделирования бортовых
вычислительных комплексов
в космических тренажерах.
Е.В. Полунина 88
- О полете на Марс. *М.Н. Бурдаев* 102

| | |
|---|-----|
| Материалы седьмого Международного аэрокосмического конгресса IAC'12, посвященного 55-летию запуска первого искусственного спутника Земли (представленные сотрудниками ЦПК)..... | 108 |
| НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ | 129 |
| Основные направления совершенствования систем МКС для проведения долгосрочных миссий. Материалы к докладу на совместной комиссии Райкунова-Стаффорда..... | 129 |
| Молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике»..... | 133 |
| Информация для авторов и читателей | 134 |

CONTENTS

| | |
|---|-----|
| National Radiative-Hygienic Register of Russian Cosmonauts: Possibilities and Prospects. <i>I.B. Ushakov, A.Yu. Bushmanov, V.M. Petrov, A.P. Biryukov</i> | 5 |
| Manned Space Programs – Finding a Way. <i>V.V. Borisov</i> | 13 |
| To the Development of Methodology of Selection and Substantiation of Manned Spaceflight Programs. <i>D.B. Piyson</i> | 26 |
| Specific Features of Carrying Out and Control of the ISS Six-Man Crew Training. <i>M.M. Kharlamov, A.A. Kuritsyn, A.V. Temerov</i> | 36 |
| Current Status and Prospects of Development of Spaceflight Control System (<i>continued</i>). <i>V.A. Solovyov, V.E. Lubinskiy, E.I. Zhuk</i> | 44 |
| Estimating the Efficiency of Maintenance and Repair of a Space Vehicle. <i>B.I. Kryuchkov</i> | 52 |
| Study of the Possibility of Improving Accuracy of Calculation of Heat Removal From the Pressure Suit During Training in Hydrolab. <i>Ye.Yu. Irodov, P.P. Dolgov, I.V. Galkina</i> | 67 |
| Will a Robot Replace a Cosmonaut in Performing EVA Operations? <i>O.S. Tsygankov, D.B. Babaytsev</i> | 74 |
| I-nets to Simulate Onboard Computational Complexes for Space Simulators. <i>E.V. Polunina</i> | 88 |
| On the Mission to Mars. <i>M.N. Burdaev</i> | 102 |
| Proceedings of the Seventh International Aerospace Congress Dedicated to the 55 th Anniversary of Launching the First Artificial Earth Satellite (Presented by Members of the GCTC)..... | 108 |
| SCIENTIFIC-INFORMATION SECTION..... | 129 |
| Main Directions of Upgrading the ISS Systems for Purposes of Long-Term Missions Materials for the Report to the Raykunov-Stafford Joint Commission | 129 |
| Youth Conference “New Materials and Technologies in Rocket-and-Space and Aviation Industry” | 133 |
| Information for Authors and Readers | 134 |

НАЦИОНАЛЬНЫЙ РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ РЕГИСТР КОСМОНАВТОВ РОССИИ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И.Б. Ушаков, А.Ю. Бушманов, В.М. Петров, А.П. Бирюков

Чл.-корр. РАН, акад. РАМН, докт. мед. наук, профессор И.Б. Ушаков (ГНЦ РФ–ИМБП РАН, Москва);
докт. мед. наук, профессор А.Ю. Бушманов (Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва);
канд. физ.-мат. наук, доцент В.М. Петров (ГНЦ РФ–ИМБП РАН, Москва);
докт. мед. наук, профессор А.П. Бирюков (Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва)

Статья содержит информацию по основным вопросам создания национального радиационно-гигиенического регистра для российских космонавтов. Указанные данные являются уникальной информацией, необходимой для решения самых разнообразных вопросов обеспечения радиационной безопасности текущих и перспективных космических полетов. Неповторимость каждого пилотируемого полета и ограниченный контингент участников этого вида деятельности человека определяют особую ценность сохранения данных об условиях облучения каждого космонавта в процессе профессиональной деятельности и о последствиях этого облучения в течение всей последующей его жизни. В статье приведены основные проблемы, связанные с созданием этого регистра.

Ключевые слова: радиационно-гигиенический регистр, радиобиологические эффекты, дозы облучения, биологическая эффективность, радиационная безопасность.

National Radiative-Hygienic Register of Russian Cosmonauts: Possibilities and Prospects. I.B. Ushakov, A.Yu. Bushmanov, V.M. Petrov, A.P. Biryukov

The paper contains information about primary issues of creating National Radiation-Hygienic Register for Russian Cosmonauts. Indicated data is the unique information needed for solving multiple problems of ensuring radiation safety of current and future space missions. The uniqueness of every manned flight and a limited number of people performing this type of human activity define a particular value of saving data about the conditions of irradiation of each cosmonaut in the process of career and the consequences of this exposure for the rest of their lives. The main problems of creating the Register are discussed in the paper.

Key words: Radiation-Hygienic Register, radiobiological effects, exposure dose, biological effectiveness, radiation safety.

При выполнении космического полета человек подвергается радиационному воздействию, формирующему неравномерное облучение органов тела с изменяющейся во времени мощностью дозы и интегрально накопленной дозой. Амплитуда воздействия может в десятки раз превышать уровни облучения работников атомных предприятий, достигая нескольких зивертов – значений, характерных для наземных радиационных аварий. При этом специфика воздействия космического излучения, состоящего из тяжелых заряженных частиц и вторичных высокоэнергетических нейтронов, обладающих чрезвычайно высокой биологической эффективностью, проявляется в возникновении практически на всех уровнях организации живых систем радиобиологических эффектов, отличных от имеющих место в наземных условиях, где преобладают редкоизирующие гамма- и бета-

излучения. Дополнительной особенностью облучения в космосе является чрезвычайно широкий энергетический диапазон воздействующей радиации (до 15 порядков величины) и уникальный характер радиационной обстановки. Эта особенность связана со стохастической природой возникновения мощных возрастаний потоков солнечных космических лучей (на три-четыре порядка выше по сравнению с невозмущенным радиационным фоном), генерируемых в солнечных протонных событиях, являющихся не радиационной аварией, а нормальным компонентом радиационной обстановки в космосе.

Очевидно, что найти наземные аналоги таких радиационных условий практически невозможно. Вместе с тем, перечисленные особенности радиационного воздействия на организм в целом, на его системы, на клеточном и геномном уровнях с учетом возможных нарушений межклеточных и межсистемных взаимодействий могут быть причиной развития разнообразных психофизиологических, функциональных, клинических и генетических повреждений, проявляющихся у космонавтов в ближайшем и отдаленном периоде в процессе и после завершения их профессиональной деятельности, а также у их потомства.

Для получения и совершенствования знаний о последствиях облучения человека в космосе, оценки характера и степени опасности этого облучения и разработки методов и средств радиологической защиты при дальнейшем освоении космического пространства огромную роль приобретает тщательный учет и детальный анализ как характера облучения каждого космонавта, так и медико-биологических последствий этого облучения на протяжении всего периода его профессиональной деятельности и после ее завершения в течение всей оставшейся жизни. Указанные работы можно провести только при условии формирования радиационно-гигиенического регистра (РГР), в котором должна быть сконцентрирована вся информация по перечисленным вопросам, включая, по возможности, по всем пилотируемым космическим полетам, совершенным в России. Отметим, что каждый полет человека в космос является уникальным событием в плане и условий его проведения, и медико-биологических реакций организма космонавтов на воздействие комплекса неблагоприятных факторов полета. Воссоздать такой набор воздействий на Земле практически невозможно. Поэтому для анализа закономерностей возникновения и развития разнообразных отрицательных последствий, для выяснения методов и средств противодействия этим последствиям, для исследования путей сохранения здоровья и работоспособности космонавтов в процессе полета и после его завершения неопределимую роль играют результаты наблюдения максимально большого числа медико-биологических, санитарно-гигиенических и физико-химических данных, специфичных для функционирования каждого члена отряда космонавтов как в процессе полетов, так и в интервалах между ними.

Цели и задачи радиационно-гигиенического регистра

Радиационный фактор можно признать одним из наиболее специфических неблагоприятных факторов космического полета. Прежде всего, он неизбежно присутствует среди факторов, составляющих среду обитания космического аппарата, поскольку в настоящее время отсутствует возможность снизить значение мощности дозы внутри космических аппаратов до значений, хотя бы соизмеримых с радиационным фоном, имеющимся в условиях предприятий атомной промышленности. Состав радиационных полей в космическом пространстве – высокоэнергетичные заряженные частицы и нейтроны, которые обуславливают очень высокую

эффективность радиационного повреждения живых структур излучением такого вида. Коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) варьирует в пределах единиц – десятков, изменяясь в зависимости от характера исследуемого биологического проявления. Особенностью облучения человека в космосе является значительный перепад доз от поверхности тела к органам, расположенным на разной глубине, характер которого зависит от радиационных условий конкретного космического полета. Естественно, что и радиобиологические последствия облучения также могут варьировать в весьма широких пределах. Все эти особенности должны найти свое выражение в планируемом РГР, поскольку учет этих особенностей необходим для правильного понимания взаимосвязи характеристик радиационного воздействия и всего комплекса вызываемых им последствий.

В настоящее время имеется достаточно богатый опыт создания РГР, накопленный как в связи с планомерным использованием источников ионизирующего излучения, так и в связи с катастрофическими случаями облучения больших контингентов людей (атомная бомбардировка городов Японии, Чернобыльская катастрофа). В этих случаях создавался медико-дозиметрический регистр, обеспечивающий максимально полный учет и контингента людей, попавших под облучение, и дозиметрических факторов, характеризующих воздействие, и радиобиологических и клинических последствий.

Сформулируем основные положения по обсуждаемому РГР с учетом специфики облучения человека в космическом полете. Используя опыт формирования Медико-дозиметрического регистра по Чернобыльской катастрофе [1], определим следующую цель обсуждаемого РГР.

Регистр планируется как информационная система национального уровня, ориентированная на проведение комплексных клинико-эпидемиологических исследований по объективной оценке факторов риска для профессиональной группы космонавтов и выработку рекомендаций, направленных на:

- совершенствование нормативов по радиационной безопасности космических полетов;
- разработку санитарных правил по соблюдению требований нормативной документации;
- повышение эффективности лечебно-профилактических и реабилитационных программ здравоохранения космонавтов, включая обоснование и разработку программ специализированных научно-прикладных исследований по проблеме.

К основным задачам Регистра следует отнести:

- персональный автоматизированный учет членов отряда космонавтов на основе максимально полных данных об уровнях их облучения в процессе профессиональной деятельности;
- постоянный мониторинг состояния здоровья космонавтов и их потомства на основе организации специализированного диспансерного обследования и изучения структуры, характера, динамики и тенденций в заболеваемости и ее исходов по наблюдаемому контингенту;
- проведение необходимых лечебно-оздоровительных мероприятий по результатам проведенных диспансеризаций и оценка состояния здоровья;
- формирование и поддержание банка данных по индивидуальным дозам облучения космонавтов с учетом динамики их накопления в процессе профессиональной деятельности и специфики формирования радиационной нагрузки на ведущие системы и организм в целом;

– разработку рекомендаций по методам диагностики, профилактики и лечения, защитных мероприятий, реализуемых как в процессе полета, так и после его завершения, а также по мерам оказания, в случае необходимости, специализированной медицинской помощи;

– разработку специальных научных программ по изучению медицинских последствий облучения человека в космосе, включая методологию оценки радиационного риска и требований по его ограничению с учетом перспектив освоения космического пространства.

Организация разработки и поддержания функционирования РГР

Учитывая неординарность задачи, необходимо подчеркнуть, что разработка и реализация РГР должна носить межведомственный характер с ориентацией на ведущую роль Минздравсоцразвития (ФМБА) с участием ведомств, ответственных за реализацию пилотируемых космических полетов, разработку научно-методических основ обеспечения радиационной безопасности человека в космосе, разработку и выпуск нормативной и регламентирующей документации, регулирующей юридические аспекты проблемы.

Регистр планируется как информационная система национального уровня, ориентированная на проведение комплексных клинико-эпидемиологических исследований по объективной оценке факторов риска для данной профессиональной группы и выработки рекомендаций для повышения эффективности лечебно-профилактических и реабилитационных программ здравоохранения космонавтов. Указанные работы можно провести только при условии концентрации в регистре всей доступной информации.

Опыт действующих радиационно-гигиенических регистров (японские медико-дозиметрические регистры, объединенный регистр работников атомной промышленности Великобритании, регистр работников основных производств предприятий ПО «Маяк», Национальный радиационно-эпидемиологический регистр и др.) [2] и наиболее известных радиационно-эпидемиологических исследований (изучение жизненного статуса жертв атомной бомбардировки японских городов [Hiroshima Life Span Study (LSS) и др.] [3], Международное кооперативное исследование отдаленных результатов профессионального облучения в 14 странах [Cardis E., Gilbert E., Carpenter L., et al. 1995] [4] и др.), свидетельствует о необходимости, прежде всего, мониторинга данных о выраженности факторов риска и их манифестации на клиническом уровне.

Накопленный за 19 лет функционирования Российского государственного медико-дозиметрического регистра опыт показал, что только персонализированный многолетний учет изменений в состоянии наблюдаемого контингента может дать информационную основу для объективного ответа на вопрос о действительном ущербе здоровью космонавтов, подвергшихся воздействию радиации в процессе выполнения космических полетов. Таким образом, персональный автоматизированный учет членов отряда космонавтов будет организован на основе максимально полных данных об уровнях их облучения в процессе профессиональной деятельности, состоянии здоровья и детализированных сведений о возможной суперпозиции эффектов воздействия и других негативных факторов профессиональной природы. Для этого будет использована персональная информация о случаях заболевания или смерти у наблюдаемого контингента в виде списков определенного формата, относящихся к конкретному календарному году.

В рамках данного проекта будут сформированы компьютерные базы данных, полученных путем ввода персональной информации, находящейся во всех переданных ранее списках. При этом интерфейс пользователя этих баз данных будет позволять введение не только ретроспективных сведений, но и новой информации. Необходимо подчеркнуть, что специальное внимание должно быть уделено однородности данных, вносимых в РГР.

Естественно, что в ходе развития работ по освоению космического пространства изменялись и методы оценки состояния здоровья космонавтов, и методы радиационного мониторинга. При исследовании медико-биологических показателей здоровья космонавтов после завершения карьеры не всегда соблюдалось требование полноты и стабильности получаемых данных, что, естественно, приводит к уменьшению статистики тех характеристик, которые могут оказаться существенными при выполнении эпидемиологического анализа имеющейся статистики. Определенную роль при создании РГР будет играть ретроспективный анализ данных медико-биологического обследования космонавтов, выполнявшегося в различных медицинских учреждениях, направленный на соблюдение требования однородности информации. Аналогичная ситуация складывается и с определением радиационной нагрузки на космонавтов. Необходимо разработать и реализовать процедуру верификации и восстановления доз облучения космонавтов российских космических аппаратов с учетом их защитных характеристик, особенностей радиационной обстановки на орбите и показаний бортовой и индивидуальной дозиметрической аппаратуры.

Предполагается выполнение следующих основных этапов проекта:

1. Разработка методологии создания интегрированной базы данных персональных доз и методологии сбора данных о состоянии здоровья наблюдаемого контингента.
2. Разработка интегрированной базы данных персональных измерений доз облучения космонавтов в процессе профессиональной деятельности.
3. Разработка интегрированной базы данных персональных сведений о состоянии здоровья.
4. Сбор данных об индивидуальных дозах космонавтов и верификация собранной информации.
5. Сбор персональных сведений о состоянии здоровья космонавтов (и, по возможности, их потомства) и верификация собранной информации.
6. Предварительный анализ медико-статистических данных о заболеваемости и смертности включенных в регистр лиц.
7. Уточнение собранной информации и ввод дополнительных сведений в базу данных.
8. Выверка наиболее важной информации. Результаты выполнения выверки заносятся в соответствующие поля базы и фиксируются в соответствующих документах.
9. Разработка рекомендаций по объему и периодичности специализированного диспансерного наблюдения космонавтов в процессе после завершения профессиональной деятельности и определение организационной процедуры выполнения этого вида деятельности.
10. Проведение пилотных исследований по выявлению зависимости доза-эффект различными методами и оценок индивидуального радиационного риска космонавтов.

Таким образом, формирование РГР позволит значительно облегчить проведение специальных и научных программ изучения медико-биологических последствий космических полетов и, что крайне важно, осуществлять прямые измерения факторов радиационного и суммарного медицинского риска и провести расчетные оценки этих величин. Кроме того, компьютерная система анализа информации регистра позволит получать достоверные данные о динамике состояния здоровья зарегистрированного контингента в плане исследования корреляций с имевшим место профессиональным радиационным воздействием. Далее, наличие полной упорядоченной в регистре картины воздействий факторов полета (не только радиационной природы) и их последствий позволит провести анализ зависимости регистрируемых заболеваний от выраженности факторов риска и оптимизировать лечебно-диагностические мероприятия, которые должны выполняться после полета, а в случае длительных миссий (например, при межпланетных полетах) могут войти в перечень необходимых мер по медико-биологическому обеспечению экспедиции. При этом аналитические данные РГР будут являться предметом всестороннего научного анализа в целях обеспечения развития многофункциональной высокоэффективной схемы мониторинга, являющейся надежной информационной основой для создания высокоэффективной системы мероприятий по оценке конкретных групп заболеваний на основе ранжированного определения степени воздействия природных и техногенных факторов, специфичных для космического полета.

Одним из основных приоритетов в реализации данного проекта должна стать адресность медицинской помощи на основе объективных и научно-обоснованных критериев формирования групп повышенного (потенциального) радиационного риска. При этом основу высокой эффективности проекта составляет перенесение акцента специализированных лечебно-диагностических мероприятий на лиц, входящих в группы повышенного (потенциального) риска. Определение этих лиц будет проводиться на базе объективных и научно-обоснованных критериев с использованием коэффициентов радиационного риска для различных типов заболеваний не только рекомендованных авторитетными международными организациями по радиационной защите (МКРЗ, НКДАР ООН), но и полученных путем прямых радиационно-эпидемиологических исследований по контингенту регистра космонавтов.

Основные этапы работы

В связи с высоким статусом РГР, организация его создания должна быть осуществлена под соответствующим руководством головного ведомства – ФМБА. При этом работа должна включать следующие основные этапы:

- определение и оформление статуса РГР на основании Приказа по ФМБА, согласованного с основными ведомствами, участвующими в данной деятельности;
- разработку и обоснование исходных данных и требований к РГР, включая научно-методические и организационно-технические вопросы;
- разработку структуры, математической оболочки, программно-математического комплекса, организационно-медицинского и научно-методического обеспечения (руководств по формированию пакетов медико-биологической и радиационно-дозиметрической информации, предназначенной для занесения в базу данных);

– разработку программы анализа данных РГР в целях повышения надежности обеспечения радиационной безопасности космических полетов и формирования программ фундаментальных и прикладных исследований по проблеме.

Выполнение этих этапов целесообразно организовать в параллель так, чтобы к моменту определения официального статуса РГР были проработаны разделы перечисленных выше этапов, позволяющие определить последовательность и сроки выполнения всех шагов, связанных с созданием, заполнением, анализом данных РГР и использованием их для совершенствования проблемы радиационной безопасности космических полетов и снижения уровней риска членов когорты космонавтов в течение их жизни.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время имеются возможности для реализации предлагаемого проекта. В рамках работ по обеспечению радиационной безопасности работников атомной промышленности, проводимых под руководством ФМБА, сформированы и ведутся радиационно-медицинские регистры по ряду отраслей, связанных с использованием ядерных материалов и источников ионизирующих излучений; создан и функционирует Российский государственный медико-дозиметрический регистр для анализа и контроля последствий Чернобыльской катастрофы; функционирует служба радиационной безопасности пилотируемых космических полетов; имеется достаточно развитая научная база анализа радиобиологических последствий облучения биообъектов излучениями с высокой плотностью ионизации и т.д. Однако для создания РГР и повышения надежности обеспечения радиационной безопасности человека в будущих межпланетных полетах необходимо объединение этих возможностей в рамках единой программы, стержнем которой может стать проект создания РГР.

Заключение

Подводя итог по изложенным предложениям о создании Радиационно-гигиенического регистра космонавтов России, следует подчеркнуть, что этот свод данных о характере облучения человека в космосе и медико-биологических последствиях воздействия этого неблагоприятного фактора космического полета позволит сохранить для научных и практических целей уникальную информацию, которая является основой для подтверждения правильности научных выводов и заключений, получаемых в наземных модельных экспериментах и в теоретических исследованиях. Кроме того, РГР обеспечивает возможность углубленного анализа детализированных сведений о суперпозиции эффектов воздействия радиационного и других негативных факторов профессиональной природы; контроль полноты и сроков диспансерного наблюдения; проведение специальных и научных программ изучения медико-биологических последствий космических полетов, соответствующих им частных (дифференциальных) факторов риска и суммарного медицинского риска. Компьютерная система анализа информации баз данных Регистра позволит получать достоверные данные о динамике состояния здоровья зарегистрированного контингента в плане исследования корреляций с имевшим место профессиональным радиационным воздействием. Кроме того, наличие полной упорядоченной в Регистре картины воздействий факторов полета (не только радиационной природы) и их последствий позволяет проводить анализ зависимости регистрируемых заболеваний от выраженности факторов риска и оптимизировать лечебно-диагностические мероприятия. При этом данные Регистра могут служить предметом всестороннего научного анализа в целях обеспече-

ния развития многофункциональной высокоэффективной схемы мониторинга, являющейся надежной информационной основой для создания системы мероприятий по оценке конкретных групп заболеваний на основе ранжированного определения степени воздействия природных и техногенных факторов. Фактологические и аналитические результаты анализа данных регистра могут быть использованы в международном научно-техническом сотрудничестве.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бирюков А.П. Национальный радиационный эпидемиологический регистр граждан России, подвергшихся воздействию радиации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС: опыт, состояние, перспективы // Актуальные вопросы медицинской и социальной реабилитации граждан, подвергшихся воздействию радиации: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 21–22 февраля 2008. – С. 24–27.
- [2] Бирюков А.П., Кочергина Е.В., Круглова З.Г. и др. Контроль качества медицинской информации для радиационно-эпидемиологического анализа // Медицинская радиология и медицинская безопасность. – 2008. – Т. 53. – № 3. – С. 34–41.
- [3] Иванов В.К., Цыб А.Ф., Иванов С.И. Ликвидаторы Чернобыльской катастрофы: радиационно-эпидемиологический анализ медицинских последствий. – М.: Галанис, 1999. – 312 с.
- [4] Ron E., Preston D.L., Mabuchi K. et al. Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors. Part IV: Comparison of Cancer Incidence and Mortality // Radiation research, 1994, V. 137, pp. S98 – S112.
- [5] Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, UN, New York, 2000, 566 p.
- [6] Wong F.L., Yamada M., Sasaki H., Kodama K., Akiba S., Shimoaka K. and Hosoda Y. Noncancer Disease Incidence in the Atomic Bomb Survivors: 1958–1986 // Radiation Research, 1993, V.135, pp. 418–430.

ПИЛОТИРУЕМЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ – ВЫБОР ПУТИ

В.В. Борисов

Канд. техн. наук, действительный член российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, лауреат Государственной премии и премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный машиностроитель РФ В.В. Борисов

В статье проводится анализ особенностей планирования и реализации пилотируемых программ освоения космического пространства, их роли и места в космической деятельности человечества. Делается вывод о необходимости разработки таких программ на более длительный период, включающий реализацию нескольких последовательных проектов. Ядром такой программы должна стать подпрограмма упреждающей разработки технологий перемещения в космическом пространстве с использованием электрических реактивных двигателей и ядерных источников энергии.

Ключевые слова: космическая деятельность, пилотируемые космические программы, электрические реактивные двигатели (ЭРД), ядерные реактивные двигатели (ЯРД), жидкостные реактивные двигатели (ЖРД), солнечная электрореактивная двигательная установка (СЭРДУ), ядерная электрореактивная двигательная установка (ЯЭРДУ).

Manned Space Programs – Finding a Way. V.V. Borisov

The paper analyzes the peculiarities of planning and implementation of manned space programs, and their role and place for human activity in space. It is concluded that the development of such programs for a longer period, which includes implementation of several successive projects, is required. The nucleus of such program should become a subprogram of forward development of technologies for movement in space, using electric jet-propulsion engines and nuclear power sources.

Key words: space activities, manned space programs, electric jet-propulsion engines, nuclear jets, liquid propellant jet engines, solar electrojet propulsion assembly, nuclear electrojet propulsion assembly.

1. Роль и место пилотируемых программ в космической деятельности

Рассматривая результаты более чем пятидесятилетней истории космической деятельности человечества, необходимо признать, что ее развитие не всегда подчинялось последовательному и рациональному планированию. Романтика космических полетов, политические амбиции лидеров государств, творческие устремления и позиции руководителей нарождающейся новой космической отрасли во многом определяли выбор целей и проектов осуществления космической деятельности на ранних этапах ее развития. Это позволило в относительно короткое время решить множество научных и практических задач по созданию ракетно-космической техники и реализовать большое количество проектов и программ. Космонавтика в то время выполняла роль «локомотива» в создании новых технологий, в том числе и для таких отраслей промышленности и науки, как связь, электроника, материаловедение, станкостроение, химия полимеров. Сегодня космическая деятельность стала обыденной, утратила свойственный ей ранее ореол романтичности. Соответственно изменились и мотивационные акценты при планировании космической деятельности, выборе проектов и выделении средств на их финансирование. Доминирующим стал рационально-практический подход, при котором космическая деятельность рассматривается лишь как одна из многих за-

бот государства. Роль «локомотива» в создании новых технологий стали играть иные направления деятельности человека: наноиндустрия, информационные технологии, медицина и другие. Сегодня трудно представить ситуацию, когда на крупный космический проект (типа Н-1, Буран, Аполлон или МКС) могут быть выделены средства без скрупулезного обоснования их целесообразности или в ущерб развития других социально-экономических отраслей. В то же время, структура самой космической деятельности стала многоцелевой и разносторонней, поэтому мотивация и закономерности планирования ее отдельных частей нуждаются в анализе и сопоставлении.

Анализ космической деятельности (КД) и космических программ различных стран (включая Россию) позволяет выделить в их составе три крупных структурных блока.

Прежде всего, это совокупность проектов и программ в области практической космонавтики, реализация которых направлена на достижение эффекта от использования результатов КД в социально-экономической сфере. Создание и эксплуатация космической техники обеспечения связи, телевидения, дистанционного зондирования Земли и навигации предусматривают получение экономического эффекта от предоставляемых ими информации и услуг для различных субъектов бизнеса. Соответственно, при рыночно ориентированной экономике, эта сфера космической деятельности должна иметь объективные стимулы и финансовые источники своего развития, независимые от государственных бюджетных программ (за исключением программ обеспечения безопасности и обороны страны). При этом инвестиционная привлекательность отдельных проектов, в рамках вышеперечисленных направлений, определяется востребованностью и конкурентоспособностью тех услуг, которые могут представлять эти проекты для потребителя. Следовательно, планирование КД в этой сфере неизбежно должно руководствоваться законами рыночной конкуренции, расширять коммерческое финансирование разработки и использования создаваемой инфраструктуры. Именно таким образом в последнее время развивается рынок телекоммуникационных услуг в части спутниковой и сотовой телефонизации. Исключение составляют задачи обороны и обеспечения безопасности страны, которые по-прежнему должны реализовываться при государственном, бюджетном финансировании.

Другим направлением КД являются космические исследования, направленные на получение фундаментальных знаний о строении космического пространства, истории и физических основах его развития. Значимость результатов этих исследований для развития мировой науки трудно переоценить. За последние десятилетия существенно возрос темп накопления новых знаний и открытий, связанных с использованием и осмыслением результатов исследований, полученных космическими аппаратами в областях космической астрономии и астрофизики, планетологии, солнечно-земных связей и их влияния на климатические процессы на Земле. Значительно вырос объем информации об объектах и планетах Солнечной системы, в частности, о возможности наличия там условий возникновения или существования жизни. Все это является сильнейшим стимулом для ученых большинства стран стремиться к участию в этих исследованиях. Вместе с тем, результаты исследований и знания, полученные с помощью космических средств в области фундаментальной науки, являются общечеловеческим достоянием и становятся известными для большинства ученых из разных стран практически в темпе их получения. В таких условиях дублирование или повторение космических научных проектов становится малоэффективным и нецелесообразным. Учитывая

это, важнейшим условием для повышения эффективности фундаментальных космических исследований являются координация и сотрудничество космических агентств разных стран при планировании этих программ. Кроме того, научные космические проекты разрабатываются и финансируются, как правило, за счет государственного бюджета. Эти условия кардинальным образом определяют различия в методах планирования и реализации проектов практической космонавтики и фундаментальных космических исследований.

Программы пилотируемых космических полетов являются наиболее амбициозной частью космической деятельности. По своей сути они являются программами **освоения космического пространства** (КП) человеком и представляют собой практическую реализацию парадигмы космической экспансии человечества, то есть расширение сферы обитания и жизнедеятельности за пределы Земли. Именно это делает пилотируемые полеты человека в космос неизбежными, а их развитие и реализация в историческом плане не нуждаются в целевом обосновании. Кроме того, по своей сути и целевой направленности эти программы являются интернациональными. Действительно, для человечества как биологического вида в целом, не важно, какая нация или государство планирует и реализует эти программы. Если отбросить в сторону политические и амбициозные мотивы, то реализация этих программ не приносит в краткосрочной перспективе заметных социально-экономических дивидендов. Как правило, их влияние на экономику и производство опосредовано и осуществляется путем приспособления созданных материалов и технологий для нужд социально-экономической сферы.

В целом, освоение космического пространства – это совокупность процессов накопления знаний о космическом пространстве, определения целей и задач этапа освоения КП, разработки инфраструктуры и реализации технологий, позволяющих обеспечить возможность жизнедеятельности и продвижения человека в космическом пространстве. Критериями освоения (завершенности этапа освоения КП) является факт создания и практического использования технологий и космической инфраструктуры, обеспечивающих возможность длительной (в пределах, без ограничений времени) жизнедеятельности человека в условиях реализуемого этапа освоения КП. Именно жизнедеятельности, то есть практически целесообразной деятельности человека, а не просто выживания в новых условиях. Необходимо подчеркнуть, что основной, доминирующей целью пилотируемых космических программ на ранних этапах освоения космического пространства являлась задача исследования и обеспечения жизнедеятельности человека в космических условиях. Этой цели было посвящено более 65% целевого времени экипажа всех околоземных орбитальных станций от «Салютов» до МКС.

С точки зрения идеологии «освоения космического пространства», сам процесс освоения непрерывен и представляет собой последовательную реализацию проектов и программ создания элементов космической и наземной инфраструктуры, дополняющих ранее созданные для предыдущего этапа. Именно непрерывность пилотируемых космических программ соответствует смыслу и логике целевой задачи «освоения космического пространства человеком». Рассматривая их как средство реализации парадигмы экспансии человека в космос, мы должны признать, что стратегической целью этих программ должно являться последовательное создание технологий и средств обеспечения жизнедеятельности человека в космосе. В этом плане необходимо заметить, что программа «Аполлон», реализованная США в 60-е годы прошлого столетия, не может рассматриваться как начало реализации этапа освоения Луны. Она носила исследовательский характер

и, прежде всего, преследовала политические и амбициозные цели. Созданная в то время космическая инфраструктура не предназначалась для реализации длительной и программно-обоснованной деятельности человека на Луне. Для реализации пилотируемых программ освоения космического пространства необходим высокий научно-технический потенциал и ранее накопленный опыт осуществления космической деятельности. Кроме того, затраты на реализацию этих программ настолько велики, что участие в них могут позволить себе лишь высокоразвитые в экономическом отношении страны. За последнее десятилетие количество стран, заявляющих о своих амбициях в реализации собственных планов пилотируемых программ освоения космического пространства, значительно возросло. Фактически, сегодня речь идет об учете возможностей международной кооперации при планировании и реализации таких программ.

Таким образом, мы видим, что в настоящее время практическая космонавтика, фундаментальные космические исследования и пилотируемые программы освоения космического пространства имеют различные мотивационные стимулы и условия их реализации. Доминирующими принципами и исходными предпосылками при планировании космической деятельности в целом в настоящее время являются:

- в области практической космонавтики – **конкурентоспособность и востребованность** предоставляемых услуг;
- в области фундаментальных космических исследований – **кооперация и координация** программ исследований с мировым научным сообществом;
- **технологическая готовность** к реализации проекта и международная **кооперация** в части дальнейшего освоения космического пространства человеком, если это связано с масштабными и дорогостоящими проектами.

Это позволяет сделать вывод о **возможной целесообразности планирования и разработки трех различных подпрограмм в рамках Федеральной космической программы**, каждая из которых имела бы свои приоритеты, условия финансирования и реализации. Например, при конкурсном отборе проектов и исполнителей в рамках подпрограммы практической космонавтики целесообразно рассматривать и анализировать не только технико-экономические показатели создаваемых средств, но и конкурентоспособность, уровень качества и рентабельность услуг, предоставляемых ими потребителю, а также наличие потребителя и его готовность использовать эти услуги. Важно привлечь предприятия промышленности к участию в развитии рынка космических услуг путем прямых адресных внебюджетных инвестиций в создание инфраструктуры рынка. Фактически, каждый проект этой подпрограммы должен представляться в конкурсную комиссию как бизнес-проект и в последующем проходить все необходимые фазы рассмотрения, защиты, экспертизы и контроля. Проекты подпрограммы фундаментальных космических исследований предполагают большую открытость и интеграцию с планами международного научного сообщества, при их разработке имеет смысл стремиться расширять международную кооперацию участников проекта, с возможной консолидацией вкладов (бюджетов) различных участников (Академия Наук, Роскосмос, организации стран-участников проекта). Планирование, разработка, финансирование и реализация таких проектов может серьезно отличаться от типовых, действующих в России схем управления госконтрактами, даже если ведущую роль в проекте будет играть российская организация.

Каковы же особенности планирования и реализации пилотируемых проектов и программ? С точки зрения процесса освоения космического пространства и не-

зависимо от рассматриваемого этапа (освоение околоземных орбит, полеты на Марс, освоение Луны и окололунных орбит или что-то другое) для каждого этапа освоения космического пространства необходимостью является решение следующих пяти типовых задач:

- определение целей, условий и ограничений по реализации рассматриваемого этапа освоения КП (**исследовательская задача**);
- разработка и создание технологий и средств транспортировки и перемещений объектов космической инфраструктуры, предназначенных для решения задач рассматриваемого этапа освоения КП (**транспортная задача**);
- разработка и создание технологий и средств обеспечения необходимой энергией объектов космической инфраструктуры, предназначенных для решения задач рассматриваемого этапа освоения КП (**задача энергетики**);
- разработка и создание информационных технологий и средств обеспечения связи, навигации и управления для объектов космической инфраструктуры, предназначенных для решения задач рассматриваемого этапа освоения КП (**информационная задача**);
- разработка и создание технологий и средств обеспечения жизнедеятельности человека в условиях рассматриваемого этапа освоения КП (**задача жизнедеятельности**).

Если с этих позиций рассматривать современное состояние пилотируемых космических программ, то можно отметить, что первый этап экспансии человечества в космос, а именно, освоение околоземного пространства на низких орбитах искусственных спутников Земли (ОИСЗ), практически реализован.

Действительно, за прошедший период времени выполнен большой объем работ:

- получен достаточный объем знаний об околоземном космическом пространстве, условиях функционирования в нем КА, исследованы возможности жизнедеятельности экипажа пилотируемых КА, т.е. решена исследовательская задача;
- разработаны технологии и средства, обеспечивающие выведение на ОИСЗ и возврат на Землю элементов космической инфраструктуры и экипажа, т.е. решена транспортная задача;
- создана необходимая инфраструктура связи, навигации и управления КА на ОИСЗ, следовательно, решена информационная задача;
- разработаны технологии и средства, обеспечивающие необходимые энергетические потребности для функционирования КА на ОИСЗ, т.е. решена задача энергетики;
- разработаны технологии и средства, обеспечивающие длительное пребывание человека в космическом околоземном пространстве и условия его практической жизнедеятельности, решена задача обеспечения жизнедеятельности.

С учетом этого, естественной целью планирования и продолжения пилотируемой космической деятельности в пределах околоземного пространства на низких ОИСЗ в настоящее время является дальнейшая **модернизация** космической и наземной инфраструктуры пилотируемых комплексов для решения следующих задач:

- расширение областей использования возможностей орбитального полета с участием человека, номенклатуры и качества решаемых задач в интересах фундаментальной и прикладной науки, отраслей экономики, социальной сферы, обра-

зования, обеспечения безопасности страны, экологии, развития международного сотрудничества и коммерциализации космической деятельности;

- повышение технической и экономической эффективности эксплуатации космической и наземной инфраструктуры, участвующей в реализации задач этапа освоения (использования) ОИСЗ.

Отличительной особенностью фазы модернизации пилотируемой инфраструктуры этапа освоения ОИСЗ является также стремление к реализации технологий многоразового использования создаваемых средств и, следовательно, к увеличению сроков их эксплуатации и возможности использования их в различных проектах и задачах. С целью снижения бюджетных затрат на создание новых космических средств также целесообразно стимулировать постепенное расширение участия коммерческого капитала в их создании и эксплуатации. По мере начала реализации следующих этапов освоения КП (ОИСЛ и Луна или Марс) задачи этапа пилотируемого освоения ОИСЗ могут быть расширены в интересах осуществления последующих этапов, а инфраструктура модернизирована или дополнена под их задачи.

Таким образом, продолжение этапа освоения ОИСЗ в настоящий и последующий периоды времени (2012–2025 гг.) будет находиться в фазе **модернизации** инфраструктуры с **целью расширения номенклатуры** решаемых на этом этапе задач (услуг, предоставляемых различным потребителям) и **снижения затрат** на их реализацию. Для этого в рамках ФКП ранее были запланированы создание пилотируемого корабля нового поколения (ПКНП), новой РН, сертифицированной под пилотируемые пуски, космодрома «Восточный», пилотируемой орбитальной станции нового поколения, обслуживаемого на орбите технологического КА «ОКА-Т», исследования и разработка многоразовых РН, низкоорбитальной транспортной системы «Паром». По существу, перечисленные проекты призваны в основном обеспечить более эффективную и экономичную реализацию текущей космической деятельности России без обозначения перспективных, долгосрочных целей. То есть, предусматривается лишь совершенствование средств и инфраструктуры для уже реализованного этапа освоения космического пространства. Понятно, что такие «приземленные» практические цели ближайшего развития пилотируемой космонавтики, да еще и при достаточно высокой цене их реализации, в глазах общественности не обладают особой привлекательностью. Им не хватает научной значимости и экономической отдачи, а также амбициозности и масштабности в постановке новых задач освоения человеком космического пространства. Кстати, вероятно по этой причине, уже в конце 2011 года потребовалась коррекция программы и приоритетов финансирования ФКП в пользу практической космонавтики и фундаментальных космических исследований.

2. Особенности планирования пилотируемых программ освоения космического пространства

Так что же надо делать? Может показаться, что ключевым вопросом сегодня является выбор следующего этапа освоения человеком космического пространства и связанного с ним направления дальнейшего развития космической инфраструктуры пилотируемых программ. При этом естественным представляется выбор из двух альтернатив: заняться освоением Луны и окололунного пространства либо ориентироваться на осуществление пилотируемых полетов на Марс с целью его углубленного исследования. Именно по этим двум альтернативам сегодня прохо-

дит водораздел и идет спор в российском и международном научных сообществах. Однако существующая сегодня точка зрения, что выбор из этих альтернатив может быть однозначно определен в результате сравнительного анализа значимости научных задач и ожидаемых практических результатов этих двух программ, является иллюзией. В такой постановке строгих методов решения этой проблемы не существует. В любом случае выбор будет являться неким компромиссом между мнениями группы (или групп) экспертов. Более точным прогнозам и оценкам поддается сравнение технико-экономических характеристик конкретных проектов осуществления марсианской или лунной программ. Но и в этом случае сравнимый масштаб финансовых затрат и научно-технических проблем по реализации каждой из альтернатив не позволяет примирить сторонников каждого из этих двух направлений. Представляется, что в основе этого лежат опасения, что выбор одного из вариантов надолго, если не навсегда (в обозримом будущем!), поставит крест на реализации второй альтернативы. И эти опасения действительно имеют место при практической реализации дорогостоящих космических программ. Дело в том, что стремление сократить затраты на реализацию конкретной программы заставляет проектантов и конструкторов искать при создании технических средств «оптимальные» решения, зачастую ограничивающие их использование рамками только этой программы. Сегодня такой подход при планировании процесса освоения космического пространства человеком исчерпал себя. Более современным представляется планирование КД в рамках освоения космического пространства на большую длительность и глубину прогноза, чем сроки создания и реализации отдельно взятого проекта. При этом, поскольку длительность создания космической инфраструктуры и реализации отдельного проекта может превышать длительности периодов обновления базовых технологий, закладываемых на этапе его разработки, выбор и создание этих технологий становятся определяющим звеном такого планирования. **То есть планирование освоения космического пространства на длительную перспективу должно предусматривать как стратегическую цель отбор и разработку таких технологий и технических решений, которые являются наиболее эффективными при реализации совокупности проектов нескольких программ (или последовательных этапов) освоения космического пространства.**

Представляется полезным провести сравнительный анализ существующих и перспективных базовых технологий для возможного решения типовых задач следующего этапа освоения космического пространства.

В качестве такого этапа сегодня рассматриваются несколько возможных проектов: создание долговременных обитаемых баз-станций на поверхности Луны и/или на ОИСЛ; осуществление пилотируемых экспедиций на Марс; пилотируемые экспедиции и исследование астероидов Солнечной системы. Наибольшей готовностью и наличием потребных технологий обладает вариант освоения Луны и окололунного пространства. Для этого может быть использован весь набор технологий и технических решений, уже созданных и отработанных на этапе освоения околоземных орбит. Исследования Луны с помощью автоматических аппаратов и станций уже дали большой объем необходимой информации об условиях и проблемах пребывания человека на Луне. Транспортировка грузов и экипажа между Землей и Луной может быть решена с помощью ракет-носителей и разгонных блоков, использующих технологию ЖРД, причем рациональная потребная размерность этих средств не превышает размерность ракет-носителей и мощности ЖРД, ранее создаваемых в уже реализованных проектах. Необходимая для функ-

ционирования лунных пилотируемых баз электроэнергия может быть получена с помощью хорошо освоенной технологии преобразования солнечной энергии. Для организации управления и обмена информацией между ЦУПом и объектами лунных баз может быть использована существующая наземная инфраструктура и система спутников-ретрансляторов. Система обеспечения жизнедеятельности экипажа, с учетом относительной близости Луны и Земли, может быть построена на уже отработанных на околоземных долговременных орбитальных станциях принципах ремонтпригодности основных систем, частичной регенерации воды и кислорода, а также организации периодической доставки расходуемых материалов с помощью грузовых транспортных кораблей. По мере реализации проекта возможно использование для этих целей и лунных ресурсов. Пользуясь относительной близостью Луны, можно также организовать периодическую ротацию членов экипажа в оптимальные сроки с целью поддержания их высокой работоспособности и здоровья. Относительно новой проблемой является задача обеспечения радиационной защиты от протонного излучения во время мощных солнечных вспышек, поскольку Луна не обладает магнитным полем, аналогичным магнитному полю Земли и защищающим экипаж орбитальных станций на низких околоземных орбитах. Таким образом, в случае принятия решения об освоении Луны, осуществление этого проекта сегодня было бы возможно без необходимости разработки новых космических технологий, что существенно снижает суммарные риски его реализации. Так что же тогда мешает безоговорочно согласиться с таким решением? Безусловно, прежде всего, это высокая стоимость и далеко не очевидная в настоящее время практическая направленность пилотируемых исследований и освоения Луны. При этом существует риск, что стремление снизить затраты на реализацию проекта не будет способствовать созданию и развитию новых, перспективных технологий и технических средств дальнейшего освоения космического пространства.

Может показаться, что большей научной привлекательностью и амбициозностью обладают проекты осуществления пилотируемых полетов и освоения Марса. Возможность осуществления пилотируемой экспедиции на Марс достаточно серьезно и подробно рассматривалась в целом ряде исследований и проектов, начиная с шестидесятых годов прошлого столетия. (Достаточно полный обзор и анализ ранее опубликованных и открытых проектов приведен в сборнике под редакцией академика А.С. Коротева: Пилотируемая экспедиция на Марс, М., Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006 г.) В разработке различных аспектов осуществимости марсианской экспедиции принимали участие такие известные отечественные организации, как РКК «Энергия», ИЦ имени М.В. Келдыша, ЦНИИмаш, МВТУ им. Баумана, НИИ ПМЭ МАИ, ИМБП и другие. При этом, анализу подвергались варианты экспедиции как с использованием уже отработанных энергодвигательных космических технологий (двигательные установки на ЖРД, энергетические установки на основе фотоэлектрического преобразования солнечной энергии), так и перспективных (электрические плазменные и ионные двигатели, энергетические и двигательные установки на основе использования ядерной и солнечной энергии). При этих исследованиях, как правило, не ставилась задача реализации стратегии освоения Марса человеком а, как и в случае программы «Аполлон», рассматривалась приоритетная задача достижения человеком другой планеты Солнечной системы. Также в основном рассматривались однокорабельные варианты экспедиции, когда все необходимое оборудование и экипаж стартуют к Марсу с ОИСЗ в одном марсианском экспеди-

ционном комплексе (МЭК). Вместе с тем анализ результатов и выводов этих исследований позволяет оценить пригодность некоторых из рассмотренных технологий для реализации стратегии дальнейшего освоения космического пространства.

Определяющее влияние на возможность реализации пилотируемой экспедиции и характеристики МЭК оказывает выбор энергодвигательной установки. Именно она определяет стартовую массу МЭК на ОИСЗ и общую длительность экспедиции. В случае использования для МЭК уже освоенной технологии ЖРД, пилотируемая экспедиция на Марс с коротким пребыванием экипажа на его поверхности (~30 суток) практически не реализуема даже в лучшие синодические периоды противостояний Земли и Марса, которые повторяются с периодичностью около 18 лет (ближайший в 2017–2018 годах). Для ее осуществления требуется стартовая масса МЭК на ОИСЗ значительно выше 1000 тонн. Возможно снижение потребной стартовой массы МЭК до 600–700 тонн, однако при этом длительность пребывания экипажа на поверхности Марса и ожидания оптимальной даты отлета МЭК от Марса составит ~1–1,5 года, а суммарная длительность экспедиции превысит 900 суток. Правда, в этом случае возможно осуществление такой экспедиции и в худший синодический период (ближайший в 2026–2027 годах). Неизбежной особенностью экспедиций с использованием технологии ЖРД является возвращение экипажа на Землю с пролетных траекторий, без выхода МЭК на ОИСЗ и с его последующей утратой. При этом скорость входа возвращаемого аппарата с экипажем в атмосферу Земли может достигать 15 км/сек.

Несколько лучше обстоит дело при использовании технологии ядерных ракетных двигателей, которые обеспечивают в два раза более высокую скорость истечения продуктов сгорания, чем ЖРД. В случае создания и отработки этой технологии до уровня прогнозируемых характеристик, возможно осуществление короткой пилотируемой экспедиции на Марс в лучший синодический период при стартовой массе МЭК около 700 тонн и суммарной длительности экспедиции ~450 суток. В то же время, как и в случае с ЖРД, осуществление экспедиции в худший синодический период возможно лишь при длительном ожидании даты отлета МЭК от Марса (~1–1,5 года) при суммарной длительности экспедиции свыше 900 суток и стартовой массе МЭК около 420–450 тонн. К варианту использования технологии ЯРД также относится необходимость возвращения экипажа на Землю с пролетных траекторий МЭК при высокой скорости входа в атмосферу Земли.

Организация экспедиции на Марс с использованием технологии электрореактивных двигателей требует включения в состав МЭК мощной энергетической установки либо на основе фотоэлектрического преобразования солнечной энергии, либо ядерной энергетической установки. В результате это дает возможность значительно увеличить скорость истечения рабочего тела и снизить его суммарный массовый расход на экспедицию по сравнению с химическими двигателями (ЖРД). В целом, использование СЭРДУ позволяет реализовать марсианскую экспедицию при стартовой массе МЭК ~350–450 тонн и суммарной длительности около 1000 суток. Применение ЯЭРДУ требует создания МЭК стартовой массой ~500–600 тонн при суммарной длительности экспедиции 650–750 суток. При этом если не требовать выхода МЭК на ОИСЗ при возвращении от Марса, а использовать так же, как и в случае с ЖРД прямой вход возвращаемого аппарата с экипажем в атмосферу Земли с пролетной траектории, суммарная масса МЭК и длительность пилотируемого полета экипажа могут быть уменьшены на 5–10%. К снижению стартовой массы МЭК и уменьшению длительности экспедиции при-

водит и повышение электрической мощности ЯЭРДУ. Существенным также является то, что характеристики МЭК и суммарная длительность экспедиции при этой технологии мало зависят от синодического периода противостояний Марса и Земли, то есть имеется возможность осуществления экспедиции на Марс в любой период при практически одинаковых технических средствах МЭК.

Необходимо отметить, что вышеприведенные данные не учитывают все многообразие возможных вариантов пилотируемых полетов на Марс (многокорабельные экспедиции, комбинированные двигательные установки и т.д.), применение которых может существенно снизить требования к массе отдельного модуля марсианской экспедиции и к максимальной мощности ЯЭРДУ. Но даже их рассмотрение уже позволяет сделать сравнительные выводы о массовой и энергетической эффективности рассматриваемых технологий в случае экспедиционного полета человека на Марс. Однако при оценке этих технологий для стратегии освоения Марса человеком необходимо учитывать и другие показатели, определяющие степень их применимости для реализации регулярных и экономичных перелетов между Марсом и Землей. В таблице 1 приведен сравнительный анализ рассматриваемых технологий по некоторым таким показателям.

Таблица 1

| Сравнительный анализ транспортных технологий проблемы освоения Марса | | | | |
|--|---|--|---|--|
| Показатели | Рассматриваемые технологии | | | |
| | ЖРД | ЯРД | ЭРД | |
| | | | ЯЭРДУ | СЭРДУ |
| Чувствительность к датам старта | Очень высокая | Высокая | Низкая | Низкая |
| Многоразовое использование | Нет | Нет | Возможно | Возможно |
| Технические риски и проблемы | Криотопливо Длительность сборки на ОИСЗ Высокая скорость входа ВА в атмосферу Земли | Отработка ЯРД Безопасность Криотопливо Длительность сборки на ОИСЗ Высокая скорость входа ВА в атмосферу Земли | Высокий ресурс ЭРД Безопасность Рабочее тело ЭРД Длительность сборки на ОИСЗ | Высокий ресурс ЭРД Динамика конструкции Длительность сборки и развертывание КГК на ОИСЗ «Космический мусор» Рабочее тело ЭРД |

Собственно, преимущества применения технологии ЭРД при осуществлении межпланетных перелетов в пределах Солнечной системы ранее уже неоднократно отмечались в работах различных авторов. В частности, в работе авторов А.М. Потапова и Ц.В. Соловьева, опубликованной в 1974 году в третьем номере журнала «Космические исследования», на основе массовых проектно-баллистических расчетов траекторий перелетов между ОИСЗ и орбитами других планет Солнечной системы уже в то время были сделаны следующие выводы об эффективности применения ЯЭРДУ:

- «...при полетах к ближним планетам обеспечивается существенное увеличение полезного груза при сопоставимом времени перелета»;

- «... при полетах к дальним планетам (Юпитер и далее) ... существенно сокращается время перелета при сопоставимом полезном грузе»;
- «... при использовании идеально регулируемого (по скорости истечения рабочего тела) ЭРД масса полезного груза возрастает на ~10–25%».

Необходимо отметить, что эта оценка эффективности ЭРД справедлива и для организации транспортных грузовых операций в системе ОИСЗ–ОИСЛ.

Что же мешает активному использованию этой эффективной технологии межпланетных перелетов в реальной космической деятельности? Особенно, если учесть, что первые образцы ионных и плазменных ЭРД были созданы почти 50 лет назад. Да и сегодня многие научные организации занимаются разработками и исследованиями в этом направлении. Но пока наибольшее практическое применение ЭРД нашли только в системах ориентации и стабилизации КА, прежде всего геостационарных связных спутников. В таблице 2 приведены некоторые из реализованных к настоящему времени проектов разработки и использования ЭРД в качестве маршевых двигателей КА.

Таблица 2

| ПРОЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАРШЕВЫХ ЭРДУ | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|------------------|----------------|
| Проект | Год | Цель проекта | Разработчик | Тип ЭРД |
| STEX (НАСА) | 1998 | Тестовые испытания холловского ЭРД с анодным слоем | РОССИЯ (ЦНИИмаш) | ДАС TAL-WSF |
| DEEP SPACE 1 | 1998 | Полет к астероидам и комете | США | ИД – NSTAR |
| ARTEMIS | 2002 | Перелет с ОИСЗ на геостационарную орбиту (ГСО) | ЕВРОПА | ИД – RIT-10 |
| SMART - 1 | 2003 | Полет к Луне | КБ ФАКЕЛ-SNECMA | СПД PPS-1350 |
| DAWN | 2007 | Полет к астероидам Весте и Церере | США | ИД – NSTAR |
| HAYABUSA | 2003 (возврат на Землю в 2010) | Полет к астероиду ИТОКАВА | ЯПОНИЯ | ИД – μ -10 |

В каждом из этих случаев осуществлялся полет относительно небольшого КА массой несколько десятков или сотен килограммов и при использовании маломощных энергетических установок.

Исследованиями и разработкой ЭРД сегодня занимаются многие страны и организации. В научной литературе опубликованы и известны параметры свыше 100 образцов и действующих моделей ЭРД. Однако применение ЭРД в качестве маршевых двигательных установок для межорбитальных перелетов (особенно для КА большой массы) невозможно без создания энергетических установок большой мощности. Так для марсианской пилотируемой экспедиции необходима энергетическая установка мощностью 15–30 мегаватт. Для полетов автоматических КА стартовой массой на ОИСЗ вместе с энергетической установкой ~20 тонн и доставки к Юпитеру или к его спутнику Европе полезного груза массой 5–10 тонн

потребуется установка мощностью ~ 200 кВт. При этом, в случае уменьшения массы полезного груза, необходимая мощность энергетической установки значительно снижается. В любом случае, это значительно лучше, чем при использовании технологии ЖРД, которая в аналогичных условиях позволяет доставить к Юпитеру ~ 2 тонны полезного груза при относительно большем времени перелета.

Таким образом, для эффективного использования технологии ЭРД при межпланетных перелетах необходимо создание мощных энергетических установок: для автоматических КА – в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен кВт; для пилотируемых программ освоения Марса и/или Луны – в диапазоне от единиц до 2–3 десятков МВт. Исследования ИЦ им. М.В. Келдыша подтвердили целесообразность и возможность создания для этих целей ряда космических энергетических установок модульного построения на основе ядерного реактора с термоэмиссионным или турбомашинным способом преобразования тепла в электроэнергию. Второй проблемой создания ЯЭРДУ для межорбитальных перелетов является необходимость разработки ЭРД большой электрической мощности (десятки кВт и более) с длительным ресурсом работы (до 10 000 часов). В этом плане у каждого типа ЭРД имеются свои преимущества и недостатки. Ионные ЭРД давно используются за рубежом и практически не имеют ограничений по достижению требуемого ресурса, но с увеличением мощности существенно возрастают их габариты из-за низкой плотности тяги. Кроме того, несмотря на успехи в исследованиях этого типа ЭРД в ИЦ им. М.В. Келдыша, технология их создания в России пока не отработана. Маломощные стационарные плазменные двигатели (СПД) разработки КБ «Факел» малой мощности давно используются в России в системах ориентации геостационарных спутников и подтвердили свою надежность и требуемый ресурс, но для их маршевого использования необходимо подтвердить требуемую скорость истечения, а с увеличением их мощности имеются серьезные технологические и конструкционные проблемы. Двигатели с анодным слоем (ДАС) разработки ЦНИИмаш, одно- и двухступенчатые, по ряду своих параметров являются наиболее перспективными, однако на сегодняшний день не имеют подтверждения необходимого ресурса даже для малых мощностей. Все это говорит о необходимости дальнейших исследований и разработок по каждому из типов ЭРД. Вообще, наработка на ресурс ЭРД большой мощности любого типа является серьезной проблемой и требует создания дорогостоящей наземной экспериментальной базы. При существующей сегодня экспериментальной базе создать маршевый ЭРД мощностью около 100 кВт или выше, с проведением зачетных ресурсных испытаний в соответствии с требованиями действующей нормативной документации, на Земле невозможно. Для этого потребуется создание наземных вакуумных камер, уникальных по объему и скорости откачки продуктов сгорания. Выходом может стать возможность модульного построения ЭРДУ из отдельных относительно мощных ЭРД, отработку на ресурс которых можно было бы проводить не только в наземных условиях, но и по программам компенсации микрогравитационных возмущений, поддержания и коррекции орбиты пилотируемых орбитальных станций, в частности, МКС. Еще одной проблемой создания и использования технологии ЭРД при межпланетных перелетах является выбор рабочего тела. Наиболее подходящий для этих целей и используемый сегодня ксенон слишком дорог и имеет малый объем производства. В принципе, для использования в ЭРД подходит практически любой химический элемент, обладающий низким порогом ионизации и достаточно высокой массой, например: аргон, криптон, йод, литий, висмут и другие. Однако эффективность их применения, характери-

стики ЭРД и влияние выхлопа на конструкцию и аппаратуру КА нуждаются в исследовании.

Таким образом, на следующем этапе освоения космического пространства, а именно, при организации межпланетных перелетов, технология использования ЭРДУ должна стать аналогом технологии ЖРД, используемой при решении транспортных задач этапа освоения ОИСЗ и эффективной в условиях высокой гравитации. Принципиально то, что она на длительную перспективу может существенно расширить доступные границы космического пространства. При этом для решения энергетической задачи этого этапа необходимо развивать технологию ядерной космической энергетики. Фактическое начало этого процесса уже состоялось в 2010 году при принятии в рамках президентской инициативы инновационного проекта создания космического транспортно-энергетического модуля мегаваттного уровня на основе ядерной энергодвигательной установки. Практическая реализация и использование технологий ЯЭРДУ в перспективе позволит создать целый ряд технических средств межорбитальной доставки и возвращения на ОИСЗ полезной нагрузки различной размерности и назначения, с возможностью многократного использования некоторых из них. Это даст возможность нашей стране сохранить за собой право остаться конкурентоспособной в решении задачи обеспечения доступа к космическим телам Солнечной системы, аналогично тому, как это есть сегодня в системе средств выведения на ОИСЗ. Учитывая принцип неизбежности и непрерывности процесса освоения человеком космического пространства, нашей стране целесообразно также планировать разработку технологий для решения и других типовых задач (исследовательской, информационной и задачи жизнеобеспечения) освоения космического пространства, даже если конкретный проект и цель будущего космического полета окончательно еще и не выбраны.

К ФОРМИРОВАНИЮ МЕТОДОЛОГИИ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ ПРОГРАММ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Д.Б. Пайсон

Докт. экономических наук, канд. техн. наук Д.Б. Пайсон (Кластер «Космические технологии и телекоммуникации». Фонд «Сколково»)

Рассматривается эффект «инкапсуляции» в методологических исследованиях пилотируемой космонавтики, связанный с разделением хорошо формализуемых аспектов эффективности и вопросов принятия решений, обусловленных геополитическими и социальными соображениями. Представлены рубежно-целевой подход к определению основных направлений развития космической деятельности и модель «форума». Описана гипотеза динамической увязки косвенной эффективности пилотируемой космонавтики с состоянием национальной политико-экономической среды. Описаны методологические подходы, позволяющие выстроить процедуру, определить граничные условия и критериальную систему для выбора того или иного варианта реализации пилотируемой космической программы.

Ключевые слова: Космическая деятельность, пилотируемые космические полеты, эффективность, программно-целевое планирование, рубежно-целевой подход, форум.

To the Development of Methodology of Selection and Substantiation of Manned Spaceflight Programs. D.B. Piyson

The paper discusses the encapsulation effect of methodological studying manned cosmonautics associated with the separation of well-formalizable aspects of efficiency and issues of decision making stipulated by geopolitical and social considerations. The encapsulation effect is considered associated with the separation of well-defined aspects of efficiency and politically stipulated decision making as applied to the human spaceflight research. The "management-by-boundaries" approach to the determination of main directions of space activity development and the "forum" model are presented here. The paper describes the hypothesis of dynamical correlation between the indirect efficiency of manned cosmonautics and national political and economical environment. Methodological approaches allowing to design the procedure and to specify boundaries and criteria for selection of one or another variant of implementation of manned space program are described.

Key words: space activity, manned spaceflight, efficiency, program planning, management-by-boundaries approach, forum.

Весной- летом 2012 года заметно активизировалась дискуссия о стратегических направлениях развития отечественной космонавтики. Значимой вехой стала разработка проекта Стратегии развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу, его публикация на официальном сайте Роскосмоса и последующее публичное обсуждение и доработка [17]. В контексте ведущейся научно-методической дискуссии (см., например, материалы обсуждения Стратегии с участием руководства Роскосмоса и ряда ведущих аналитиков [18]), важным представляется еще раз обратиться к вопросам методологии анализа эффективности и отбора для реализации крупномасштабных проектов в области пилотируемой космонавтики.

Несмотря на значительный путь, пройденный мировой пилотируемой космонавтикой, и безусловный приоритет России по целому ряду ее направлений, в части системного осмысления пилотируемые космические полеты до сих пор ос-

таются существенно «экзотическим» видом деятельности, отчасти заимствуя, но полностью не усваивая системные подходы, вполне сложившиеся к настоящему времени, например, в сфере прикладной космической деятельности (обзор современного мирового опыта можно найти, например, в монографиях [19] и [20]), в области военно-научных исследований [2] фундаментальных научных исследований или деятельности человечества по изучению и освоению новых территорий. При этом проблема заключается не в институциональном осмыслении нормативных основ и целей пилотируемой космической деятельности. Можно указать и на ряд фундаментальных исследований последнего времени (например, [5] и [12]), и на существенные параллели с нормативной базой освоения Мирового океана, а также Антарктиды (подробный обзор актуальной нормативной правовой базы приведен, например, в работе [4]).

Основная проблема, на наш взгляд, заключается в том, что при достигнутом к настоящему времени общественном консенсусе по поводу важности и нужности пилотируемой космонавтики как таковой, до сих пор профессиональное сообщество не располагает общепринятым методологическим инструментарием сравнительной оценки конкретных пилотируемых проектов и программ. Пилотируемая космонавтика до сих пор не выработала «жесткое ядро» системной методологии [8], которое обеспечивало бы должный уровень научной строгости и преемственности при анализе и обсуждении вопросов ее разнообразно понимаемой эффективности – как при сравнении различных пилотируемых программ между собой, так и применительно к вопросам сравнительной значимости с беспилотными космическими программами и шире – с любыми крупномасштабными научно-техническими проектами, цели и смысл которых необходимо рассматривать далеко за рамками «простой» социально-экономической эффективности. Этот методологический дефицит является фундаментальным, и с ним, по всей видимости, придется жить еще долго. Поэтому задача системной методологии космической деятельности в данном случае сводится к выработке принципиальных подходов к оценке космических проектов в условиях «инкапсуляции», когда определенная составляющая системного эффекта выводится за рамки унифицированной методологии технико-экономического анализа для последующего принятия решений, обусловленных сравнительно нестрогими соображениями, основанными на геополитической, научной, социальной составляющих.

Оставляя существенную плохо формализуемую составляющую, «инкапсулированную» для последующего рассмотрения, зададимся вопросом: какая «собственно экономическая» методология применима к проблемам пилотируемого освоения космоса? Как ни странно, в данном случае системология космической деятельности возвращается от бизнес-подобных моделей, ориентированных на максимизацию прогнозных денежных потоков при реализации прикладных космических программ, к моделям «военного» типа, ориентированных на минимизацию затрат при заданных неэкономических показателях системы или проекта, или получение максимума полезного эффекта при заданных затратных показателях. Следует при этом подчеркнуть, что данная модель работает исключительно применительно к государственному или многонациональному оператору проекта, относительно которого и рассматривается эффективность и затраты. Предприятия и организации, участвующие в проекте в качестве подрядчиков, руководствуются традиционными бизнес-моделями, основанными на денежных потоках, хотя, возможно, и осложненными, помимо прочего, ожиданиями спин-офф-эффектов, связанных с последующим хозяйственным освоением технологий, приобретенных в ходе реализации пилотируемых космических программ ([9], [14]).

Описанная нами «инкапсуляция» обуславливает продолжающееся в современных системных исследованиях космической деятельности методологическое «размежевание», обусловленное принципиальной разницей целеполагания и анализа эффективности прикладных, научно-исследовательских и пилотируемых космических проектов и программ. В то время, как эффективность прикладной космической деятельности в целом успешно описывается на языке стратегического бизнес-планирования и планирования развития национальной инфраструктуры экономики и сферы безопасности, фундаментальная наука также имеет устойчивую методологическую базу. Применительно к пилотируемой космонавтике вопросы телеологического осмысления и анализа эффективности до сих пор остаются в значительной степени риторическими. Предыдущими исследованиями, в которых принимал участие автор и его коллеги по прежнему месту работы – ЦНИИ машиностроения (г. Королев) (см., в частности, ссылку на Системный проект в работе [Райкунов, 2010]), представители других научно-исследовательских центров российской космонавтики, к настоящему времени показано наличие «сухого остатка» – самостоятельной мотивации человечества к развитию пилотируемой космонавтики, выходящей за пределы узкоприкладных ее аспектов. Представляется целесообразным сегодня признать за телеологическую аксиому тот факт, что выход человечества в космос представляет собой естественный этап развития глобальной популяции, как выход за пределы пещеры или форсирование реки племенем первобытных людей диктовался подсознательным инстинктом расширения охотничьей территории или собирательных угодий.

Оговорив наличие уникального «сухого остатка» в обосновании эффективности пилотируемых космических программ, рассмотрим системные аспекты их прикладной эффективности. Несомненно, пилотируемые программы решают как научные, так и прикладные задачи, однако по подавляющему большинству таких задач применение автоматических космических средств является более экономически и системно оправданным, в том числе – с точки зрения допустимых уровней риска катастрофического исхода. Подобные соображения стали в свое время одной из основных причин отказа от использования МТКС «Спейс Шаттл» для выведения в космос космических аппаратов социально-экономического назначения после катастрофы «Челленджера» в 1986 году.

Существует, однако, ряд приложений, для которых, как представляется сейчас, пилотируемая космонавтика представляет на порядок более «естественные» и эффективные пути решения возникающих задач. Это, естественно, изучение физиологии человеческого организма в условиях космического полета (причем, не только в интересах развития собственно пилотируемой космонавтики, а и в контексте более широких медико-биологических исследований, для которых условия космического пространства представляют дополнительную контрольную или референсную среду), создание операционных баз на удаленных локациях, рассчитанных на деятельность по заранее непредсказуемым программам (ремонт, обслуживание, исследования).

Безусловным и абсолютным поводом к резкому повышению роли пилотируемой космонавтики станет появление убедительных свидетельств актуальной или проводившейся ранее деятельности внеземных цивилизаций в теоретически достигаемых пространственных пределах Солнечной системы, а возможно – и наличия следов жизни на одном из небесных тел системы. В этом случае космос из *mare nostrum* земной цивилизации станет сферой

потенциального столкновения и поиска балансов интересов нескольких цивилизаций, и хорошо бы не оказаться в положении благополучно «открытых» первыми европейскими экспедициями коренных обитателей обеих Америк.

Наряду с этим, многие другие обоснования целесообразности пилотируемых проектов носят общий характер и часто применимы не только к беспилотной космонавтике, но и к любым крупным инновационным проектам в сфере развития технологий, освоения новых территорий, получения нового фундаментального знания.

Не будем останавливаться на анализе полезных эффектов пилотируемой космонавтики, этому посвящены многие другие работы (см., например, [6]). В настоящей работе рассмотрим системные особенности принятия решений на реализацию крупномасштабных пилотируемых космических проектов в условиях современной России.

Задача выбора вариантов развития пилотируемой космонавтики не является уникальной для нашей страны. Существует, например, прецедент Комиссии Августина (см. ниже), в методологической его части неоднократно описанный Эдвардом Кроули (см., например, [15]). Следует отметить, что при уровне готовности промышленности к абсорбции новых технологий, характерном для современных Соединенных Штатов, и с учетом сравнительной характеристики национальных бюджетов двух стран, американский системный опыт в российском случае применим ограничено. Кроме того, состояние национальной экономики США определяет куда более высокий уровень достоверности при прогнозировании реализуемости тех или иных «дальних» планов с точки зрения динамики развития научно-производственного потенциала. Попросту говоря, представляется, что сегодня нет оснований сомневаться в том, что американская промышленность окажется в состоянии реализовать вполне амбициозные планы космической деятельности, подкрепляемые адекватным государственным финансированием. Применительно к отечественной промышленности такого состояния еще необходимо достичь. Таким образом, как общие особенности, так и национальную специфику планирования и реализации пилотируемых космических программ будем далее обсуждать в контексте современного состояния российской науки, промышленности и системы государственного целеполагания.

Особенности развития национальной культуры и науки определяют уникальное значение космической деятельности вообще и пилотируемой космонавтики в частности для России. По сути дела, достижения отечественной космонавтики – один из не слишком широкого ряда общепринятых элементов позитивной национальной самоидентификации. Более того, только в России освоение космического пространства стало неотъемлемой частью достаточно значимого философского течения – русского космизма.

Международный контекст развития отечественной пилотируемой космонавтики сегодня, вообще говоря, не однозначен. С одной стороны, слова о космонавтах как «посланцах человечества в космос» звучали с первых лет космической эры [1], а к настоящему моменту сложился практически глобальный консенсус по поводу исключительно международного характера будущих грандиозных программ пилотируемых полетов в космос за пределы околоземной орбиты. С другой стороны, интернационализация и «глобализация» перспективной космической деятельности в определенной степени снижает значимость «соревновательного» фактора мотивации пилотируемых космических программ,

призванных, помимо прочего, продемонстрировать уровень развития и конкурентоспособности конкретных государств или социально-экономических систем.

Остановимся на «соревновательном» факторе пилотируемой космонавтики подробнее. Страны с жестким планированием в экономике и соответствующим состоянием «настройки» на протяжении всего XX века находились, как правило, в состоянии конфронтации с окружающим миром (или значимой его частью); в XXI веке конфронтация оборонная в значительной степени замещена экономическим противостоянием, но суть от этого не меняется: для стран, отстаивающих статус самостоятельного геополитического игрока, пилотируемая космонавтика становится еще одним мерилом геополитической конкурентоспособности, подобным большому спорту (актуальный пример – развитие пилотируемой космонавтики в Китае). С другой стороны, для стран с «мягким» планированием, и соответственно – с более сложно устроенной рыночной экономикой, даже при отсутствии геополитической мотивации к реагированию на вызовы «соседей по планете», существенное значение приобретают эффект спин-оффа, то есть технологического трансфера результатов пилотируемых космических программ в национальную экономику, реализуемого частными фирмами-подрядчиками (см., например, [14]).

Хотя такие спин-оффы априорно не планируются, да и апостериорно могут быть оценены только посредством достаточно сложных эконометрических исследований, важно наличие самого механизма соотнесения ценности пилотируемых космических программ с уровнем развития национальной экономики: для стран, ориентированных на «жесткую» экономику в современном мире особенно актуален соревновательный аспект, для стран с более развитыми рыночно-либеральными началами в экономике и обществе – косвенный вклад космических программ в национальную экономику, науку и образование. Таким образом, по мере развития национальной экономики происходит переосмысление косвенной, инкапсулированной эффективности космической деятельности неприкладного характера. **Изучение подобной динамики, на наш взгляд, представляет собой потенциально весьма плодотворное направление системных исследований социально-экономического контекста пилотируемой космонавтики.** Отметим также опасность «промежуточного провала», когда, с одной стороны, соревнование со всем миром уже не считается национальным приоритетом, а с другой стороны – национальная экономика еще недостаточно созрела для полномасштабного восприятия спин-офф-эффектов неприкладной космонавтики. На наш взгляд, именно такое промежуточное состояние обуславливает современные проблемы с целеполаганием в области космической деятельности в современной России.

Таким образом, принимая за аксиому тот факт, что в любом пилотируемом космическом проекте присутствует некоторая целевая составляющая, не формализуемая с применением современных методологических подходов, рассмотрим основные направления и методические аспекты «инкапсуляции» уникальных полезных эффектов пилотируемой космонавтики.

Невозможность формирования корректной «объективной» модели эффективности пилотируемых космических программ обуславливает необходимость поддержки принятия соответствующих решений посредством широкого обсуждения и достижения общественного консенсуса. Здесь перспективным представляется дальнейшее исследование «проблемы форума» ([2], [13]), то есть **разработка методологии выбора легитимного формата**

общественной дискуссии и согласования мнений экспертов, представляющих все значимые социальные слои и группы, о принятии того или иного стратегического решения, лежащего вне пределов «чистой экономики» или национальной безопасности. Так, например [2], информированное общество, по всей видимости, согласится с тем, что расширенный Совет главных конструкторов ракетно-космического предприятия является репрезентативным форумом для обсуждения и выбора конструктивно-компоновочной схемы того или иного пилотируемого космического аппарата, однако не подтвердит его репрезентативность в качестве форума для выбора основных направлений реализации национальной космической программы в целом. С другой стороны, широкое общественное обсуждение проекта того или иного документа на страницах правительственной или околоправительственной газеты может, вероятно, рассматриваться в качестве репрезентативного форума для определения окончательного вида документа под условным названием «Национальная космическая политика», и не может – для уточнения тактико-технических требований к обитаемой лунной станции.

Примером реализации «форумного подхода» может служить деятельность «комиссии Августина» [21] – Независимой комиссии по анализу планов США в области пилотируемой космонавтики. В состав комиссии, учрежденной 7 мая 2009 года под председательством видного деятеля американского аэрокосмического истеблишмента, бывшего генерального директора компании «Локхид Мартин» Нормана Августина, вошли 11 человек, среди которых – два бывших астронавта НАСА, руководители аэрокосмических фирм, профессора университетов и отставные генералы, представляющие репрезентативный срез современного американского корпуса экспертов в области космической политики.

Осенью 2009 года комиссия опубликовала свой итоговый доклад. В конечном итоге выводы, сделанные комиссией Августина, привели в начале 2010 года к смене руководства НАСА, полному отказу от плана возвращения на Луну Constellation и решению о полном переводе всего транспортного сообщения с американским сегментом «продляемой» МКС – как в грузовом, так и в пилотируемом варианте – на использование коммерческих услуг по доставке, предоставляемых американскими частными компаниями. Наконец, основные бюджетные ресурсы было решено перенаправить на создание новых, продвинутых ракетно-космических технологий, которые через несколько десятилетий позволили бы не повторить на чуть более высоком уровне лунную программу 60-х годов, а отправить пилотируемую экспедицию к Марсу.

«Смена вех» такого масштаба вряд ли оказалась бы возможной при использовании обычных «экспертных» подходов к прогнозированию будущего состояния и актуальных направлений развития космической деятельности. Не последнюю роль в данном случае сыграл именно «форумный» характер работы комиссии, во-первых, действительно максимально репрезентативной, а во-вторых, строившей свою работу на основе максимально гласного обсуждения и привлечения широких слоев специалистов, экспертов и сторонников альтернативных путей развития американской космонавтики.

«Форумный» подход к принятию решения на планирование и реализацию пилотируемых космических программ делает акцент на плохо формализуемой социально-политической и общественной ценности их результатов, а соответственно – на обобщенном субъективном подходе к принятию решения. Учитывая невозможность полной остановки программно-целевого планирования

до выработки политически мотивированных консенсусных решений, в свое время нами был предложен и совместно с коллегами по ЦНИИмашу исследован в ходе системного проектирования по перспективным вопросам космонавтики еще один вариант преодоления «методологической недостаточности» пилотируемой космонавтики – **рубежно-целевой подход, направленный на максимально возможный отказ от принятия субъективных решений на ранних стадиях разработки программ** [20].

Остановимся на основных особенностях рубежно-целевого подхода. Его появление обусловлено необходимостью опережающего планирования развития функциональных космических технологий и инфраструктуры для обеспечения последующих крупномасштабных программ освоения космоса, в особенности – основанных на пилотируемых экспедициях. В настоящий момент экспертное сообщество, формирующее национальные документы программно-целевого планирования, не располагает достаточной информацией для точного, основанного на технических и финансовых параметрах, планирования хода освоения космоса, включая, например, даты лунных и марсианских экспедиций. Более того, существуют разные мнения о целесообразности последовательности таких миссий (например, должно ли полномасштабное освоение Луны предшествовать началу экспедиций к Марсу?). С другой стороны, вопросы создания технологий, необходимых для таких экспедиций, системы средств выведения, обеспечивающей инфраструктуры, должны решаться заранее, причем в случае российской системы планирования и управления космической деятельностью – в рамках Федеральной космической программы, планируемой в течение 2–3 лет на десятилетний период. Разработчики таких программ должны иметь представление о целях стратегической перспективы с тем, чтобы планировать соответствующую техническую и инфраструктурную поддержку при отсутствии четкого политического и программного понимания того, какими конкретно станут в результате Большие космические проекты¹ на эту перспективу.

Таким образом, методология стратегического планирования должна, с одной стороны, максимально исключать неопределенность при планировании программ технологического развития в области космонавтики, а с другой – не допустить чрезмерного давления технологических возможностей на планирование программ освоения космоса, которые, с точки зрения целеполагания, являются в существенной степени социально значимым и научным предприятием.

Основные предпосылки формирования рубежно-целевого подхода таковы:

1. Цель экспансии человека во Вселенной «по определению» не имеет границ. Таким образом, критерий «достижения цели» неприменим для программ освоения космоса в целом.

2. В настоящее время для планирования программы освоения космоса с точностью до миссий не хватает исходных данных об их сравнительной ценности, масштабности, внешних условиях реализации, включая долгосрочное состояние государственного бюджета.

3. Доступность инфраструктуры освоения космоса (включая ресурсы промышленности, систему средств выведения, космические технологии, опорные

¹ Представляющийся нам удачным термин «БКП» вводится и обосновывается в данном контексте, например, И.М. Моисеевым в работе [Моисеев, 2008] и далее обосновывается в работе [Моисеев, 2009]

группировки на околоземной орбите и пр.) является необходимым условием планирования программ освоения и определяет возможность их реализации.

Ключевая составляющая предлагаемого метода – определение последовательности развития инфраструктуры освоения космоса применительно к группам («кластерам») возможных миссий, реализуемых с помощью общей инфраструктуры (с точностью до кластеризации). На следующем этапе определяется несколько вариантов программ освоения, опираясь на дополнительные ограничения нетехнического характера.

С учетом кратко описанных телеологических и методических подходов, попробуем тезисно определить основные граничные условия, определяющие выбор Большого космического проекта для России.

1. Большой космический проект должен приниматься в результате гласного обсуждения профессиональным сообществом на основании консенсуса национальных элит.

2. Большой космический проект должен сохранять преемственность с ранее реализованными национальными и международными космическими программами, включая программу «Мир» и МКС.

3. Технические средства и системные решения, разрабатываемые в интересах Большого проекта, должны быть технологически сопряжены с перспективными направлениями развития космической деятельности в целом, демонстрируя потенциал межпрограммного, международного и межотраслевого переноса технологий.

4. При планировании и реализации Большого проекта должно разумно сочетаться международное партнерство с собственными интересами как российского государства, так и российской многоукладной экономики, причем не только космической и смежных ее отраслей.

В заключение приведем, пожалуй, наиболее неоднозначное условие, которое, однако, является одним из ключевых элементов авторской позиции.

5. Большой космический проект для России должен основываться на достоверных анализе состояния и прогнозе потенциала развития реализующей среды космической деятельности, прежде всего, ракетно-космической промышленности.

Последний тезис предполагает, помимо прочего, сугубую неадекватность любых попыток определения конкретных направлений дальнейшего стратегического продвижения в освоении космического пространства при современном состоянии отечественной ракетно-космической промышленности, выходящих за рамки поисковых НИР головных научно-исследовательских институтов и инициативных работ промышленности. Применительно к актуальным реалиям автор полагал бы, что лишь успешное выполнение задач Федеральной космической программы России на 2006–2015 годы, и тем самым – подтверждение восстановления потенциала отечественного научно-производственного комплекса, позволит приступить к полномасштабному, ответственному и подкрепленному реальной оценкой наших возможностей планированию долгосрочных программ пилотируемого освоения космоса на следующие десятилетия.

Если какие-то малопредставимые в настоящее время внешние условия потребуют все же определить конкретные шаги по планированию и реализации Большого космического проекта, единственным возможным компромиссом здесь представляется специализированная двухфазная программа, первая часть которой

должна предусматривать развитие инфраструктуры в соответствии с общей логикой описанного нами рубежно-целевого подхода, повышение надежности прогнозирования состояния реализующей среды и поисковые НИР по возможным вариантам реализации проекта. Лишь во второй фазе такой программы возможно планирование и выбор варианта реализации большого проекта дальнейшего освоения космического пространства.

Заключительный аккорд в статье такого рода, как правило, предполагает описание собственных предпочтений автора по выбору следующей цели пилотируемого освоения космоса. Надо сказать, что сложившийся к настоящему моменту «короткий список» в реальности невелик и включает гипотетическую будущую международную орбитальную станцию («МКС-2»), высокоширотную или иную национальную орбитальную станцию, облетные, посадочные и базовые лунные и марсианские варианты, полет к малому телу Солнечной системы и, возможно, один-два экзотических проекта типа космического производства или облета Солнца по гелиоцентрической орбите [7]. Принципиальная позиция автора, однако – не проводить никакого сравнения этих вариантов. Основной смысл настоящей работы как раз и заключается в попытке продемонстрировать бессмысленность такого рода сравнений, проводимых в рамках единственной статьи или в ходе единственной ведомственной НИР. Нами описаны методологические подходы, позволяющие на следующем этапе системных исследований выстроить процедуру, определить граничные условия и критериальную систему для реального формирования, сравнения и выбора того или иного варианта, но никак не методология собственно выбора варианта следующей крупномасштабной пилотируемой космической программы России. Ни в коей мере не претендуя на сколько-нибудь значимую роль в формировании соответствующей научно-методической базы, высказанные соображения, на наш взгляд, могут быть учтены в последующей полномасштабной научной дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела // Ведомости Верховного Совета СССР. – 1967. – № 44. – С. 588.
- [2] Бендиков М.А. Об институциональных основах прогнозирования и принятия решений в инновационной сфере (на примере космической деятельности) / Бендиков М.А., Пайсон Д.Б. // Проблемы прогнозирования. – 2010 – № 5 (122). – С. 27–37.
- [3] Борчев М.А. О военной космонавтике // Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: СИП РИА, 2005. – 232 с.
- [4] Вылегжанин А. Космос в международно-правовом контексте [Электронный ресурс]/ Вылегжанин А., Юзбашян М. // Международные процессы. – Т.9. – № 3 (27). – 2011. URL: <http://www.intertrends.ru/twenty-seventh/04.htm>.
- [5] Жук Е.И. Пилотируемая космонавтика: международная и национальная безопасность. Монография. – Звездный городок: РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2008.
- [6] Космонавтика XXI века / Черток Б.Е., Батулин Ю.М. и др. – М.: Издательство «РТСофт», 2010. – 864 с.
- [7] Кричевский С.В. Аэрокосмическая деятельность: методологические, исторические, социоприродные аспекты. Монография. – М.: Изд-во РАГС, 2007. – 316 с.
- [8] Лакатос И. Фальсификация и методология научно-исследовательских программ – М.: «Медиум», 1995. – 236 с.

- [9] Малашенкова Е.В. Институциональные проблемы коммерциализации результатов научно-технической деятельности, полученных при реализации космических программ / Малашенкова Е.В., Пайсон Д.Б., Урманов О.А. // Российский экономический интернет-журнал [Электронный ресурс]: Интернет-журнал АТиСО / Акад. труда и социал. отношений – Электрон. журн. – М.: АТиСО, 2010. URL: http://www.e-rej.ru/Articles/2010/Malashenkova_Payson_Urmanov.pdf.
- [10] Моисеев И.М. Большой космический проект // Российский космос. – 2008. – № 3. – С. 20–25.
- [11] Моисеев И.М. Выбор космической цели // Российский космос. – 2009. – № 6. – С. 42–45.
- [12] Павловский А.И. Мирополитические аспекты освоения космического пространства. Дисс.канд.полит.наук. – М., 2011. – 179 с.
- [13] Пайсон Д.Б. Космическая деятельность: Эволюция, организация, институты – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 312 с.
- [14] Пайсон Д.Б. Диверсификация эффектов в космических программах: преодоление «эффекта разрыва» // Модели и методы инновационной экономики. Сборник научных трудов. Выпуск 2. – М.: МАОН, 2010. – С. 153–162.
- [15] Профессор Кроули о пилотируемой программе США [Электронный ресурс] // Веб-издание «Газета.Ру». Раздел «Наука». – 15 мая 2012 г. URL: http://www.gazeta.ru/science/2012/05/15_a_4583717.shtml?incut2
- [16] Райкунов Г.Г. Основные направления российских работ по изучению и освоению Солнечной системы: проблемы и перспективы (по результатам системного проекта) [Электронный ресурс] // Доклад на пленарном заседании Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 2010 г. URL: <http://www.readings.gmik.ru/lecture/2010-OSNOVNIE-NAPRAVLENIYA-ROSSIYSKIH-RABOT-PO-IZUCHENIYU-I-OSVOENIYU-SOLNECHNOY-SISTEMI-PROBLEMI-I-PERSPEKTIVI-PO-REZULTATAM-SISTEMNOGO-PROEKTA> (дата обращения 22.07.2012).
- [17] Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу [Электронный ресурс] / Федеральное космическое агентство: официальный сайт. URL: <http://www.roscosmos.ru/main.php?id=402>.
- [18] Стратегия развития космической деятельности России до и после 2030 года [Электронный ресурс] / Электронный бюллетень новостей по солнечно-земной физике. – 2012. – № 4. – С. 4–21. URL: <http://ebull.ru/dl/142i.pdf>.
- [19] Greenberg J.S. Economic Principles Applied to Space Industry Decisions // AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics , Vol.201, Lexington, Massachusetts, U.S., 2003. – 486 pp.
- [20] Payson D. Actual Systems Research Problems as Seen from the Russian Space Program Perspective / Payson D., Golovko A., Konorev A., Malchenko A. // A Paper for the 60th IAC Congress, Daejeon, Republic of Korea, October 12–16, 2009, IAC-09-D1.3.9.
- [21] Seeking a Human Spaceflight Program Worthy a Great Nation [Электронный ресурс]: Review of U.S. Human Spaceflight Plans Committee / Review of U.S. Human Spaceflight Plans Committee Final Report, 2009. URL: http://www.nasa.gov/pdf/396117main_HSF_Cmte_FinalReport.pdf. – 156 pp.
- [22] Space Economics [Текст] / Edited by J.S.Greenberg and H.R.Hertzfeld // AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics , Vol.144, Washington, U.S., 1992. – 446 pp.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПОДГОТОВКИ ЭКИПАЖЕЙ МКС ИЗ ШЕСТИ ЧЕЛОВЕК

М.М. Харламов, А.А. Курицын, А.В. Темеров

М.М. Харламов; докт. техн. наук А.А. Курицын; А.В. Темеров (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются особенности проведения и контроля подготовки экипажей МКС с учетом изменения состава экипажа станции до 6 человек в условиях усложнения МКС, увеличения объема решаемых задач экипажем на борту комплекса, соответственно увеличения объемов подготовки на тренажерах.

Ключевые слова: подготовка космонавтов, Международная космическая станция, квалификация членов экипажей МКС, тренировки на комплексных и специализированных тренажерах, проведение и контроль подготовки космонавтов.

Specific Features of Carrying Out and Control of the ISS Six-Man Crew Training. M.M. Kharlamov, A.A. Kuritsyn, A.V. Temerov

The paper considers the peculiarities of carrying out and control of ISS crew training taking into account increasing of crew size up to 6 members under conditions of the ISS complication, increasing amount of tasks, solved onboard the ISS, and correspondingly, increasing volume of simulator training.

Key words: cosmonaut training, the International Space Station, qualification of ISS crew members, training on integrated and dedicated simulators, carrying out and control of cosmonaut training.

Начиная с 2009 года, с экспедиции МКС-20, экипажи МКС состоят из шести, а не из трех человек, как ранее, что привело к увеличению объемов подготовки экипажей МКС. В интересах рационального распределения учебной нагрузки на космонавтов, персонал ЦПК, а также загруженности технических средств подготовки космонавтов (ТСПК), данный фактор должен учитываться при подготовке космонавтов на третьем этапе (этапе подготовки в составе экипажа).

Проведение подготовки экипажей МКС из шести человек

На третьем этапе подготовки космонавтов должны достигаться следующие цели:

- обеспечение высокого уровня подготовленности космонавтов, включенных в состав основных и дублирующих экипажей из шести человек;
- обеспечение достаточного количества подготовленных экипажей МКС, состоящих из шести человек;
- оптимизация напряженности подготовки космонавтов на третьем этапе (с точки зрения человеческого фактора и загруженности ТСПК).

Конкретные задачи подготовки космонавтов на третьем этапе с учетом увеличения численности экипажей МКС до шести человек должны определяться, исходя из особенностей программы полета МКС, планов формирования и ротации экипажей, а также распределения функциональных обязанностей в экипаже и требований к уровням квалификации членов экипажей.

С 2010 года и на ближайшую перспективу к основным задачам подготовки космонавтов для полетов на МКС (с учетом шести членов экипажа) на третьем этапе относятся [1–4]:

- изучение конструкции, бортовых систем, научной аппаратуры и специального оборудования ТПК «Союз ТМА-М», ТГК «Прогресс» и РС МКС, правил их экс-

плуатации, технического обслуживания, ремонта и др., а также модулей и транспортных средств партнеров;

- изучение программы предстоящего полета, бортовой документации и документов, регламентирующих правила взаимодействия членов экипажа между собой и с группами управления и обеспечения полета, кодекса поведения экипажа и др.;

- освоение конкретных должностных и функциональных обязанностей в экипаже;

- практическая отработка элементов программы полета;

- приобретение устойчивых навыков работы со штатной бортовой документацией ТПК и РС МКС;

- совершенствование знаний, навыков и формирование умений по комплексному управлению и эксплуатации ТПК «Союз ТМА-М» и РС МКС при выполнении программы полета экспедиции, в штатных режимах функционирования, нештатных и аварийных ситуациях (пожар в жилых отсеках, их разгерметизация, загрязнение атмосферы) на всех этапах полета;

- приобретение комплексных навыков действий при выполнении дооснащения, монтажно-демонтажных и ремонтно-восстановительных работ на РС МКС;

- изучение методик и отработка навыков выполнения научных исследований и экспериментов, включенных в программу полета;

- освоение штатного индивидуального снаряжения (спасательные скафандры, ложементы и др.);

- подготовка по типовым операциям и задачам ВКД конкретного космического полета;

- приобретение навыков организации и планирования совместной деятельности экипажей на борту МКС, в том числе проведения пересменки экипажей;

- изучение правил управления полетами МКС, взаимодействия ЦУПов между собой и с экипажами МКС;

- приобретение навыков и умений при выполнении динамических режимов (сближение, причаливание, стыковка, перестыковка, спуск, ТОРУ ТГК и др.);

- приобретение навыков выполнения многосегментных и многосистемных процедур на борту МКС;

- проведение с космонавтами медицинских мероприятий, направленных на обеспечение хорошего состояния здоровья, высокой работоспособности экипажа, психической готовности к выполнению медико-биологического раздела программы полета и программы полета в целом, подготовка организма космонавта к воздействию факторов космического полета;

- подготовка по английскому языку в объеме, позволяющем выполнять космический полет в составе международного экипажа на МКС.

Порядок проведения подготовки экипажей из шести человек утвержден Международным контрольным советом по подготовке (ИТСВ), который обеспечивает руководство и координацию многосторонней подготовки, проводимой всеми партнерами. Схема взаимодействия ИТСВ с международными органами управления подготовкой экипажей МКС представлена на рис. 1.

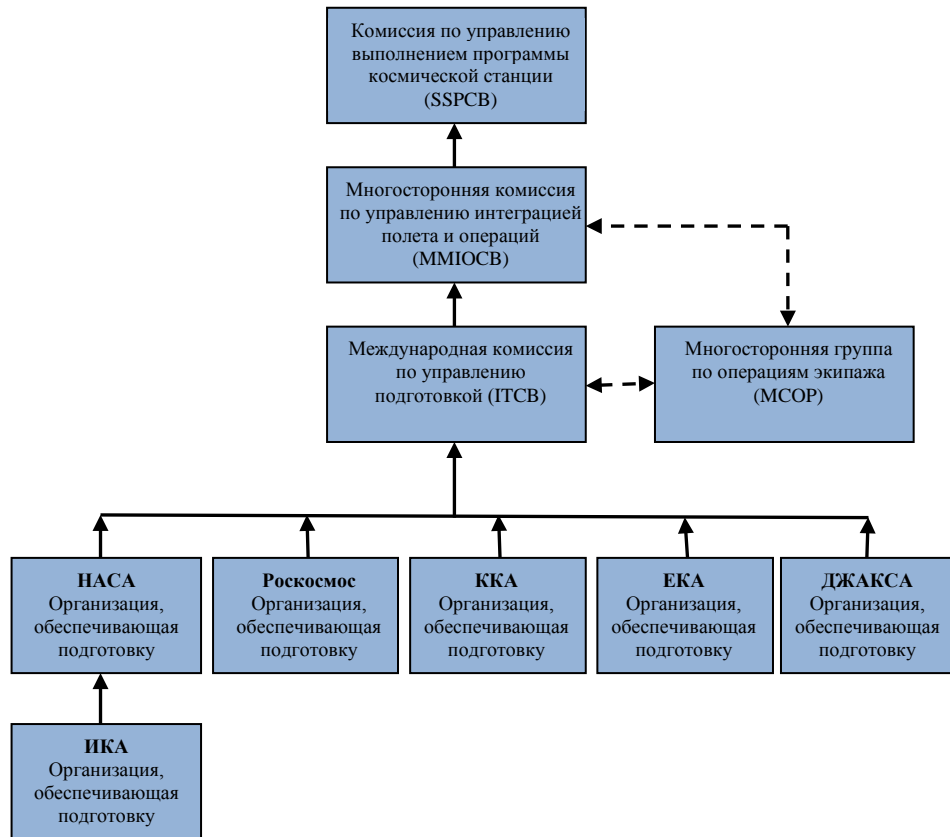


Рис. 1. Координация процесса подготовки экипажей МКС

При организации подготовки на третьем этапе следует принимать в расчет следующие исходные положения, связанные с сегментным планированием полета МКС:

- все члены экипажей проходят подготовку по действиям в аварийных ситуациях в полном объеме по уровню «оператор»;
- российские космонавты готовятся по системам РС МКС, включая российскую программу ВКД и российскую научную программу, по уровню «специалист», по большинству систем АС МКС проходят подготовку по уровню «пользователь»;
- астронавты готовятся по АС МКС, включая американскую программу ВКД и научную программу, в качестве «операторов» и «специалистов», по большинству систем РС МКС проходят подготовку по уровню «пользователь».

Уровни подготовленности членов экипажа МКС определяются таблицей квалификаций и ответственности членов экипажей (CQRM-1 Crew Qualifications & Responsibility Matrix), разрабатываемой международными рабочими группами на основании типовой таблицы CQRM-0.

Исходя из вышесказанного, особенностями проведения подготовки космонавтов и астронавтов в составе экипажа МКС являются следующие:

1. При изучении бортовых систем МКС, принципов деятельности экипажей на борту МКС, правил организации и планирования деятельности экипажей МКС должны учитываться особенности распределения обязанностей внутри экипажа из шести человек, распределение ответственности на каждом из сегментов станции в соответствии с уровнями квалификации (пользователь, оператор, специалист).

2. При изучении правил управления полетом МКС, взаимодействия ЦУПов между собой и с экипажами МКС необходимо учитывать изменения в существующих правилах полета для экипажей из шести человек, увеличение количества ЦУПов, участвующих в управлении полетом МКС.

3. При проведении тренировок для приобретения навыков действий при комплексной эксплуатации бортовых систем МКС необходимо учитывать распределение ответственности между всеми членами экипажа станции в соответствии с изменившимися требованиями для экипажа из шести человек.

4. При проведении занятий по подготовке к действиям в аварийных ситуациях необходимо учитывать распределение обязанностей между шестью членами экипажа, которое определено правилами полета в случае возникновения аварийной ситуации на борту МКС.

5. Использование схемы единого потока подготовки экипажей МКС (single-flow-to-launch) из шести человек [5], представленной на рис. 2. В основу схемы единого потока положен принцип, что дублирующий экипаж летит на МКС в качестве основного экипажа через одну экспедицию (приблизительно через полгода после окончания дублирования).

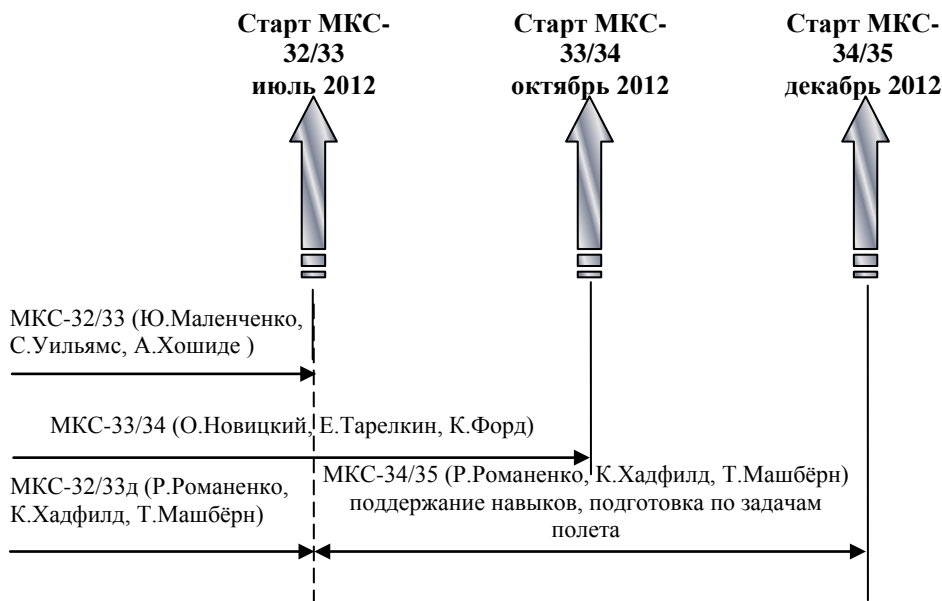


Рис. 2. Схема единого потока подготовки экипажей МКС из шести человек

Контроль подготовленности экипажей МКС и качества организации учебно-методического процесса подготовки

Контроль подготовки экипажей МКС в ЦПК представляет собой систему взаимосвязанных и взаимообусловленных форм, способов и средств объективной оценки качества профессиональной подготовленности экипажей на различных этапах их подготовки, в процессе выполнения космического полета, а также в период послеполетного разбора. Структура подготовки экипажей из шести человек (единый поток подготовки экипажей МКС из шести человек) представлена на рис. 3. При этом используются критерии оценки, разработанные на основании существующих требований к качеству профессиональной подготовленности членов экипажа из шести человек, с учетом распределения ответственности на каждом из сегментов станции в соответствии с уровнями квалификации (пользователь, оператор, специалист).

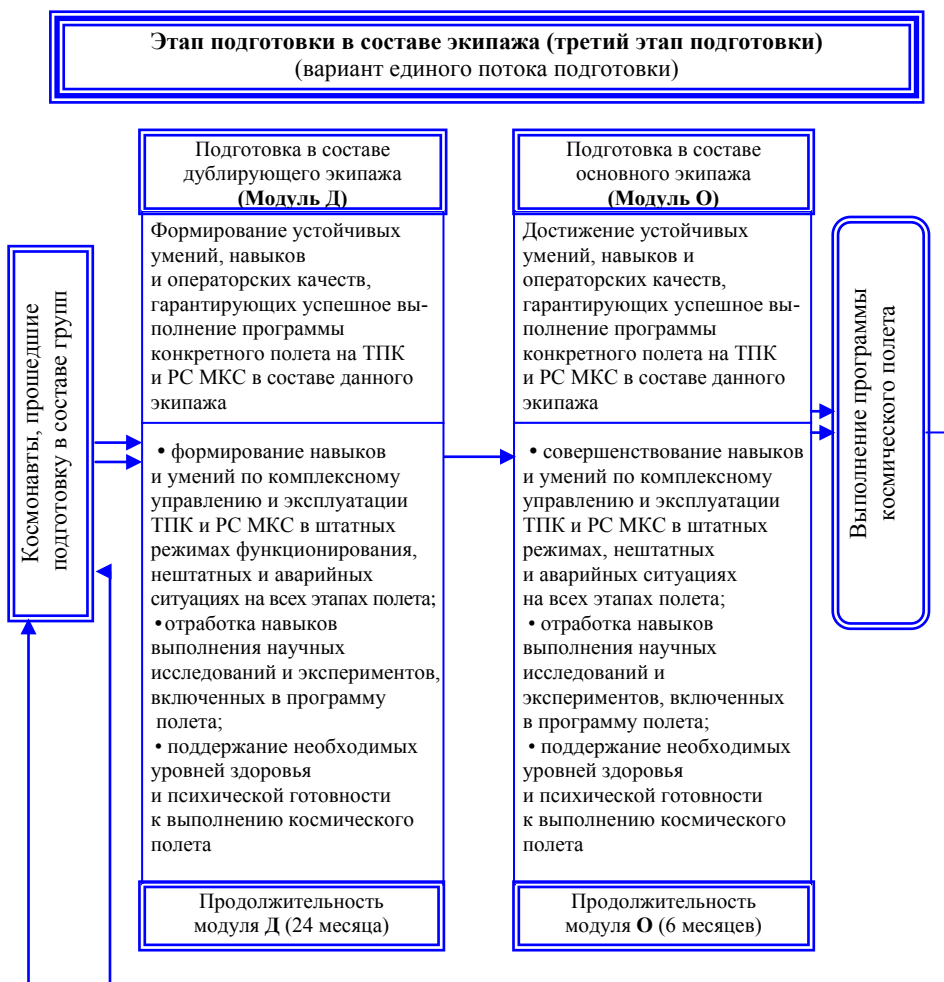


Рис. 3. Структура этапа подготовки в составе экипажа МКС (вариант единого потока подготовки для экипажей из шести человек)

Уровни подготовки экипажей предусматривают следующие виды контроля:

- контроль с целью проверки текущего и итогового уровней подготовленности членов экипажа и экипажа в целом;
- контроль учебно-методического процесса подготовки.

Контроль текущего и итогового уровней подготовленности экипажей МКС

Основными целями контроля текущего и итогового уровней подготовленности экипажей являются:

- определение степени усвоения материала в объеме, изложенном в процессе проведенных теоретических и практических занятий, осуществляется по результатам зачетов и экзаменов (вопросы, выносимые на зачеты и экзамены, предварительно согласовываются с головным разработчиком космической техники, постановщиками экспериментов и разработчиками бортовой научной аппаратуры);
- определение степени соответствия приобретенных в процессе практических занятий и тренировок навыков установленным временным и другим нормативам, а также навыков работы в составе экипажа с использованием бортовой документации;
- выявление недостатков подготовки и разработка организационно-методических мероприятий по улучшению процесса подготовки.

Организационными формами итоговой проверки подготовленности экипажа МКС являются: зачеты, экзамены, зачетные и экзаменационные тренировки на специализированных тренажерах и стендах, комплексные экзаменационные тренировки. Итоговая оценка приобретенных в ходе практических занятий и тренировок навыков космонавтов (экипажей) по работам со служебными бортовыми системами и научной аппаратурой проводится в процессе экзаменационной комплексной тренировки.

Контроль подготовленности членов экипажей МКС проводится с учетом требований к подготовленности каждого члена экипажа в соответствии с таблицей квалификаций и ответственности членов экипажей из шести человек (CQRM-1).



Рис. 4. Экзаменационная тренировка экипажа на тренажере ТДК-7СТ

На заключительном этапе подготовки с экипажами проводятся:

- экзаменационные тренировки на тренажере «Дон-Союз» по оценке готовности экипажей к выполнению режимов ручного управления сближением;
- экзаменационные тренировки на тренажере «Дон-Союз» по оценке готовности экипажей к выполнению режимов ручного управления причаливанием и перестыковкой;
- экзаменационные тренировки на тренажере «ТС-18» по ручному управляемому спуску с орбиты;
- экзаменационные тренировки на тренажере «Телеоператор» по оценке готовности экипажей к выполнению режима ТОРУ ТГК «Прогресс М»;
- комплексные экзаменационные тренировки на тренажерах ТДК-7СТ и РС МКС по оценке готовности экипажей к выполнению в целом программы полета на ТПК «Союз ТМА-М» и РС МКС.

В ходе комплексных экзаменационных тренировок на тренажерах ТПК и РС МКС комиссией, в состав которой входят специалисты ЦПК, головной организации-разработчика космической техники, российских организаций-постановщиков КЭ и других партнеров, с учетом результатов ранее выполненных тренировок оценивается подготовленность основного и дублирующего экипажей к выполнению программы космического полета.

По окончании подготовки экипажа МКС в ЦПК проводится анализ результатов подготовки и формирование таблицы распределения квалификаций и ответственности членов экипажа (CQRM-2) для передачи в ЦУП. Таблица CQRM-2 отражает фактические квалификации членов экипажа по системам и полезным нагрузкам, достигнутые ими в процессе подготовки.

Итоги выполнения программы подготовки представляются на Межведомственную комиссию по оценке готовности экипажей к выполнению космического полета. Они подтверждаются протоколами о готовности экипажа к выполнению программы полета, протоколами зачетов, экзаменов и заключениями межведомственных комиссий по проведению зачетных и экзаменационных тренировок, и позволяют сделать вывод, что объем и содержание подготовки экипажа были достаточны для успешной работы на МКС и выполнения автономного полета на транспортном корабле.

На заседании Межведомственной комиссии, которая рассматривает результаты зачетов, экзаменов и комплексных экзаменационных тренировок, формируется заключение о готовности экипажа к выполнению программы космического полета.

Контроль учебно-методического процесса подготовки экипажей МКС

Целью контроля учебно-методического процесса подготовки экипажей МКС из шести человек является оценивание качества организации процесса подготовки экипажа, в том числе реализации послеполетных замечаний и предложений экипажа по подготовке, с учетом распределения ответственности членов экипажа на российском сегменте станции в соответствии с уровнями квалификации.

Основными формами контроля учебно-методического процесса являются:

- проверка организации и качества проведения занятий;
- проверка состояния учебно-методической документации;
- контрольные посещения занятий и тренировок;
- оценка готовности ТСПК к проведению занятий и тренировок.

В статье рассмотрены особенности проведения и контроля подготовки экипажей МКС, связанные с увеличением состава экипажа МКС до шести человек. Показано, что изменение подготовки, в основном, связано:

- с изменением распределения ответственности членов экипажей МКС на борту станции, в соответствии с сегментным планированием полета МКС;
- введением единого потока подготовки экипажей МКС из шести человек.

Формы контроля процесса подготовки экипажей из шести человек практически не изменились, изменились требования к подготовке членов экипажей по РС МКС в соответствии с сегментным планированием.

Подход, используемый международными партнерами для подготовки экипажей из шести человек, связанный с сегментным планированием, введением единого потока подготовки, опыт проведения и контроля подготовки экипажей МКС должны учитываться для подготовки экипажей перспективных космических комплексов, лунных и напланетных экспедиций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Курицын А.А. Концепция подготовки экипажей Международной космической станции в составе 6 человек / Материалы XXXIV Международных общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А. Гагарина. – Гагарин, 2007. Сборник докладов.
- [2] Курицын А.А. Задачи проведения комплексной подготовки экипажей к выполнению полетных операций на борту Международной космической станции при увеличении состава экипажа до 6 человек / Материалы I конференции Международной академии космонавтики – Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Космос для человечества. – Королев: ИАА-РАКЦ, 2008. Сборник тезисов.
- [3] Курицын А.А., Онуфриенко Ю.И. Адаптация системы подготовки экипажей МКС на комплексных тренажерах при увеличении состава экипажа до шести человек / Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Звездный городок, 2009. Сборник тезисов.
- [4] Курицын А.А., Харламов М.М. Влияние этапов создания и эксплуатации орбитальных пилотируемых комплексов на развитие системы подготовки космонавтов / Гагаринский сборник: материалы XXXVIII Международных общественно-научных чтений, посвященных памяти Ю.А. Гагарина. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 568 с.
- [5] Крючков Б.И., Курицын А.А., Харламов М.М. Профессиональная деятельность космонавтов на борту Международной космической станции. Материалы XLVI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского «К.Э. Циолковский и будущее космонавтики» – Калуга: Издательство «Эйдос», 2011.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (продолжение)

В.А. Соловьёв, В.Е. Любинский, Е.И. Жук

Дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР, лауреат Государственной премии в области науки и техники, докт. техн. наук, профессор В.А. Соловьёв; докт. техн. наук В.Е. Любинский; лауреат Государственной премии в области науки и техники, доктор политических наук, канд. техн. наук, профессор Е.И. Жук (ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»)

В статье рассматриваются особенности построения наземного комплекса управления (НКУ) и его место в общей системе управления полетом пилотируемых космических аппаратов. Представлены существующие и перспективные бортовые радиотехнические комплексы российского сегмента Международной космической станции, непосредственно функционирующие со средствами НКУ при реализации программы полета. С учетом состава НКУ и бортовых радиотехнических комплексов раскрываются пути решения задачи по оптимизации планирования работы НКУ в составе автоматизированной системы управления космическим полетом. В заключении рассматриваются особенности управления научными экспериментами, проводимыми на борту пилотируемых космических аппаратов.

Ключевые слова: наземный комплекс управления, радиотехнический комплекс, научно-прикладные исследования, космический эксперимент, целевая операция.

Current Status and Prospects of Development of Spaceflight Control System (continued). V.A.Solovyov, V.E.Lubinskiy, E.I.Zhuk

The paper considers the features of construction of the ground control complex (GCC) and its place in the entire mission control system of manned spacecraft. Existing and future flight communication equipment of the ISS RS, directly functioning with the facilities of the ground control complex during implementation of the flight program is presented here. Taking into account the content of the ground control complex and flight communication equipment, the way of solving optimization problems of planning operation of the ground control complex within the automated mission control system are shown. In the conclusion, the peculiarities of managing research experiments, being executed onboard a manned spacecraft, are considered.

Key words: the ground control complex, communication equipment, scientific-applied research, space experiment, target operation.

5. Наземные радиотехнические комплексы управления и связи

Основные компоненты процесса управления полетом любого типа космического аппарата (КА) осуществляются в результате выполнения системой управления полетом ряда функций, состав и особенности реализации которых для любой конфигурации контура управления и сформированного стратегического плана полета в общем виде представляются следующим образом:

1. Коррекция номинального стратегического плана полета и оперативное планирование.
2. Навигационные измерения и баллистические расчеты.
3. Управление системами КА – выдача на бортовые системы КА управляющих воздействий (УВ).

4. Контроль параметров состояния КА, обнаружение и идентификация нештатных ситуаций в процессе контроля параметров.

5. Оценка полета, выработка и принятие решений по дальнейшему его выполнению.

Осуществление указанных функций управления пилотируемым космическим полетом возлагается на три основных элемента (звена) контура управления – наземный комплекс управления, бортовой контур автоматического управления (БКАУ) и экипаж. На эффективность процесса управления полетом существенным образом влияет распределение функций между указанными звеньями контура управления.

Наземный комплекс управления (НКУ) является наиболее мощным звеном в контуре управления полетом КА, способным выполнять практически все функции.

Потенциал НКУ определяется следующими факторами:

- постоянным присутствием в Центре управления полетами (ЦУП) квалифицированных специалистов по всем аспектам управления полетом;
- возможностью привлечения к решению возникающих проблем специалистов-разработчиков КА и его бортовых систем, а также других специалистов;
- наличием в ЦУПе высокопроизводительных вычислительных комплексов с развитым программным обеспечением (ПО) для решения любых задач управления полетом и поддержки деятельности персонала Главной оперативной группы управления (ГОГУ);
- возможностью моделирования полета (математического и физического) с использованием комплексных стендов – аналогов КА, а также отдельных бортовых систем и агрегатов;
- наличием интерфейсов с экипажем и БКАУ для обмена информацией, необходимой для выполнения НКУ своих функций.

Оценивая возможности НКУ, необходимо иметь в виду, что они ограничены условиями связи с КА, такими как: перерывы, связанные с радиовидимостью, состояние технических средств наземных станций слежения, погодные условия в районах их расположения, исправность радиосредств КА и т.п. Эти факторы снижают способность НКУ оперативной оценки полетной ситуации и парирования нештатных ситуаций, требующих быстрого реагирования.

В общем виде структура наземного комплекса управления российского сегмента МКС представлена на рис. 30.

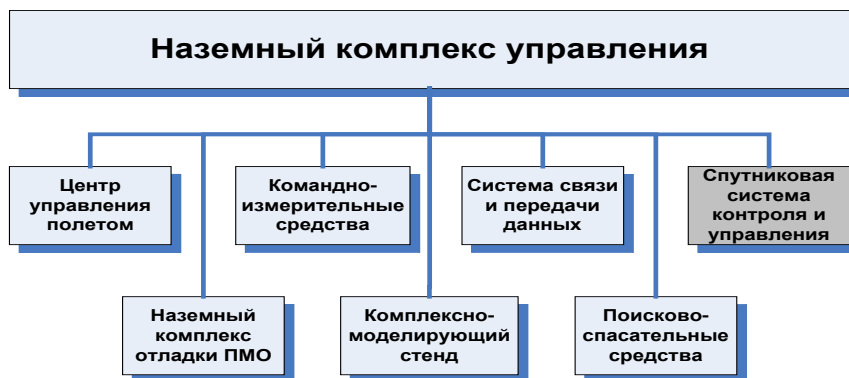


Рис. 30. Структура НКУ российского сегмента МКС

При управлении полетом взаимодействие с НКУ осуществляется по следующим основным направлениям:

- планирование задействования средств НКУ и каналов связи;
- реализация программы полета средствами НКУ;
- контроль технического состояния средств НКУ;
- анализ нештатных ситуаций на средствах НКУ и каналах связи, возникающих в процессе реализации программы полета;
- рекомендации по использованию средств НКУ;
- разработка предложений по развитию НКУ и модернизации технических средств.

Существующие и перспективные бортовые радиотехнические комплексы РС МКС, непосредственно функционирующие со средствами НКУ при реализации программы полета, представлены на рис. 31 и рис. 32 соответственно.



Рис. 31. Бортовые радиотехнические комплексы РС МКС

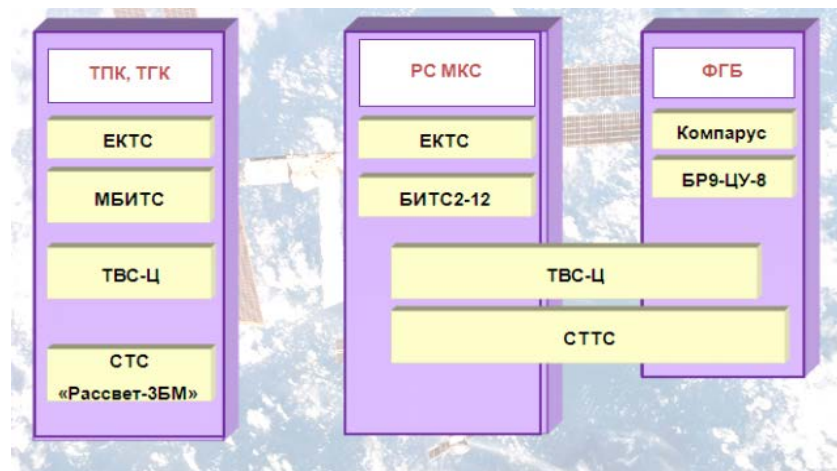


Рис. 32. Перспективные бортовые радиотехнические комплексы РС МКС

С учетом состава НКУ и бортовых радиотехнических комплексов постоянно решается задача оптимизации планирования работы НКУ автоматизированной системы управления космическим полетом (АСУ КП). Указанная задача оптимизации может быть сведена к *непротиворечивой оптимизации следующих декомпозируемых подзадач*:

1. Оперативное планирование, целью которого является скоординированное по времени выделение ресурсов НКУ для осуществления плановых технологических операций управления КА в соответствии с технологическим циклом управления (ТЦУ).

2. Планирование технического обслуживания – формирование расписания, в котором для каждого средства НКУ указано время начала и окончания обслуживания.

3. Планирование работы автоматизированной системы обмена информацией, т.е. формирование оптимального плана по показателям качества обслуживания всех допускающихся в сеть связи требований пользователей.

Планирование ресурсов средств НКУ целесообразно проводить по иерархической многоуровневой схеме.

На первом уровне планируют работу бортовой аппаратуры и составляют заявки на привлечение средств НКУ по управлению полетом соответствующего КА.

На втором уровне на основе заявок первого уровня рационально распределяют ресурсы с учетом целевого использования КА. Результат планирования второго уровня – проект плана привлечения средств НКУ.

На третьем уровне осуществляется общая координация проектов плана и заявок на привлечение средств НКУ с учетом общих ресурсов, ограничений по пропускной способности и т.д. К работам этого уровня относят:

- долгосрочное планирование ресурсов;
- координационное планирование;
- доведение оперативного плана до потребителей;
- систематизацию и статистическую обработку оперативного плана;
- коррекцию оперативного плана;
- контроль выполнения оперативного плана.

Технология взаимодействия иерархических уровней определяется как содержанием и направлением основных информационных потоков, циркулирующих между уровнями планирования, так и преобразованиями информации на каждом из них.

Основные информационные потоки между уровнями подразделяют на два типа:

1) от нижестоящего к вышестоящему – заявки на планирование ресурсов или коррекцию оперативного плана;

2) от вышестоящего к нижестоящему – оперативный план или коррективы к нему.

Технология преобразования информации на разных уровнях планирования заключается в следующем.

1. На нижнем:

- планирование выделенных ресурсов средств НКУ на основе плана работ с КА;
- передача заявок на ресурсы для среднего уровня планирования.

2. На среднем:

- сбор заявок нижнего уровня;
- координация выделенных ресурсов, передача скоординированных заявок на верхний уровень.

3. На верхнем:

- долгосрочное планирование ресурсов;
- сбор заявок от среднего (нижнего) уровня;
- координационное планирование ресурсов средств НКУ;
- систематизация и статистическая отработка оперативного плана.

Таким образом, процесс планирования и реализации плана работы НКУ проходит четыре этапа: начальный, предварительный, основной и реализация.

6. Особенности управления научными экспериментами, проводимыми на борту пилотируемых космических аппаратов

Реализация программы научно-прикладных исследований (НПИ) предполагает выполнение ряда этапов (см. рис. 33).

Научные и прикладные эксперименты и исследования, проводимые на борту КА, принято относить к числу так называемых целевых операций. Сущность планирования целевых операций заключается:

- а) в установлении необходимости (либо ее отсутствия) обеспечения специальных полетных или динамических условий их выполнения, привязанных к определенным периодам полета;
- б) в определении оптимального объема каждой целевой операции;
- в) в распределении установленного объема операций по суткам в планируемый период полета.

Управление полетом при выполнении целевых операций (управление экспериментами на борту КА) предусматривает:

- планирование программы экспериментов, исходя из их заранее сформулированного назначения;

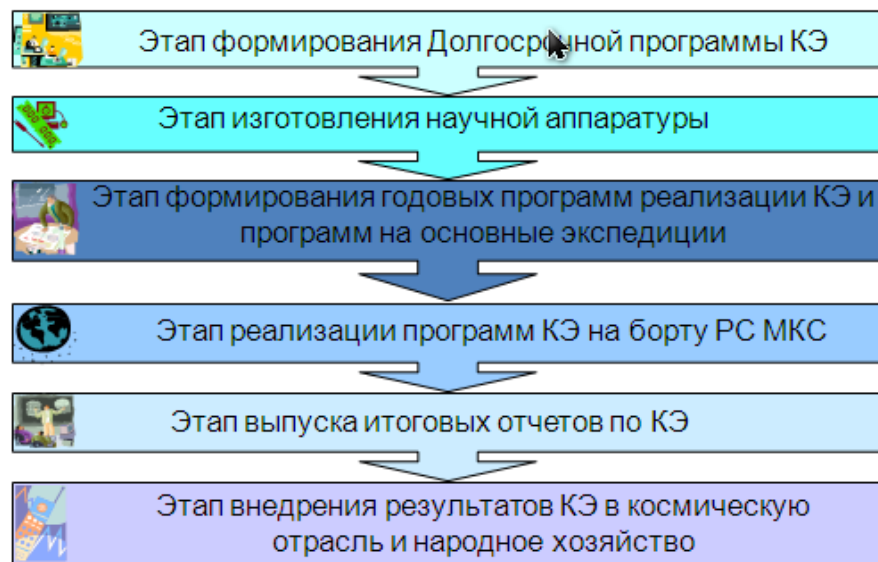


Рис. 33. Этапы формирования и реализации программы НПИ

- контроль состояния используемой аппаратуры и управление ее работой по проведению и регистрации результатов экспериментов;
- управление функционированием дополнительно привлекаемых средств, например наземных астрономических обсерваторий, при проведении комплексных экспериментов;
- управление движением КА в соответствии с принятой программой экспериментов;
- управление информационными потоками, относящимися к программе экспериментов, их оперативный анализ;
- выработку рекомендаций по участию экипажа в проведении экспериментов.

Момент начала и продолжительность экспериментов, относящихся к целевым операциям, определяют, исходя из требований увеличения объема и повышения качества получаемой научной информации либо из экономии ресурсов систем КА. Объем научной информации зависит, прежде всего, от продолжительности зоны проведения эксперимента.

Как показала практика пилотируемых космических полетов, для обеспечения высокого качества и увеличения объема научной информации на начальном этапе планирования необходимо учитывать, что для многих типов КА *технологические эксперименты* следует выполнять в интервалы времени, когда направление на Солнце составляет с нормалью к плоскости орбиты минимальный угол. Так как *астрономические эксперименты* обычно ставят при движении КА по участку орбиты, не освещаемому прямым солнечным светом, их проведение следует планировать в периоды, когда направление на Солнце составляет малый угол с плоскостью орбиты. При промежуточных значениях угла между плоскостью орбиты и направлением на Солнце можно проводить *геофизические исследования*. Однако в момент съемки всегда необходима достаточная или наилучшая освещенность фотографируемой поверхности.

Медико-биологические эксперименты общего плана, как правило, выполняют равномерно в течение всего полета. В этом смысле большинство из них должно быть отнесено к целевым операциям второго типа.

Приведенные сведения не исчерпывают всего многообразия ситуаций, возникающих при оперативном планировании экспериментов, выполняемых на КА. Тем не менее, они в какой-то мере иллюстрируют основные идеи к выбору момента выполнения эксперимента.

При *технологических, биологических, физико-химических* и некоторых других видах экспериментов перегрузки, испытываемые КА, в идеале должны быть нулевыми, по крайней мере, не должны превышать заданных значений. Анализ ускорений, возникающих под влиянием естественных сил и при работе исполнительных органов бортовых систем, дает основание считать, что наибольшие перегрузки создаются при включении реактивных двигателей, корректирующих орбиту КА, поэтому указанные эксперименты следует проводить между коррекциями орбиты.

Возможен и другой подход, основанный на использовании для управления движением КА двигателей малой тяги или управляющих его ориентацией силовых гироскопов, работа которых не препятствует проведению экспериментов. Помимо снижения уровня перегрузок с помощью двигателей малой тяги можно одновременно выполнять ориентацию и коррекцию, достигая значительной экономии топлива. Такое совмещение режимов реализуется приложением к КА не-

центральной силы, создаваемой реактивным двигателем, вектор тяги которого не проходит через центр масс.

Необходимо отметить, что проведение экспериментов на борту КА требует соответствующего баллистического обеспечения. Указанный вид обеспечения предполагает проведение расчетов и выдачу в группу управления полетом необходимой баллистической и управляющей информации, включающей в себя следующее:

1. Данные для построения требуемой ориентации КА (курсовой угол, время разарретирования гироскопов, программные углы разворотов, выполняемых автоматически, углы разворотов, осуществляемых вручную).

2. Параметры движения КА на интервале времени проведения экспериментов, в том числе высота орбиты над поверхностью Земли, геодезические широты и долготы подспутниковых точек, орбитальный азимут и угол места объекта наблюдения или других сопутствующих объектов (Солнца, Луны, планет, источников излучения на небесной сфере), угловые расстояния объектов наблюдения над местным или видимым горизонтом Земли, угловой радиус Земли, следы координатных осей связанной системы координат КА на небесной сфере, углы «Солнце–объект–Земля» (СОЗ) и/или «Солнце–объект–Луна» (СОЛ) и т.д. Помимо отмеченных могут использоваться другие параметры, характерные только для конкретных типов экспериментов и изменяющие свои значения при движении КА по орбите.

3. Характеристики, определяющие выполнение баллистических либо кинематических условий проведения экспериментов на заданном суточном или одновитковом интервале движения КА по орбите. В качестве примера таких характеристик могут быть названы: московское время восхода и захода исследуемых объектов наблюдения, время прохождения комплексом плоскости терминатора, время начала и завершения наблюдений, координаты полюса орбиты на небесной сфере, параллакс и дальность до наблюдаемого объекта, время прохождения восходящего узла орбиты и оскулирующие элементы орбиты КА в инерциальной системе координат при оскуляции на этот момент времени.

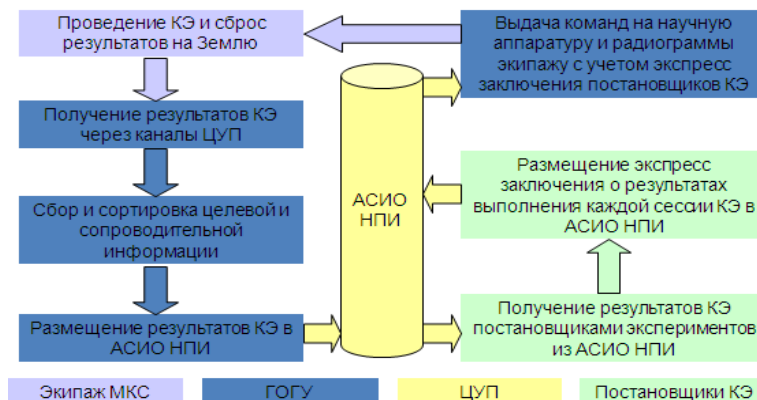


Рис. 34. Организация управления КЭ
(АСИО НПИ – автоматизированная система информационного обеспечения научно-прикладных исследований)

4. Уставки на бортовые приборы (секстант, астроориентатор, солнечный датчик), используемые при проведении экспериментов.

5. Управляющая информация, используемая для управления внебортовыми устройствами и техническими средствами, задействованными при проведении экспериментов. К такому виду информации относят, в частности, целеуказания средствам НКУ.

Помимо перечисленных видов баллистических и управляющих данных, при проведении экспериментов на борту КА может использоваться различная справочная информация, применяемая для оценки условий проведения конкретных экспериментов, их планирования и учета погрешностей результатов обработки данных. Как правило, эта информация представляет собой предварительно рассчитанный материал, оформляемый в виде графиков или таблиц.

В общем случае технологический цикл реализации программы НПИ представлен на рис. 34.

Окончание следует

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьёв В.А. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Соловьёв, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский. – Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
- [2] Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. – М.: Машиностроение, 1995.
- [3] Рабочие материалы научных исследований Благова В.Д., Матюшина М.М., Скурского Ю.А.

ОБ ОЦЕНИВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА КА

Б.И. Крючков

Докт. техн. наук Б.И. Крючков (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются проблемы оценивания эффективности технического обслуживания и ремонта космических аппаратов экипажами пилотируемых космических кораблей. При этом процессы технического обслуживания и ремонта рассматриваются как стохастические, поскольку они протекают в условиях воздействия на них множества случайных факторов. Показана возможность и целесообразность анализа эффективности технического обслуживания и ремонта с помощью имитационных математических моделей.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, космический аппарат, эффективность, целевые эффекты, математическая модель.

Estimating the Efficiency of Maintenance and Repair of a Space Vehicle.

B.I. Kryuchkov

The paper discusses the problems of estimating the efficiency of maintenance and repair of a space vehicle by a crew. At that the processes of maintenance and repair are considered as stochastic because they take place under the effect of many random factors. The paper shows the feasibility and purposefulness of analyzing the efficiency of maintenance and repair using a simulation mathematical model.

Key words: maintenance and repair, space vehicle, efficiency, target effects, mathematical model.

Понятие эффективности ТОР

Эффективность – одно из важнейших свойств, исследуемых и оцениваемых при эксплуатации современных сложных системотехнических комплексов. Однако, несмотря на большую теоретическую и практическую значимость и широкое применение, понятие эффективность до настоящего времени не определено ни ГОСТами, ни техническими регламентами.

В переводе с латинского «эффективный» означает результативный, действенный. Поэтому термины «эффективность» и «результативность» следует рассматривать как синонимы. В свою очередь, результативность характеризует степень достижения какого-то действия (результата), направленного на выполнение определенной цели. Иными словами, эффективность можно рассматривать как некоторое свойство, характеризующее приспособленность определенного процесса (действия) к достижению поставленной цели [1].

Целью запуска и эксплуатации любого КА, независимо от его предназначения (ДЗЗ, связи, метео, научных исследований и др.), является успешное выполнение им всех поставленных задач в течение заданного срока функционирования. Техническое обслуживание и ремонт (ТОР) КА в процессе эксплуатации должно быть направлено на достижение целей КА.

Достижение цели космическим аппаратом осуществляется за счет набора некоторых целевых эффектов в течение его полета. В общем случае, чем длительнее функционирует исправный КА, тем больше он достигнет целевых эффектов. В идеальном случае 100% целевых эффектов (целей) должно быть достигнуто в течение назначенного (установленного) ресурса КА.

В случае полного отказа КА до истечения назначенного ресурса, его фактический ресурс будет меньше установленного. Тогда фактические результаты полета космического аппарата $R_{факт.}$ будут меньше требуемых $R_{треб.}$. Значит, при $R_{факт.} < R_{треб.}$ поставленные перед КА цели не будут достигнуты.

Если КА отказывает не полностью, а лишь по некоторым каналам получения целевых эффектов (например, на связном ИСЗ отказал один из каналов, а другие функционируют нормально), требуемые целевые результаты полета КА будут достигнуты не в полной мере.

Единственным способом возвращения отказавшего или неисправного КА в режим полноценного функционирования, когда вновь станет возможным достижение им заданных целевых эффектов, является ТОР [3, 4, 5].

Система ТОР КА должна быть максимально приспособлена для решения этой задачи. Ее применение должно быть результативным, эффективным [3].

Эффективность технического обслуживания и ремонта КА – это комплексное свойство, характеризующее приспособленность принятой системы ТОР к достижению поставленных целей в заданные сроки функционирования КА.

Оценивание эффективности ТОР КА

Одной из главных задач анализа ТОР КА является задача оценивания эффективности.

В результате ТОР можно достичь условия, когда вектор результатов работы КА $\hat{R}_{факт}$ попадет в область требуемых значений $\{R^{TP}\}$.

Тогда оценивание эффективности ТОР КА может быть выполнено с помощью вероятностного показателя:

$$P_{ЭФФ}^{ТОРКА} = P_{ТОР}^{КА} = P(\hat{R}_{факт} \in \{R^{TP}\}), \quad (1)$$

где $P_{ТОР}^{КА}$ – вероятность попадания результатов функционирования КА $\hat{R}_{факт}$ при проведении ТОР в область требуемых значений R^{TP} .

В общем случае вектор $\hat{R}_{факт}$ является случайным и зависящим от трех компонентов:

$$\hat{R}_{факт} = \hat{R}_{<э>} (\hat{\mathcal{E}}_{<n>}, C_{<m>}, T_{<l>}), \quad (2)$$

где $\hat{\mathcal{E}}_{<n>}$ – вектор достигаемых целевых эффектов,

$C_{<m>}$ – вектор ресурсов,

$T_{<l>}$ – вектор временных затрат на получение соответствующих целевых эффектов.

Процессы ТОР КА стохастичны, поскольку они протекают в условиях воздействия на них множества случайных факторов. К таким факторам можно отнести влияние внешних воздействий, нерегулярность потоков отказов и неисправ-

ностей в оборудовании КА, различия в квалификации космонавтов, выполняющих ТОР, заранее неизвестные продолжительности и моменты проведения операций ТОР и др. Если процессы ТОР КА стохастичны, то и влияние их на результаты функционирования КА будет случайным. Поэтому использование стохастических подходов при оценивании эффективности ТОР КА, определяемых формулами (1) и (2), вполне оправдано.

В общем случае, условия, в которых осуществляется ТОР КА, определяются двумя векторами: вектором управляемых условий $B_{<p>}^{ycl} = \langle v_1, v_2, \dots, v_p \rangle$ и вектором неуправляемых условий (и факторов) $\hat{Z}_{<q>} = \langle \hat{Z}_1, \hat{Z}_2, \dots, \hat{Z}_q \rangle$. Они представляют собой переменные самого общего вида и характеризуют физические, ситуационные и другие условия.

Тогда случайный вектор результатов, достигаемых КА при проведении ТОР, можно представить в виде

$$\hat{R}_3 = \hat{R}_3 (B_{<p>}^{ycl}, \hat{Z}_{<q>}, \hat{S}_{<c>}^{ПТОР}, C_{<m>}, T_{<l>}), \quad (3)$$

где $\hat{S}_{<c>}^{ПТОР}$ – вектор параметров (свойств) процесса технического обслуживания и ремонта КА. Вектор $\hat{S}_{<c>}^{ПТОР}$ можно представить в виде совокупности определяющих его компонентов:

$$\hat{S}_{<c>}^{ПТОР} = \hat{S}_{<c>}^{ПТОР} (\hat{A}_{<n>}^{ЭТХ}, \hat{A}_{<k>}^{ЭК}),$$

где $\hat{A}_{<n>}^{ЭТХ}$ – вектор эксплуатационно-технических характеристик КА,

$\hat{A}_{<k>}^{ЭК}$ – вектор, определяющий профессиональные качества космонавтов, выполняющих ТОР.

Заметим, что одним из элементов системы ТОР являются космонавты, выполняющие при обслуживании КА определенные операторские функции. Значит, роль и место человека-оператора при комплексном подходе к оцениванию эффективности ТОР КА учитываются автоматически.

Вектор результатов, достигаемых КА при проведении ТОР (3), можно представить в полной форме следующим образом:

$$\hat{R}_{факт} = \hat{R}_3 = \hat{R}_3 (\hat{A}_{<n>}^{ЭТХ}, \hat{A}_{<k>}^{ЭК}, B_{<p>}^{ycl}, \hat{Z}_{<q>}, C_{<m>}, T_{<l>}). \quad (4)$$

С учетом (1) и (4) запишем показатель эффективности ТОР КА:

$$P_{ТОР}^{КА} = P [\hat{R}_3 (\hat{A}_{<n>}^{ЭТХ}, \hat{A}_{<k>}^{ЭК}, B_{<p>}^{ycl}, \hat{Z}_{<q>}, C_{<m>}, T_{<l>}) \in \{ R^{TP} \}]. \quad (5)$$

Значения $P_{ТОР}^{КА}$ могут быть только в пределах от 0 до 1, что удобно при оценивании эффективности применения различных систем ТОР КА.

Порядок вычисления $P_{TOP}^{КА}$ в рамках решения прямой задачи анализа эффективности TOP КА представлен ниже в виде блок-схемы алгоритма (рис. 1).

Основой методов анализа эффективности процессов TOP КА является математическое (имитационное) моделирование.

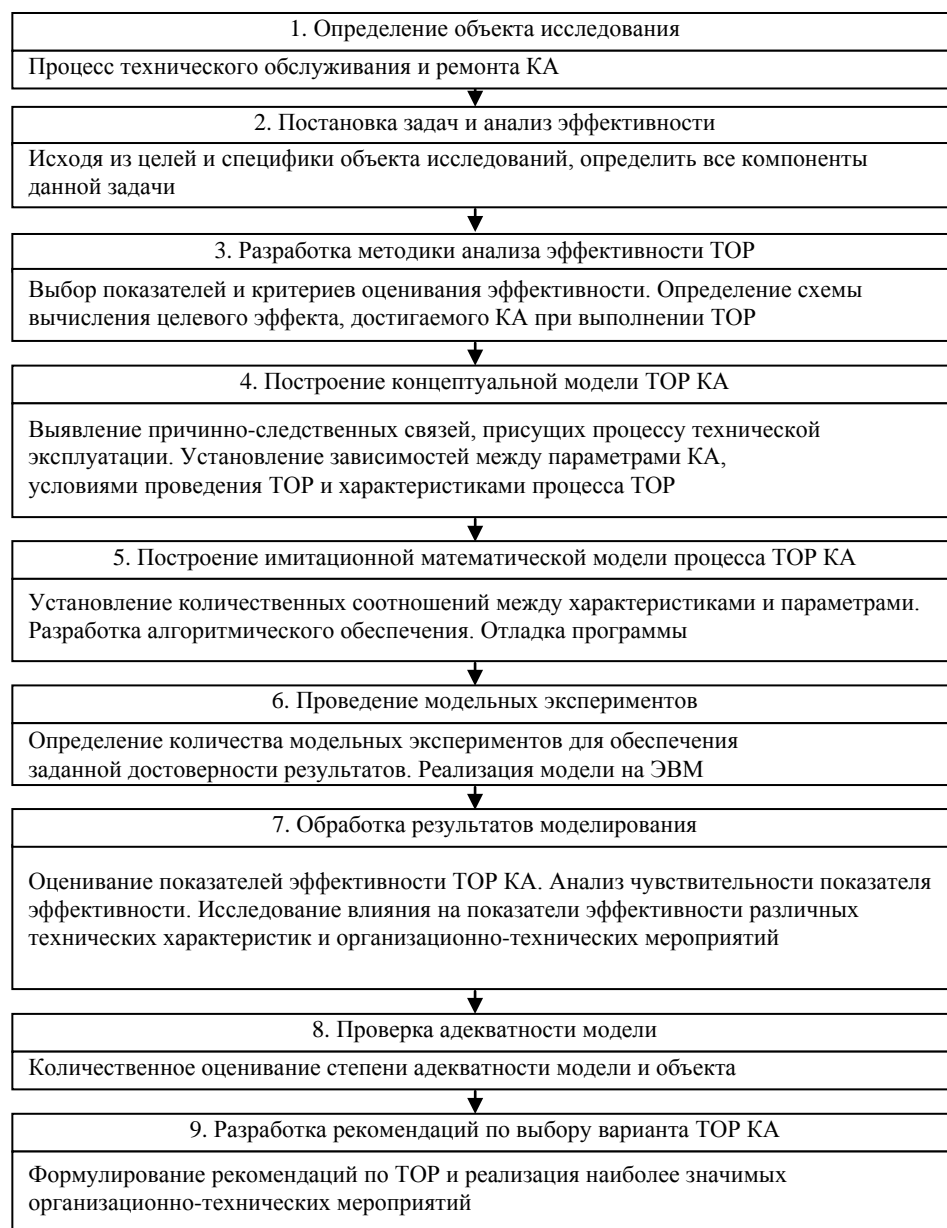


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи анализа эффективности TOP КА

Методы построения имитационных моделей, анализа их свойств и интерпретации результатов моделирования процессов ТОР бортовых систем КА рассмотрены в ряде работ [1, 2].

Заметим, что показатель эффективности ТОР КА, определяемый вероятностью $P_{ТОР}^{КА}$, является достаточно полной характеристикой лишь массовых операций (имитационное моделирование процедур ТОР КА строится на применении метода статистических испытаний – метода Монте-Карло). В процессе проектирования он является наиболее корректным при выборе наилучшего варианта системы технического обслуживания и ремонта КА. Для оценивания эффективности единичных операций показатель $P_{ТОР}^{КА}$ непригоден. При этом должны использоваться гарантируемые вероятности достижения цели $\omega^2(\gamma)$, где γ – уровень гарантии (гарантийная вероятность). Гарантируемые вероятности определяются методами теории стохастической индикации [1].

Приближенные методы оценивания эффективности ТОР КА

Задачи анализа эффективности процессов ТОР КА являются многокомпонентными (многокритериальными), а значит, трудоемкими, требующими учета многих параметров, условий и больших затрат машинного времени на их решение. Кроме того, как указано выше, в ряде случаев методы анализа, построенные на имитационном моделировании процедур ТОР, неприменяемы для оценивания эффективности ТОР единичных КА, а результаты, полученные методами теории стохастической индикации, не всегда легко поддаются осмыслению и анализу. В то же время, поскольку почти каждый КА является дорогостоящим и уникальным техническим комплексом, на практике оценивание эффективности ТОР каждого из них крайне важно.

Компромиссным способом решения задач анализа эффективности ТОР КА в подобных случаях может быть применение приближенных методов оценивания. Их основу составляет процедура выбора главного или ведущего компонента – показателя, наиболее полно отражающего физическую сущность операции (в нашем случае операции ТОР КА). На остальные компоненты априори накладываются ограничения (например, на стоимость, время ТОР КА) и в дальнейшем они в явном виде не фигурируют.

Заметим, что приближенные методы оценивания эффективности ТОР не в полной мере отвечают реальной стохастичности процессов обслуживания и ремонта КА. Фактически они обеспечивают либо детерминированные, либо квазирегулярные подходы к оцениванию ТОР. Однако наглядность и возможность оперативного применения приближенных методов позволяют с их помощью решать ряд практических задач.

Применение системы ТОР КА позволяет достичь на КА больших целевых эффектов, чем без технического обслуживания и ремонта $\mathfrak{E}^{ТОРКА} > \mathfrak{E}^{КА}$.

Тогда соотношения типа $\frac{\mathfrak{E}^{КА}}{\mathfrak{E}^{ТОРКА}}$ или $\frac{\mathfrak{E}^{ТОРКА} - \mathfrak{E}^{КА}}{\mathfrak{E}^{ТОРКА}}$ могут в первом при-

ближении в рамках детерминированного подхода характеризовать эффективность процессов ТОР.

На различных этапах КА прирост целевого эффекта на каждом интервале времени Δt_j достигается по-своему, в зависимости от характера выполняемых

задач (фотографирование, видеосъемка, обеспечение связи, зондирование Земли и т.д.). В большинстве случаев целевой эффект, достигаемый КА, может характеризоваться количеством выполненных задач (сеансов связи, наблюдений, съемок) $N_{зад}^{TOP}$. При применении системы TOP КА число выполненных задач $N_{зад}^{TOP}$ будет больше, чем без нее $N_{зад}^{TOP} > N_{зад}$. Тогда показатель эффективности TOP можно представить соотношениями

$$П_{эфф}^{TOPКА} = \frac{N_{зад}}{N_{зад}^{TOP}}, \quad (6)$$

или

$$П_{эфф}^{TOPКА} = \frac{N_{зад}^{TOP} - N_{зад}}{N_{зад}^{TOPКА}}. \quad (7)$$

Предлагаемый показатель является безразмерной величиной и всегда находится в пределах $0 \div 1$, что позволяет сравнивать различные системы TOP.

Схемы набора целевых эффектов КА при выполнении TOP

Полезный (целевой) эффект $W(t)$, достигаемый КА в течение времени его активного функционирования T_n , представляет сумму частных полезных эффектов $\Delta W^J(\Delta t_J)$, получаемых последовательно на каждом интервале полета Δt_J

$$W(T_n) = \sum_{J=1}^n \Delta W^J(\Delta t_J). \quad (8)$$

Если число интервалов Δt_J достаточно велико ($J \rightarrow \infty$), можно записать, что $W(T_n) = \int_0^{T_n} W(t) dt$.

При идеальном функционировании КА может быть достигнут максимально возможный целевой эффект

$$W_{\max}(T_n) = \sum_{J=1}^n \Delta W_{\max}^J. \quad (9)$$

Однако при возникновении НшС фактический целевой эффект $W_{факт}(T_n) < W_{\max}(T_n)$.

Для большинства КА можно принять, что целевые задачи равномерно распределены по длительности полета и равнозначны. Тогда, выражая полезный эффект $W(T_n)$ в относительных единицах, можно записать

$$W(T_n) = \frac{1}{T_n} \sum_{J=1}^{n_J} \sum_{i=1}^{n_{iJ}} \tau_{i_{ц.з.}}, \quad (10)$$

где n_J – число интервалов Δt_J на всем участке полета $[O, T_n)$,

n_{iJ} – число целевых задач на интервале Δt_J ,

$\tau_{i_{ц.з.}}$ – время на выполнение i -й целевой задачи.

На рис. 2 (1) представлена линейная модель, характерная для случаев, когда выполнение целевой задачи и получение результатов начинаются с момента t_0 , без проведения подготовительных операций.

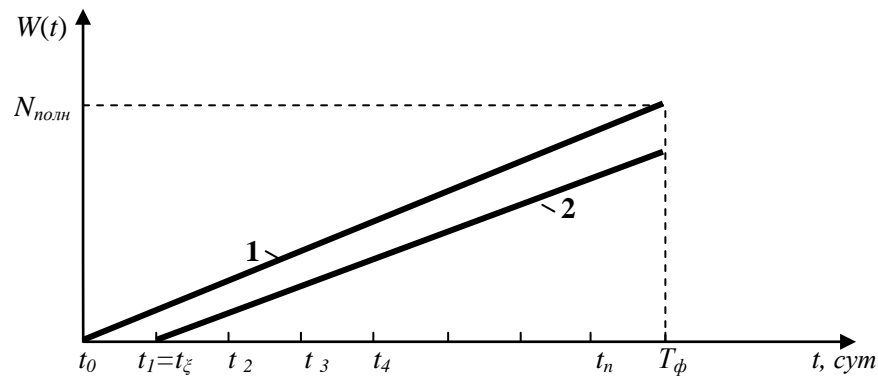


Рис. 2. Линейные схемы набора целевого эффекта

Полный целевой эффект $W(t = T_n) = W_{полн} = \sum_{J=1}^n W_J$ или, выразив через скорость набора целевого эффекта $k = \frac{dW(t)}{dt}$, запишем $W(t) = kt$,

где t – текущее время.

Однако заметим, что временем подготовительных операций не всегда можно пренебречь. Если целевое функционирование КА начинается в момент t_ξ , как показано на рис. 2 (2), то линейная модель, рассмотренная выше, как бы смещается вправо по оси t на $\Delta(t) = t_\xi$. Величина интервала $[t_0, t_\xi)$ определяется конструктивно-технологическими особенностями оборудования и рядом других факторов.

В обеих рассмотренных схемах (моделях) набор целевого эффекта происходит непрерывно и результаты ранее выполненной работы полностью сохраняются.

В общем случае, $\frac{dW^N(t_l)}{dt} \neq \frac{dW^N(t_k)}{dt}$, где l, k – номера этапов полета КА.

Возможно, что на каком-либо этапе (или на нескольких) $\frac{dW^N(t_n)}{dt} = 0$, тогда прироста полезного эффекта не происходит, а лишь сохраняется достигнутый (например, при отказе КА).

На участке $t_0 - t_1$ КА приводится в режим готовности. В момент t_1 начинается его штатное функционирование, которое сопровождается набором целевого

эффекта до момента t_2 . В момент t_2 происходит отказ КА и набор целевого эффекта прекращается ($\frac{dW(t)}{dt} = 0$). Если ремонт КА не будет выполнен, его суммарный целевой эффект не будет превышать $W(t_2)$. Тогда, начиная с момента t_2 , итоговая схема набора целевого эффекта будет определяться кривой 2.

Если за время $\Delta\tau_2 = t_3 - t_2$ будет подготовлена ремонтная операция, а за время $\Delta\tau_3 = t_4 - t_3$ она будет осуществлена, то по окончании ремонта (с момента t_4) набор целевого эффекта КА будет определяться кривой 1. В результате ТОР будет получен целевой эффект $W_{полн}$, превышающий $W(t_2)$.

Момент t_4 на оси времен функционирования КА является точкой регенерации процесса $\frac{dW(t)}{dt}$. В общем случае, при длительном функционировании КА таких точек может быть несколько.

На практике возможны такие схемы полета, когда целевой эффект возрастает скачком, что бывает, как правило, в момент завершения ремонтно-восстановительной операции (кривая 1 на рис. 3).

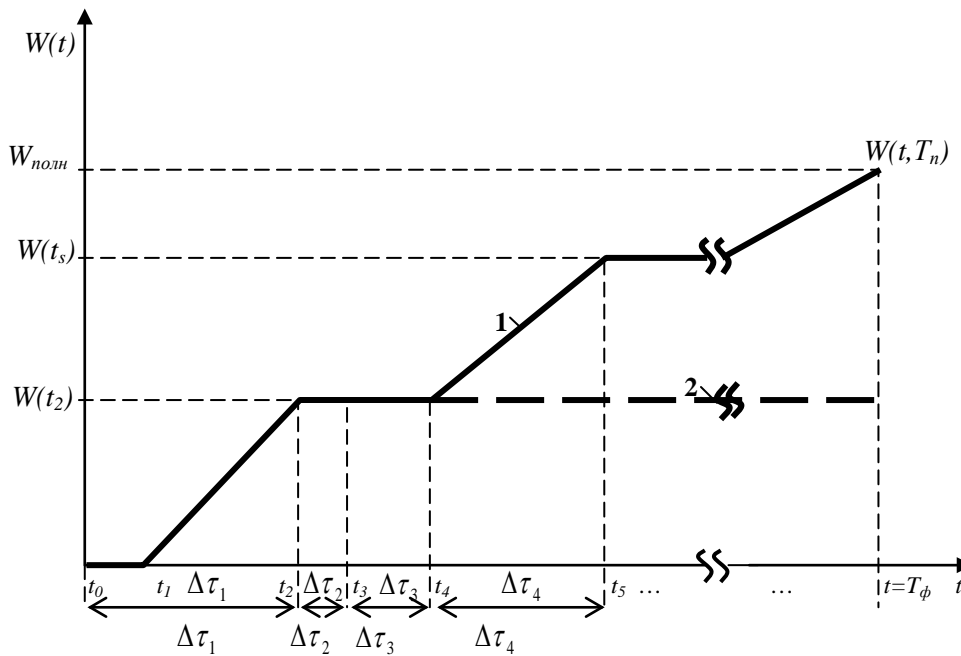


Рис. 3. Схема набора целевого эффекта КА при проведении ТОР:

$\Delta\tau_1$ – период нормального доремонтного функционирования КА;

$\Delta\tau_2$ – период ожидания ТОР; $\Delta\tau_3$ – период ТОР КА;

$\Delta\tau_4$ – период нормального послеремонтного функционирования КА

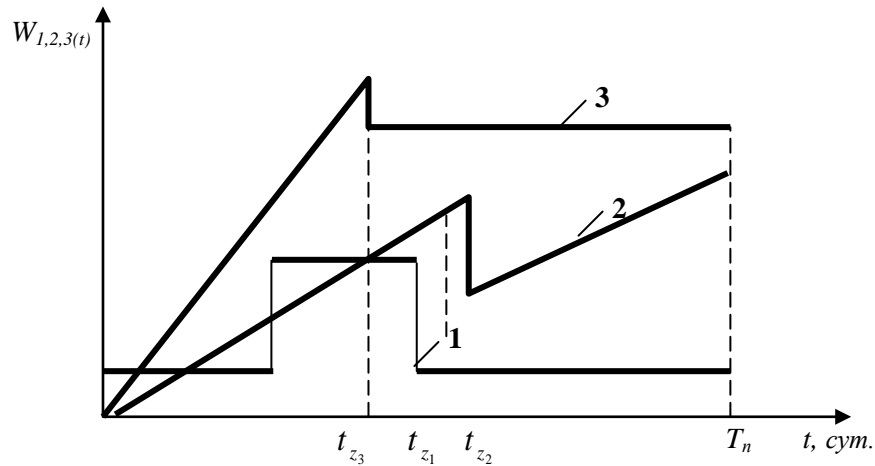


Рис. 4. Варианты скачкообразного изменения целевого эффекта

Если на интервале $[O, T_n)$ имеется всего один скачок, то $W_k(T)$ есть не что иное, как селектор луча

$$\Delta(t - t_{у.з.}^k) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{у.з.}^k \\ W_k(t) & \text{при } t \geq t_{у.з.}^k \end{cases}$$

Если таких скачков несколько, то $W_k(T)$ есть последовательность кусочно-постоянных функций

$$W_k(t) = W_k(t; n) = \sum_{i=0}^{n-1} W_k(t_{у.з.}^i) \prod(t; t_{у.з.}^j; t_{у.з.}^{j+1}), \quad (11)$$

$$\text{где } \prod(t; t_{у.з.}^j; t_{у.з.}^{j+1}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{у.з.}^j \\ 1 & \text{при } t_{у.з.}^j \leq t \leq t_{у.з.}^{j+1} \end{cases}$$

есть единичный прямоугольный импульс на интервале $[t_{у.з.}^j; t_{у.з.}^{j+1})$.

При возникновении аварийных ситуаций на КА может наступить полная или частичная потеря результатов космического полета. Для описания $W_{2,3}(t)$ в таких ситуациях используются те же зависимости, что и ранее. Потери целевого эффекта происходят в моменты $t_j = t_{z2}$ или $t_j = t_{z3}$, причем $t_j < T_n$.

В ряде случаев изменение целевого эффекта может быть описано непрерывной функцией типа «логистической кривой» (рис. 5). Ее уравнение имеет вид:

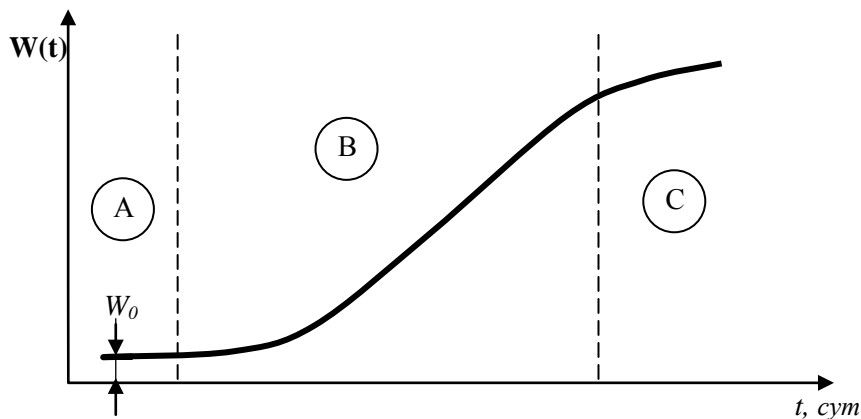


Рис. 5. Непрерывная функция набора целевого эффекта

$$W(t) = \frac{aW_0}{bW_0 + (a - bW_0)e^{-at}},$$

где W_0 – начальный эффект, a , b – параметры.

При достижении заданной производительности полезный эффект возрастает с постоянной скоростью (зона В). Этап полета С соответствует постепенному отключению целевой аппаратуры КА и переводу ее в режим хранения.

На многоцелевых КА полезный эффект может достигаться параллельным, последовательным или параллельно-последовательным решением нескольких целевых задач. В общем случае, если таких процессов n , то результирующий эффект будет выражаться n -мерным вектором $W_{(n)} = \langle W_1, W_2, \dots, W_n \rangle$. Если эти процессы независимы, то

$$W(t) = \sum_{k=1}^n W_k(t).$$

Структура имитационной математической модели ТОР КА

Аналитические методы позволяют находить решения задач, сводящихся в основном к простым ситуациям. В то же самое время глубокие теоретические проработки в области прикладных вопросов имитационного моделирования, а также наличие фактических данных, отражающих в совокупности основные закономерности процессов ТОР, сделали реальным решение задачи создания такой модели. Имитируя с помощью ЭВМ функционирование КА в космическом полете любой продолжительности, взаимодействие экипажа с ними и условия обслуживания систем, можно определить статистические оценки искомых показателей.

Возможности имитационного математического моделирования для исследования процессов ТОР КА можно наглядно продемонстрировать на примере ТОР ОКС.

Структурная схема имитационной математической модели (ИММ) (рис. 6) создавалась с учетом структуры ТОР, характера внешних и внутренних функциональных связей в системе «экипаж–ОКС», а также необходимости оценивания эффективности процессов ТОР по замкнутой схеме, т.е. с учетом достижения цели ОКС. Векторы $A_{<n>}^{ЭТХ}$, $A_{<k>}^{ЭК}$, $B_{<p>}^{УСЛ}$ позволяют учесть структурные особенности бортовых систем, циклограммы их функционирования, показатели надежности и ресурсные характеристики оборудования, а также условия обслуживания и квалификацию экипажа.

При разработке ИММ использован вероятностно-статистический подход и применен математический аппарат, включающий методы статистической обработки данных, метод статистического моделирования, методы теории эффективности и теории стохастической индикации.

ИММ решает следующие основные задачи:

- моделирование циклограмм полета орбитального комплекса, функционирования бортовых систем ОКС и выполнения экипажем целевых задач полета;
- воспроизведение всех потоков заявок на ТОР бортовых систем ОКС;
- воспроизведение условий работы экипажа в космическом полете, определение трудозатрат на каждую операцию ТОР, оценивание показателей эксплуатационной технологичности бортовых систем ОКС и эффективности процесса ТОР.

Для решения каждой из указанных задач в ИММ ТОР предусмотрен соответствующий блок: блок циклограмм функционирования (БЦФ), блок формирования заявок на обслуживание (БФЗО), блок определения времен и показателей ТОР (БОВП). Кроме того, в состав ИММ ТОР включен блок ввода параметров и начальных условий (БВПНУ). С целью обеспечения соответствия ИММ ТОР реальным физическим процессам, происходящим в системе «экипаж–ОКС», наглядности модели и расширения возможностей по ее использованию как в целом, так и в виде отдельных фрагментов, принята модульная структура основных блоков.

Модуль МЦП формирует циклограмму полета орбитального космического комплекса, базовым элементом которого является ОКС, а дополнительными – различные типы транспортных средств, обеспечивающих доставку на ОКС ЗИПа. Входные параметры МЦП задаются, исходя из знания статистических закономерностей функционирования орбитального комплекса – вектора $P_{i<n>}$ вероятностей соответствующих функций распределения случайных величин длительностей промежутков времени $\Delta \hat{t}_h$ и $\Delta \hat{t}_\pi$ между посещениями ОКС транспортными кораблями с экипажем и транспортными грузовыми кораблями соответственно, длительностей $\hat{\tau}_h$ и $\hat{\tau}_\pi$ пребывания указанных транспортных кораблей в состыкованном состоянии с ОКС, числа единиц ЗИПа $\hat{N}_{ЗИП}$, представляемых в дискретной или непрерывной форме. Перед началом моделирования в БВПНУ должны быть введены данные о длительности полета ОКС – T_ϕ . Для формирования каких-либо конкретных циклограмм в соответствующие модули могут вводиться не характеристики случайных величин, а детерминированные значения моментов начала и окончания функционирования каких-либо элементов циклограмм, т.е.

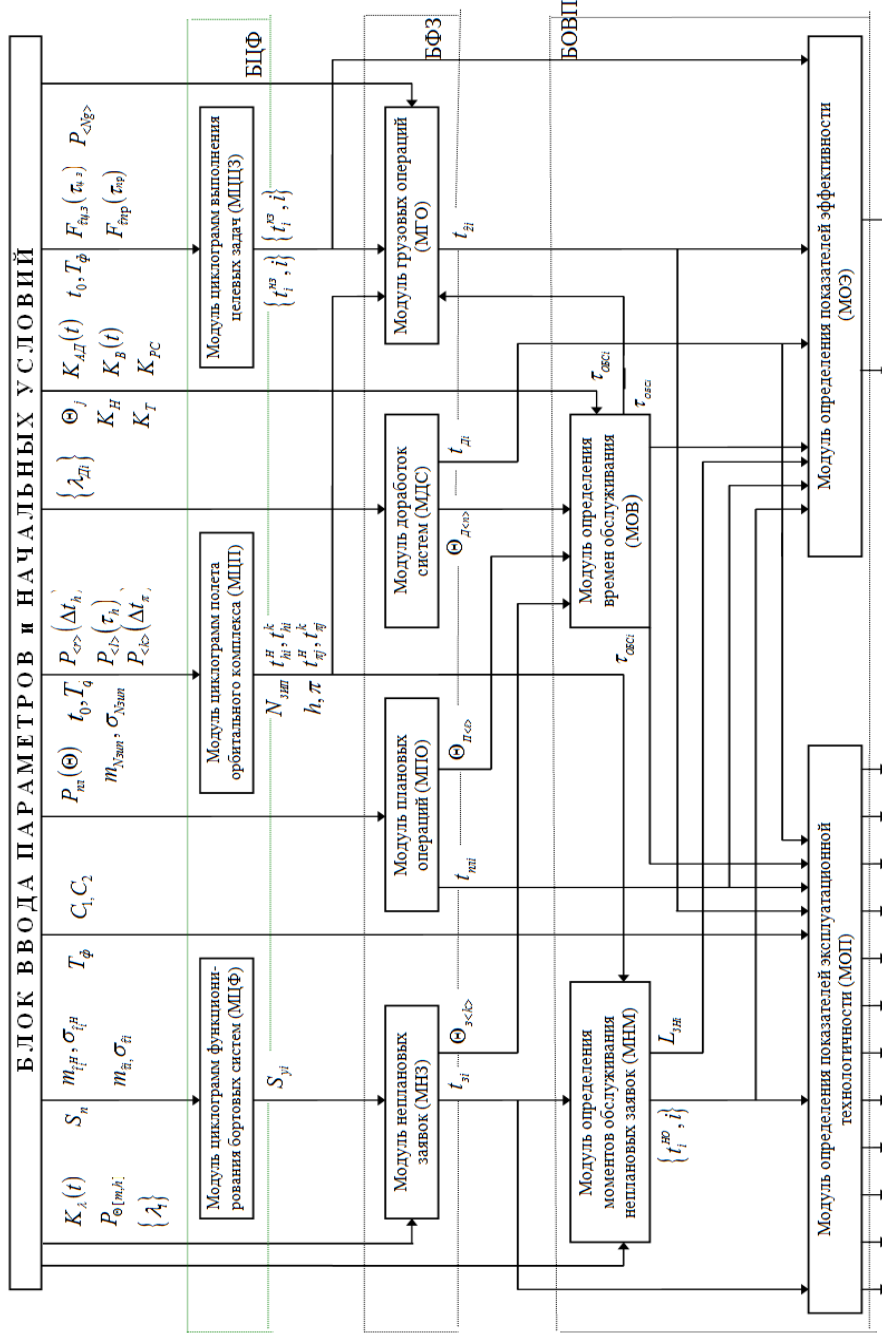


Рис. 6. Структурная схема имитационной математической модели ТОР ОКС

массивы $\{t_b^H, \pi, i\}, \{t_b^k, \pi, i\}$. Однако при решении задачи в ее общей постановке стохастический характер этих параметров в большей степени отвечает реальным условиям космического полета. Выходными параметрами модуля являются времена, определяющие моменты начала $t_{hi}^H(t_{\pi j}^H)$ и окончания $t_{hi}^k(t_{\pi j}^k)$ пребывания соответствующих транспортных кораблей в состыкованном состоянии с ОКС. Кроме того, на основе известных вероятностных характеристик количества единиц ЗИПа, доставляемого на ОКС тем или иным транспортным кораблем, определяется значение $N_{ЗИП}$.

Модуль циклограмм функционирования бортовых систем (МЦФ) функционирует в основном аналогично МЦП. Для обеспечения работы этого модуля из БВПНУ в него вводятся данные о количестве систем S_n и характеристиках распределения времени работы каждой из систем на всем интервале полета ОКС. Выходным параметром модуля циклограмм функционирования бортовых систем ОКС является признак S_y , указывающий в любой момент времени t функционирует ($S_y = 1$) или нет ($S_y = 0$) данная система.

Задача модуля МЦЦЗ – сформировать циклограмму выполнения целевых задач полета экипажем ОКС. Участки циклограммы деятельности, соответствующие выполнению космонавтами целевых задач, формируются с помощью функции распределения $F_{\hat{t}_{u.3}}(\hat{t}_{u.3})$, а промежутки между ними – с помощью функции распределения $F_{\tau_{np}}(\tau_{np})$. Выходом МЦЦЗ является массив $\{t_i^{H3}, i\}$ значений моментов начала выполнения каждой целевой задачи и массив $\{t_i^{K3}, i\}$ значений моментов их окончания.

Четыре следующих модуля: МНЗ, МПО, МДС и МГО – генерируют заявки на ТОР бортовых систем ОКС.

Модуль неплановых заявок (МНЗ) формирует моменты появления НшС в различных системах с учетом значений признаков S_y , вероятностей появления отказов в каждой из систем и нестационарности потока НшС. Для обеспечения работы модуля в него должны быть введены из БВПНУ значения вектора интенсивностей λ_i НшС для всех систем, коэффициента $k_\lambda(t)$ учета динамики интенсивностей неисправностей и отказов в процессе полета ОКС. Кроме того, МНЗ решает задачу определения способа Θ_j устранения экипажем НшС в данной системе ОКС. Базовые данные для этого в виде матрицы $P_{\Theta[m.n]} = \left\| P_{\Theta_j S_i} \right\|_m^n$ вероятностей вводятся в МНЗ из БВПНУ. Выходными параметрами модуля являются: времена t_{zi} появления НшС и вектор $\Theta_{z\langle k \rangle}$, характеризующий способ обслуживания неплановой заявки.

Модуль плановых операций (МПО) позволяет определить моменты $t_{nлi}$ проведения экипажем ОКС текущего обслуживания бортовых систем на основе

знания функций распределения $F_{inl}(t_{nl})$. Способ проведения текущего обслуживания Θ_j формируется либо с помощью матрицы вероятностей размерности $m \times n$, либо с помощью однострочковой матрицы вероятностей

$$P_{\Theta(n)} = \|P_{ij}\|_n^1 = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} = [P_1, P_2, \dots, P_n]^T.$$

Выходами модуля МПО являются конкретные значения моментов t_{nli} в виде полетного времени и вектор $\Theta_{n(l)}$, характеризующий способ текущего обслуживания.

Модуль доработок систем (МДС) функционирует так же, как и МПО, но используя соответствующее непрерывное распределение $F_{дл}(\tau_{дл})$ времени $\hat{t}_{дл}$ между доработками систем в ходе полета.

Модуль грузовых операций (МГО) определяет моменты и продолжительность работ экипажа с доставляемым ЗИПом бортовых систем, а также с оборудованием, выработавшим ресурс или отказавшим и, вследствие этого, удаляемым из ОКС. Для работы модуля необходимы данные из МЦП: моменты времен $\{t_{hi}^H\}$, $\{t_{hi}^K\}$, $\{t_{pi}^H\}$, $\{t_{pi}^K\}$, значения $N_{ЗИП}$, признак соответствующего транспортного корабля h или π , а также информация из МЦЦЗ о моментах начала $\{t_i^{H3}\}$ и конца $\{t_i^{K3}\}$ выполнения целевых задач. Кроме того, из БВПНУ в МГО должен быть введен вектор $P_{(Ng)} = [P_1(K_{ng} = 0), P_2(K_{ng} = 1), \dots, P_{Ng}(K_{ng} = K_{ng}^{\max})]$, описывающий вероятности выполнения монтажно-демонтажных операций в количестве K_{ng} по схеме ОКС–транспортный корабль в данные сутки полета. На выход модуля выводятся данные о моментах проведения монтажно-демонтажных работ с ЗИПом $t_{яi}$.

Для определения продолжительности операций ТОР с учетом типов выполняемых работ, выявления влияния воздействия внешних и внутренних факторов на обслуживание заявок, а также учета квалификации экипажа, в состав ИММ ТОР введен модуль определения времен обслуживания (МОВ). Из БВПНУ в МОВ вводятся данные, характеризующие закон распределения времени обслуживания для каждого способа ТОР Θ_j , и информация об условиях выполнения ТОР в каждый момент времени t , т.е. значения коэффициентов: $K_{Ад}(t)$ – учета адаптации экипажа к объекту (ПКА), $K_{В}(t)$ – учета влияния вестибулярных расстройств, $K_{РС}$ – учета влияния среды обитания, $K_{Н}$ – учета влияния невесомости на время выполнения ТОР. Для каждого экипажа в соответствии с уровнем его подготовленности задаются в качестве начальных условий вероятностные характеристики коэффициента подготовленности (тренированности) K_T . Выходными данными МОВ являются значения фактических трудозатрат экипажа на каждую операцию ТОР $\tau_{обci}$.

Моменты обслуживания неплановых заявок t_i^{HO} , как правило, не совпадают с моментами НшС t_{zi} . Исходя из условий безопасности космического полета и степени влияния НшС на выполнение его программы, времена t_i^{HO} выбираются с учетом значимости L_{zn} каждой i -й заявки. Формирование моментов t_i^{HO} происходит в модуле определения моментов обслуживания неплановых заявок (МНМ) на основе данных t_{zi} , получаемых в МНЗ, и известных функций распределения значимости $F_{L_{zn}}(L_{zn})$ НшС и резервного времени экипажа $F_{\tau_p}(\tau_p)$, с учетом информации из МЦП о временах доставки ЗИПа. Выходом МНМ является массив чисел $\{t_i^{HO}, i\}$.

В модуле определения показателей эксплуатационной технологичности (МОП) производится вычисление соответствующих показателей. На вход модуля поступают данные о моментах выполнения и продолжительности ТОР всех заявок, появляющихся в ходе имитации полета ОКС. Из БВПНУ вводится исходная информация о заданной длительности полета T_{ϕ} , численности основного экипажа $n_{оз}$ и экипажа посещения $n_{эп}$, а также значения стоимости одного часа полета C_1 , стоимости доставки на борт ОКС одного килограмма ЗИПа, C_2 массы доставляемого ЗИПа m .

Для обеспечения вычисления показателей эффективности ТОР предназначен модуль определения показателей эффективности (МОЭ). В него из блока БВПНУ вводятся допустимое значение потери целевого эффекта за полет ξ или расчетная величина достигаемого целевого эффекта $E_{расч}$, а также принятое значение гарантируемой вероятности достижения цели ОКС γ . Массивы значений $\{t_i^{HO}\}$, $\{L_{zni}\}$, $\{t_{nli}\}$, $\{t_{di}\}$, $\{t_{zi}\}$, $\{\tau_{обси}\}$ поступают на вход МОЭ соответственно из модулей МНМ, МПО, МТС, МГО, МОВ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1, МО СССР, 1989. – 660 с.
- [2] Крючков Б.И. Техническое обслуживание и ремонт в космосе. ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», ч.1, 2010. – 257 с.
- [4] Бэкон Д. Можно ли использовать МКС как ангар для ремонта искусственных спутников // В мире науки. – 2008. – № 1.
- [5] Александров А.П., Гречка В.Д., Кобрин В.Н., Цыганков О.С. Сборочно-монтажные и ремонтно-восстановительные работы в космическом пространстве. – Харьков: ХАИ, 1990. – 248 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ОТВОДА ТЕПЛА ИЗ СКАФАНДРА ПРИ ТРЕНИРОВКАХ КОСМОНАВТОВ В ГИДРОЛАБОРАТОРИИ

Е.Ю. Иродов, П.П. Долгов, И.В. Галкина

Канд. техн. наук Е.Ю. Иродов; канд. техн. наук П.П. Долгов; И.В. Галкина (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматривается возможность повышения точности результатов расчета тепла, отводимого из скафандра при тренировках космонавтов в гидролаборатории. Приводятся методика и результаты экспериментально-теоретического исследования потоков тепла, отводимого из скафандра водой костюма водяного охлаждения, потоком вентилирующего воздуха и потоотделением. Показана возможность повышения точности расчета тепла, отводимого из скафандра, за счет учета дополнительных каналов теплосъема.

Ключевые слова: скафандр, расчет отвода тепла, тренировка в гидролаборатории.

Study of the Possibility of Improving Accuracy of Calculation of Heat Removal From the Pressure Suit During Training in Hydrolab.

Ye.Yu. Irodov, P.P. Dolgov, I.V. Galkina

The paper considers the possibility of improving accuracy of calculation of heat removal from the pressure suit during training in Hydrolab. Methods and results of experimental-theoretical study of heat flows removed from the pressure suit via water cooling garment, air flow, and body perspiration are showed here. Besides, the possibility of improving accuracy of calculation of heat removed from the pressure suit at the expense of the additional heat pickup paths is discussed in the paper.

Key words: pressure suit, calculation of heat removal, training in Hydrolab.

Работа космонавта под водой в скафандре (СК) на тренировках в гидролаборатории (ГЛ) при подготовке к внекорабельной деятельности (ВКД) связана с большими энергозатратами и соответствующим выделением тепла организмом. Сохранение теплового баланса тела космонавта обеспечивается принудительной вентиляцией подскафандрового пространства воздухом и охлаждением тела при помощи костюма водяного охлаждения (КВО). Воздух для вентиляции и вода для охлаждения подаются в СК от стационарной системы вентиляции и охлаждения спецснаряжения (ССВОС). При проведении тренировок космонавтов в ГЛ для контроля и регистрации физиологических показателей и технических параметров используются телеметрические комплексы.

Для оперативного контроля соответствия величины отвода тепла из подскафандрового пространства величине тепла, выделенного организмом космонавта, в настоящее время используются расчетные значения энергозатрат космонавта и количества тепла, отведенного из СК. Анализ алгоритмов расчета этих параметров показал, что при определении количества тепла, отводимого из СК, не учитывается тепло, отводимое вентилирующим воздухом и испарением пота (потоотделением). Представляется целесообразным рассмотреть возможность регистрации этих составляющих теплового баланса и оценить величину данных составляющих.

С целью определения возможности дополнительной регистрации тепловых потоков в канале вентилирующего воздуха, обусловленных изменением температуры и влажности воздуха, проведены экспериментально-теоретические исследования по оценке количества тепла, отводимого водой, вентилирующим воздухом

и потоотделением. В процессе исследований использовались данные, полученные при экспериментальных исследованиях тепловых режимов в СК [1], а также экспериментальные данные, полученные при выполнении операторами типовых операций ВКД в ГЛ.

Оценка количества тепла, отводимого из СК, производилась по следующей методике:

1. В ходе экспериментальных и плановых погружений космонавтов в скафандре в течение всего времени тренировки регистрировались значения температур воздуха и воды на входе и выходе скафандра, значения влажности воздуха, мгновенные значения расходов воды и воздуха.

2. По результатам проведенных экспериментов формировались массивы значений температуры воды и воздуха на выходе и входе СК, относительной влажности воздуха на выходе и входе СК, а также объемного расхода воздуха через СК и воды через КВО, регистрируемые каждые 20 секунд.

3. На каждом интервале вычислялась:

- разница температур воздуха на входе и выходе СК, массовый расход воздуха и соответствующее «мгновенное» значение отведенного тепла воздухом;
- разница температур воды на входе и выходе из КВО, массовый расход воды и соответствующее «мгновенное» значение отведенного тепла воздухом;
- парциальное давление насыщенного водяного пара и абсолютная влажность воздуха на входе и выходе СК, разница абсолютной влажности воздуха на входе и выходе СК, количество испарившейся влаги (пота) и соответствующее «мгновенное» значение тепла отведенного испарением пота.

4. Проводился расчет количества тепла, отведенного из СК воздухом, водой и потоотделением в течение заданного отрезка времени путем суммирования соответствующих «мгновенных» значений.

Вычисление «мгновенных» значений массового расхода воздуха $G_{вз,м}$ производилось по формуле:

$$G_{вз,м} = G_{вз,о} \cdot \rho_{вз}, \quad (1)$$

где: $G_{вз,о}$ – измеренное значение объемного расхода воздуха, $м^3/мин$;
 $\rho_{вз}$ – плотность воздуха, $кг/м^3$.

Вычисление количества тепла, отводимого из СК вентилирующим воздухом $Q_{вз}$ производилось по формуле [2]:

$$Q_{вз} = G_{вз,м} \cdot c_{р,вз} (T_{вз,вых} - T_{вз,вх}), \quad (2)$$

где: $G_{вз,м}$ – массовый расход воздуха, $м^3/мин$;

$c_{р,вз}$ – удельная массовая теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $ккал/кг \cdot ^\circ C$;

$T_{вз,вых}, T_{вз,вх}$ – температура воздуха на выходе и входе СК, $^\circ C$.

При расчетах принято значение плотности воздуха равное $1,2041 кг/м^3$, что соответствует плотности воздуха при стандартных условиях – давлении $101\,325 Па$ и температуре $293,16\,^\circ K$ ($+20\,^\circ C$), удельная массовая теплоемкость воздуха принята равной $0,2402 ккал/кг \cdot ^\circ C$ [3];

Вычисление «мгновенных» значений массового расхода воды $G_{вд,м}$ производилось по формуле:

$$G_{\text{вд,м}} = G_{\text{вд,о}} \cdot \rho_{\text{вд}}, \quad (3)$$

где: $G_{\text{вд,о}}$ – измеренное значение объемного расхода воды, $\text{м}^3/\text{мин}$;
 $\rho_{\text{вд}}$ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Вычисление количества тепла $Q_{\text{вз}}$, отводимого из СК водой КВО, производилось по формуле [2]:

$$Q_{\text{вд}} = G_{\text{вд,м}} \cdot c_{\text{р,вд}} (T_{\text{вд,вых}} - T_{\text{вд,вх}}), \quad (4)$$

где: $G_{\text{вд,м}}$ – массовый расход воды, $\text{м}^3/\text{мин}$;
 $c_{\text{р,вд}}$ – удельная массовая теплоемкость воды, $\text{ккал}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$;
 $T_{\text{вд,вых}}, T_{\text{вд,вх}}$ – температура воды на выходе и входе КВО, $^\circ\text{C}$.

Значение плотности воды принималось равным $994,04 \text{ кг}/\text{м}^3$, соответствующим средней плотности воды в диапазоне температур от 0 до $50 \text{ }^\circ\text{C}$, а удельная массовая теплоемкость воды – равной $0,999 \text{ ккал}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ [4].

Вычисление «мгновенных» значений парциального давления насыщенного водяного пара P производилось по формуле [4]:

$$\ln P = -6094,4692 \cdot T_{\text{вз}}^{-1} + 21,1249952 - 0,02724552 \cdot T_{\text{вз}} + 0,000016853396 \cdot T_{\text{вз}}^2 + 2,4575506 \cdot \ln T_{\text{вз}} \quad (5)$$

где: $T_{\text{вз}}$ – температура воздуха на выходе и входе СК, $^\circ\text{C}$.

Вычисление абсолютной влажности воздуха $A_{\text{вз}}$ производилось по формуле [5]:

$$A_{\text{вз}} = 216,79 \cdot \varphi \cdot P / (10000(T + 273,16)), \quad (6)$$

где: P – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре T , Па ;
 φ – относительная влажность воздуха, %.

Вычисление «мгновенных» значений количества испарившейся влаги (пота) $M_{\text{пт}}$ производилось по формуле:

$$M_{\text{пт}} = G_{\text{вз,о}} (A_{\text{вз,вых}} - A_{\text{вз,вх}}), \quad (7)$$

где: $A_{\text{вз,вых}}$ и $A_{\text{вз,вх}}$ – абсолютная влажность воздуха на выходе и входе СК, $\text{г}/\text{м}^3$.

Как известно [6], на испарение 1 г воды у человека затрачивается $0,58 \text{ ккал}$ тепловой энергии. Таким образом, вычисление количества тепла $Q_{\text{пт}}$, отводимого испарением пота, производилось по формуле:

$$Q_{\text{пт}} = 0,58 \cdot M_{\text{пт}}, \quad (8)$$

где: $M_{\text{пт}}$ – «мгновенное» значение количества испарившейся влаги (пота), г.

Вычисление тепла, отводимого воздухом, водой и потоотделением за время тренировки (накопленные значения), производится путем суммирования соответствующих «мгновенных» значений, вычисленных на интервале, равном времени дискретности регистрации измеряемых параметров:

$$Q_{\text{сумм}} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta t, \quad (9)$$

где: Q_i – «мгновенное» значение количества тепла, отводимого воздухом, водой или потоотделением, *ккал/мин*;

Δt – дискретность времени регистрации измеряемых параметров, *с*;

n – количество интервалов суммирования ($n = \frac{t}{\Delta t \cdot 60}$);

t – продолжительность тренировки космонавта в СК, *мин*.

Результаты проведенных измерений и расчетов по одному из экспериментов, представлены ниже на рис. 1–4 в виде графиков и гистограмм. В ходе проведения этого эксперимента оператор выполнял типовые операции ВКД на макетах модулей российского сегмента МКС.

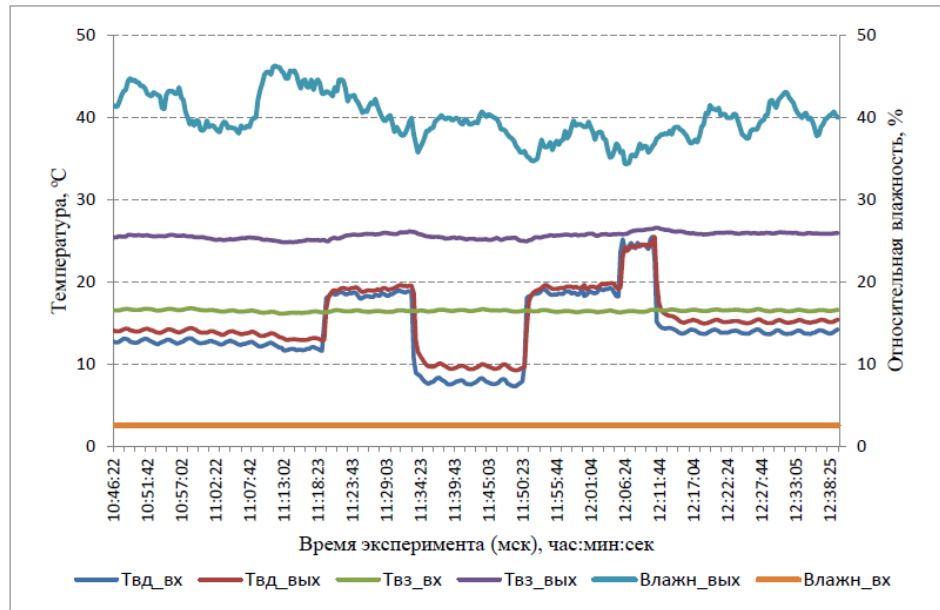


Рис. 1. Измеренные значения температур воды и воздуха, относительной влажности воздуха на входе и выходе СК

На рис. 1 показано изменение значений температур воды и воздуха, относительной влажности воздуха на входе и выходе СК. Температура воды на входе и выходе КВО (Твд_вх, Твд_вых) определяется, главным образом, положением рукоятки крана на СК, регулирующего охлаждение водой. При этом ступенчатое изменение линий температуры воды соответствует моментам перемещения оператором рукоятки этого крана для обеспечения комфортных тепловых условий, соответствующих тяжести выполняемой работы. Волнистое изменение этих линий (в пределах до одного градуса) определяется особенностью устройства автоматического регулирования блоков охлаждения воды в ССВОС. Кроме того, после изменения положения рукоятки крана имеет место переходный процесс, когда измеренная температура воды на входе КВО оказывается больше или равной тем-

пературе воды на выходе, определяемый временем прохождения воды по трубкам КВО и водо-водяного теплообменника СК. Наблюдается достаточно стабильная разность температуры воздуха на входе и выходе из СК ($T_{вз_вх}$, $T_{вз_вых}$). Значение относительной влажности воздуха на выходе из СК определяется интенсивностью работы оператора и соответствующим потоотделением его тела, а на входе в СК является практически постоянной, так как заранее подготовленный воздух поступает из группы баллонов.

На графиках, изображенных на рис. 2, представлены результаты расчета «мгновенных» абсолютных значений отвода тепла водой ($Q_{вд}$), потоотделением ($Q_{пт}$) и воздухом ($Q_{вз}$) по формулам (4), (8) и (2) соответственно.

Из графиков следует, что на режимах, соответствующих температурам воды на входе в КВО $7,5-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (когда температура воды на входе КВО меньше температуры воздуха на входе в СК), отвод тепла водой составлял примерно $3-5\text{ ккал/мин}$, а при подаче воды с температурой, превышающей температуру воздуха на входе в СК, снижался практически ниже 2 ккал/мин . При этом рассчитанные абсолютные значения величин отвода тепла потоотделением и воздухом в процессе данного эксперимента составляли в среднем $0,97$ и $0,72\text{ ккал/мин}$, соответственно.

Для более наглядного представления о вкладе каждой из перечисленных выше составляющих в суммарное количество тепла, отведенного из СК, на рис. 3 представлены результаты расчетов в виде диаграммы нормированных значений. Данная диаграмма демонстрирует возможности повышения точности расчета отвода тепла из СК за счет учета количества тепла, отводимого из скафандра нагревом вентилирующего воздуха и потоотделением. Так, если на участках, соответствующих подаче более холодной воды на вход КВО суммарный вклад в отвод тепла воздухом и потоотделением составлял $15-30\%$, то при повышении температуры воды этот показатель достигал 40% и более.

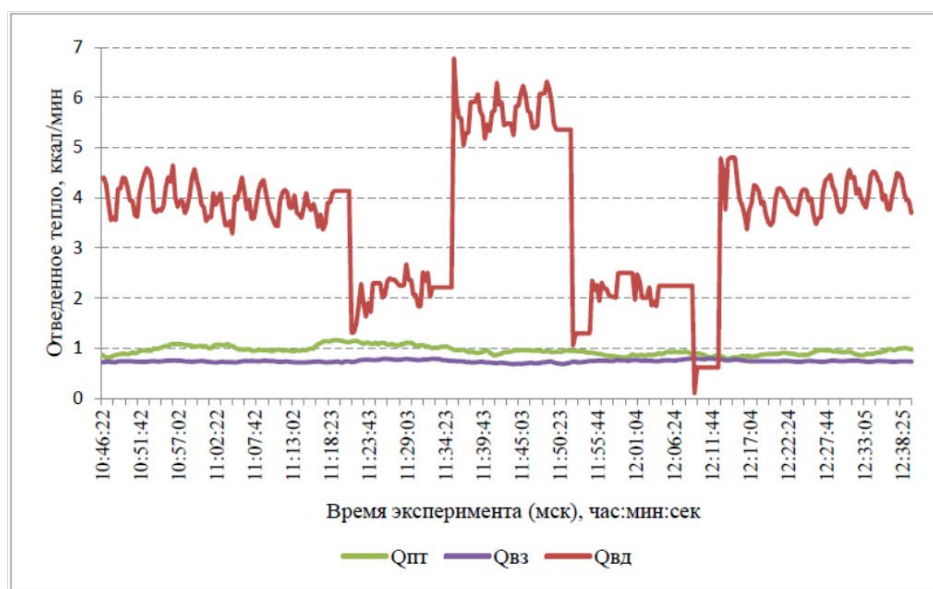


Рис. 2. Результаты расчета «мгновенных» абсолютных значений отвода тепла

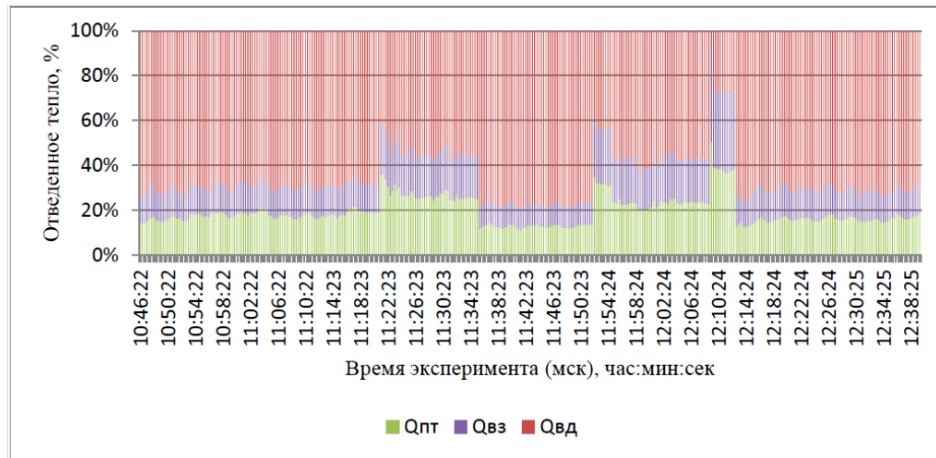


Рис. 3. Результаты расчета «мгновенных» нормированных значений отвода тепла

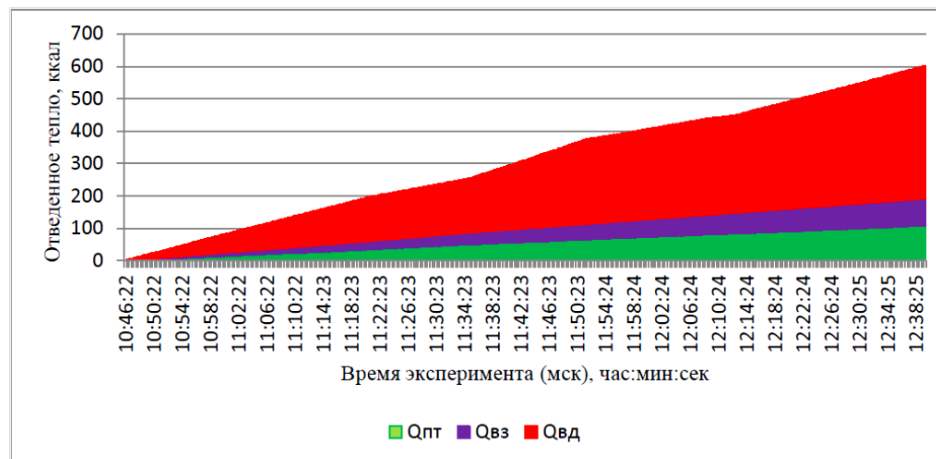


Рис. 4. Результаты расчета накопленных абсолютных значений отвода тепла

Изменение накопленных значений отвода тепла, полученных в результате расчетов по формуле (9), показаны на рис. 4 в виде гистограммы с накоплением.

Из графиков следует, что суммарный отвод тепла из СК водой КВО составляет около 70 %, потоотделением – 18 % и воздухом – 12 %.

Результаты экспериментально-теоретических исследований показывают, что существующие технические средства позволяют регистрировать и рассчитывать тепловые потоки, обусловленные изменением температуры и влажности вентилирующего воздуха. Величина данных потоков в среднем по проведенным экспериментам составляет 15–30 % от общего теплосъема в скафандре, и их неучет в общем тепловом балансе существенно снижает точность регулирования температуры, что приводит к дискомфорту космонавтов при работе в скафандрах.

Результаты исследований позволяют сделать вывод, что учет дополнительных каналов теплосъема через воздух и потоотделение является возможным направлением повышения точности расчета отвода тепла из скафандра.

Реализация разработанных предложений позволит учесть все составляющие тепловых потоков в скафандре, что позволит повысить комфортность работы космонавта и, как результат, приведет к повышению работоспособности космонавтов во время тренировок в гидросреде.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е.Ю. Иродов, И.В. Галкина, О.А. Брель. Результаты экспериментальной оценки температурных режимов в скафандре при проведении тренировок космонавтов в гидросреде. Космический форум 2011, посвященный 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (сборник материалов). – М.: ИМБП РАН, 2011.
- [2] Алексеев С.М., Уманский С.П. Высотные и космические скафандры. – М.: «Машиностроение», 1973.
- [3] Справочное пособие АВОК «Влажный воздух». – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004, НП «АВОК».
- [4] Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980.
- [5] Основные понятия и единицы измерения влажности: Сайт ООО НПК «МИКРОФОР» – 2012 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.microfor.ru/tools/theory/#1> (дата обращения 15.03.2012).
- [6] Физиология человека: Учебник (В двух томах. Т II). В.М. Покровский, Г.Ф. Коротько, Ю.В. Наточин и др. / Под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. – М.: Медицина, 1997.

ЗАМЕНИТ ЛИ РОБОТ КОСМОНАВТА В ОПЕРАЦИЯХ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

О.С. Цыганков, Д.В. Бабайцев

Докт. техн. наук, профессор МАИ, заслуженный конструктор РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники О.С. Цыганков; Д.В. Бабайцев (РКК «Энергия» им. С.П. Королева)

Рассматриваются предпосылки и перспективы интеграции робототехники в операции внекорабельной деятельности, взаимодействие космонавта и робота, техногенный и антропоморфный подходы к роботизации ВКД.

Ключевые слова: внекорабельная деятельность, техническое обслуживание, роботизация, робот-манипулятор, андроид.

Will a Robot Replace a Cosmonaut in Performing EVA Operations?

O.S. Tsygankov, D.B. Babaytsev

The paper discusses prerequisites and prospects of integration of robotics in EVA operations, cosmonaut-robot intercommunication, technogenic and anthropomorphic approaches to using robotic devices in EVA.

Key words: extra vehicular activity, maintenance, robotization, robot manipulator, android.

Внекорабельная деятельность (ВКД) является неотъемлемой составляющей в практике эксплуатации орбитальных станций. Однако достигнутый и установившийся стабильный уровень эффективности ВКД, вполне обеспечивающий решение эксплуатационных задач в настоящее время, включая строительство РС МКС, не будет достаточным для перспективных программ. Непосредственное участие космонавта в техпроцессах ВКД как единственного исполнителя является в то же время определенным ограничением для дальнейшей интенсификации работ.

Факторами, которые могли бы способствовать повышению эффективности ВКД, являются следующие:

- полная автоматизация технологических операций ВКД;
- прорыв в скафандростроении, который приблизил бы функциональные возможности человека в скафандре к возможностям человека в рабочем костюме на Земле;
- качественный скачок в области космической робототехники, приближающий характеристики роботов-манипуляторов к уровню возможностей человека или превосходящий их.

Возможность проявления указанных факторов в среднесрочных программах авторами оценивается следующим образом:

- работы, возникающие как последствия нерасчетных ситуаций, в том числе ремонтно-восстановительные и аварийно-спасательные, **не могут быть автоматизированы** по определению;
- кардинальное повышение эксплуатационных характеристик защитного снаряжения (скафандра) крайне **затруднено** не только технически, но и в силу медико-биологических требований и физических условий среды (например, необходимость избыточного давления в скафандре при установленном составе атмосферы);
- создание робото-манипуляционной системы (РМС) на современном уровне техники, отвечающей требованиям ВКД, представляется **практически осуществимым** [1], [2], [3].

Необходимость качественных изменений труда космонавтов путем интеграции робототехники в ВКД обусловлена не мировым бумом роботизации, а объективными причинами:

- технологическим и моральным устареванием техносферы ВКД;
- прогнозом появления новых задач, которые не могут быть эффективно решены существующими средствами.

Таким образом, создание и применения РМС для ВКД является насущным и реализуемым требованием современного этапа развития космической техники.

Космическая робототехническая система рассматривается как отклик на потребности сборки и летно-технической эксплуатации объектов, как обновленная организационно-технологическая форма деятельности в открытом космосе для замены человека или для сотрудничества с человеком. Такой симбиоз ставит на повестку дня традиционную для системотехники задачу: эффективное распределение функций между человеком и РМС.

Учитывая тождественность и аналогичность целевых и технологических задач космонавта и робота в процессе ВКД, действующих в общем рабочем пространстве, контактирующих с одними и теми же объектами инфраструктуры и конструктивными интерфейсами, целесообразно рассмотреть, как организована и обеспечена работа космонавтов на внешней поверхности геоорбитальной станции, каковы функциональные возможности и способности космонавта в скафандре, которого мы собираемся заменить на РМС, и какое воздействие его деятельность оказывает на конструкцию орбитальной станции.

Что умеет космонавт в открытом космосе?

1. Перемещаться и переносить ограниченные грузы по специально предусмотренным поручням.
2. Закрепляться в определенной точке поверхности с помощью специальных средств фиксации в функционально-продуктивной позе.
3. Развивать и прикладывать к объектам инфраструктуры широкий спектр усилий, отличающихся по величине, направлению, форме траектории и длительности.
4. Выполнять технологические действия в локальной рабочей зоне с использованием адаптированных инструментов и приспособлений.

Состояние микрогравитации оказывает существенное влияние на биомеханику человека, лежащую в основе ручного труда. Влияние уменьшенной до 10^{-6} силы тяжести на деятельность космонавта в первую очередь проявляется в виде феномена безопорного состояния, при котором невозможность выполнения трудовых действий вытекает из законов механики. Значительный объем двигательной деятельности, большое ее значение для работы и жизни экипажа обусловили необходимость принятия специальных мер для ее реализации в космическом полете. Поэтому, наряду с медико-биологическими средствами защиты от вредного влияния микрогравитации, большое внимание уделяется разработке инженерно-технических средств, а именно: совершенствованию компоновки рабочих мест, оснащению их средствами закрепления, т.е. фиксации космонавта в рабочем положении, предотвращающими бесконтрольный дрейф в пространстве или отделение от объекта.

Под фиксацией в условиях микрогравитации понимается искусственное ограничение степеней свободы одного объекта по отношению к другому (базовому) путем наложения связей различной жесткости.

Состояние микрогравитации рассматривается как технологическая среда, а устройства фиксации – в качестве приспособлений и оснастки, тесно связанных с

реализуемым технологическим процессом. Обусловлено это тем обстоятельством, что основной нагрузкой на устройства фиксации и опорные элементы являются реакции на рабочие усилия космонавта и взаимодействие инструмента с предметом труда [4].

В последней четверти XX-го века в космонавтике сформировалась такая модель трудовой среды и образа действий (*modus operandi*), которая, с учетом адаптивного потенциала *Homo sapiens* и блокирования феномена безопорного состояния, обеспечивает двигательную активность космонавта в условиях полета, что особенно существенно для деятельности в открытом космосе.

В результате проектно-конструкторских и экспериментально-исследовательских работ в условиях моделирования микрогравитации было создано механическое устройство для фиксации ботинок скафандра, получившее наименование «Якорь» (1978 г.). Как видно на рис. 1, в устройстве и способе фиксации используется фигурная скоба на опорной площадке, характерный для скафандра надув ботинка и силовые элементы на каблуках. Показана «гибридная» конструкция, пригодная для фиксации как ботинок отечественного скафандра «Орлан», так и американского скафандра EMU [5].



Рис.1

В процессе экспериментальных исследований была выявлена возможность принятия и сохранения испытателем наклонной рабочей позы по отношению к исходной с углами наклона в пределах подвижности голеностопных суставов. Такое решение задачи фиксации позволило расширить рабочую зону до 300% (рис. 2) [5].

Определенность движений человека и соответственное уменьшение числа степеней подвижности в кинематических цепях тела человека достигается распределением усилий в мышцах и связках. Равновесие и устойчивость тела определяется взаимодействием внешних и внутренних сил: все внешние по отношению к человеку силы уравниваются внутренними силами. К внешним силам относятся силы инерции движущихся масс инструментов, частей тела и реакции опор.

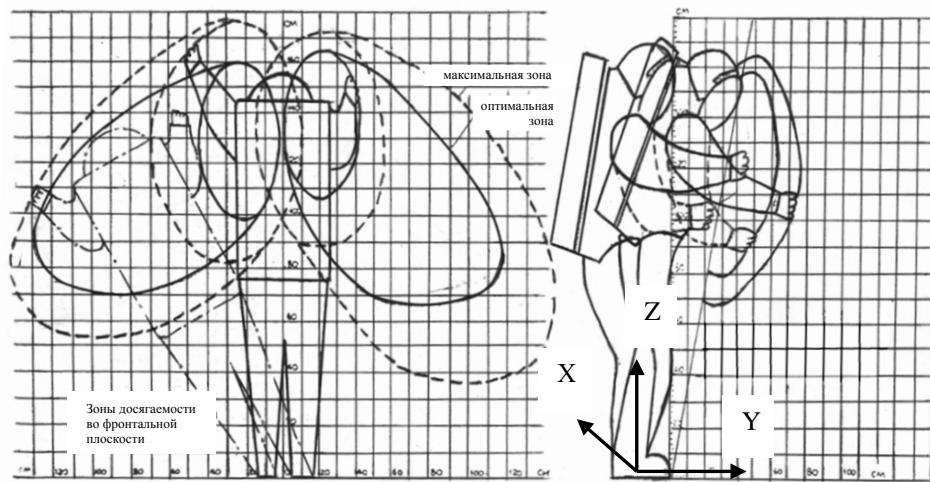


Рис. 2

На специальном стенде в условиях моделирования микротяжести при полете самолета по параболе были экспериментально измерены величины прилагаемых испытаемым усилий и реактивных нагрузок от них на опорные элементы и устройство фиксации ботинок скафандра [6]. Профиль и параметры усилий измерены в доступном для испытаемого диапазоне: тянущие, толкающие, крутящие, длительные, импульсные, одной и двумя руками на трех уровнях от опорной площадки, в различных плоскостях, проведены измерения кистевой динамометрии.

На рис. 3 показана типичная осциллограмма для серии экспериментов. Максимальная величина зафиксирована при выполнении тянущего импульсного – «рывком на себя» усилия в размере 120 кгс. Величина нагрузок на опорные элементы достигала 30 кгс. Такое соотношение указанных величин объясняется амортизационными свойствами опорно-двигательного аппарата человека, а также скафандра, т.е. аэробалок рук и ног, эластичной оболочки, что, в конечном счете, преобразуется в тепловыделение.

Генерируется еще два вида нагрузок, от которых могут возникать колебательные явления для многомодульного комплекса в целом:

- нагрузки до 70 кгс, возникающие при отклонении тела космонавта на максимальный угол и возвращении в исходное положение;
- нагрузки до 90 кгс, обусловленные совпадением во времени деятельности космонавта и работой исполнительных органов системы управления движением.

В каждом случае все силовые факторы могут действовать как одновременно, так и в любой комбинации. Система координат, в которой заданы указанные нагрузки, показана на рис. 2.

В процессе внекорабельной деятельности возможно непреднамеренное столкновение космонавтов с оборудованием. Силовая функция воздействия для этого случая может быть представлена в виде полуволны синусоиды с эксплуатационной амплитудой 50 кгс при длительности от 0,3 до 1,5 с. Сила может прикладываться по любому направлению.

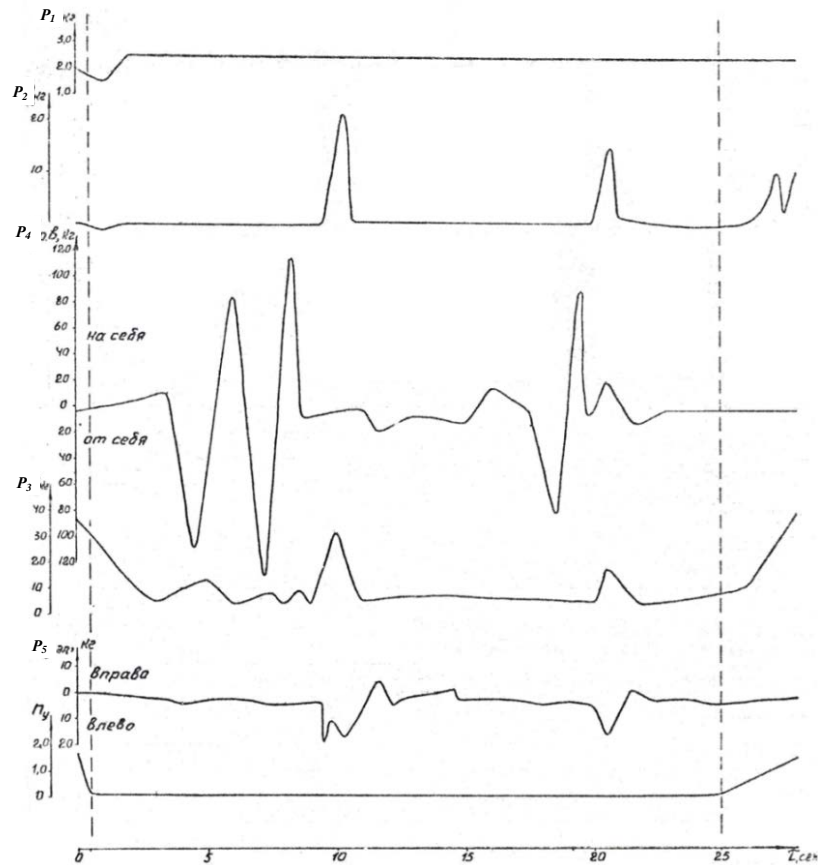


Рис. 3. P_1, P_2, P_3 – реакции; P_4, P_5 – усилия

Количество рабочих органов, которыми человек может действовать, ограничено количеством его естественных инструментов, т.е. количеством частей его организма. Эффекторами в связке «человек–скафандр» являются только руки. Рука человека за счет только крупных суставов обладает 7 степенями подвижности. Число степеней подвижности руки человека в скафандре сокращается из-за ограничений подвижности в шарнирах скафандра (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение степени подвижности в крупных суставах руки без скафандра и в скафандре под избыточным давлением

| Наименование сустава | Число степеней подвижности сустава | |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | без скафандра | в скафандре под давлением |
| Плечевой сустав | 3 | 1 |
| Локтевой сустав | 1 | 1 |
| Лучелоктевой сустав | 1 | 1 |
| Лучезапястный сустав | 2 | 1 |

Как и рука человека, манипулятор – это разомкнутая кинематическая цепь. Известно, что конструктивно обеспечиваемое число степеней подвижности в манипуляторах достигает 7–8. Следовательно, создаваемая РМС должна обеспечить объем движений, необходимый для выполнения ряда операций, реализуемых космонавтом в скафандре.

Выполнение ручных операций, связанных с микродвижениями пальцев, не является простой задачей для космонавта в скафандре под избыточным давлением вследствие ограниченной подвижности в дистальных фалангах и сниженной тактильной чувствительности. Решение задачи достигается конструктивным выполнением контактных элементов, согласуемых с возможностями исполнителя. Такой подход **как метод** утвердился при разработке оборудования для ВКД.

Сборка является наиболее характерным и показательным технологическим процессом в рамках ВКД. Поэтому поведенческие задачи космонавта определялись структурой и сущностью элементов сборочной операции. Каждому переходу как элементу технологической структуры сборочной операции соответствует сенсорный акт, как элемент эргономической структуры сборочной операции (рис. 4).



Рис. 4

Локальная точность достижения цели движения при отсутствии сигналов обратной связи для человека в скафандре составляет 5–10% от величины диапазона движения. Точные движения необходимо выполнять при непрерывном визуальном контроле.

Характер и объем функциональной загрузки РМС можно представить на основе анализа работ, выполненных на отечественных орбитальных станциях «Салют» 4, 6, 7, орбитальном комплексе «Мир», РС МКС за 1974–2012 годы, в 130 выходах в открытый космос (табл. 2).

Таблица 2

Распределение операционных задач ВКД

| № п/п | Виды операций | Количество миссий ВКД, в которых проводилась работа* |
|-------|--|--|
| 1 | Установка/снятие блочного оборудования | 100 (+10) |
| 2 | Стыковка/расстыковка электросоединителей | 60 (+10) |
| 3 | Сборка/разборка резьбовых соединений | 25 (+5) |
| 4 | Прокладка кабельных трасс | 12 (+3) |
| 5 | Перемещение, монтаж, отгалкивание крупных блоков | 10 (+2) |
| 6 | Воздействие на нераскрывшиеся конструкции | 9 (+2) |
| 7 | Осмотр и оценка состояния поверхности и оборудования | 6 (+2) |
| 8 | Резка металлических элементов и СБ | 6 (+1) |
| 9 | Резка/ установка ЭВТИ | 3 (+1) |
| 10 | Комплексные работы | |

* в скобках указана возможная погрешность в сторону увеличения количества операций

Программа работы за бортом орбитальной станции, как правило, содержит одну или несколько целевых задач, которые, в свою очередь, состоят из комплексов операционно-технологических процессов и поведенческих действий экипажа. При этом отдельные акции могут быть доступны для реализации средствами робототехники, а иные могут быть выполнены только космонавтом, по крайней мере, в существующей инфраструктуре РС МКС. В наибольшей степени это можно отнести к работам, классифицируемым как ремонтно-восстановительные, реконструктивные, модернизационные, аварийные, выходящим за рамки проекта, в которых реализуется весь спектр выполнимых в космических условиях технологий. Примеры таких работ, связанных с неопределенными повреждениями и в недетерминированной зоне, хорошо известны отраслевым специалистам [7]. На взгляд авторов, термин «ремонт», «ликвидация нештатных ситуаций» применительно к целеполаганию робототехники нужно использовать весьма избирательно.

Технико-эргономические характеристики системы «человек–скафандр» (развиваемые усилия, локомоторика, опорные реакции, подвижность, функциональные зоны, поле обзора) могут служить ориентирами для создания технологической робото-манипуляционной системы.

Далее целесообразно рассмотреть историческое и современное содержательное наполнение понятия «робототехника».

Многие живые организмы манипулируют объектами и перемещаются в неупорядоченной окружающей среде. При создании РМС часто оказывается полезным заимствовать те или иные концептуальные и схемные решения у биологических аналогов. Технические устройства, имеющие вид, сходный с биологическими объектами, принято называть биоморфными.

РМС могут быть подобны различным видам живых существ:

- человеку – антропоморфность (2 манипулятора);
- приматам – приматоморфность (4 манипулятора);
- насекомым – инсектоморфность (6 манипуляторов);
- змеям – серпентоморфность.

Возможны следующие виды подобия:

- структурное – сходство состава и взаимосвязей основных функциональных подсистем;
- геометрическое – сходство внешнего вида и размеров или пропорций между основными компоновочными элементами;
- кинематическое – сходство состава основных звеньев, их возможных траекторий и скоростей;
- динамическое – сходство развиваемых сил и моментов.

Начиная от средневековых *Homunculus* до современных РМС, образцом моторики служат человеческие способности выполнения движений, подобных тем, которые человек выполняет при физической работе. Созданием деревянных механических кукол в человеческий рост занимался еще Альберт Великий из Кёльна и Больштадта (1206–1280). Известно предание о том, как его ученик, Фома Аквинский, в панике выбежал из дома учителя после того, как одна из кукол, стоявшая в углу, вдруг протянула к нему руку. Исторически чаще всего воспроизводилось подобие человеку. При этом стремились придать созданию три или все четыре вида подобия.

Робот – машина с человекоподобным **действием (поведением)**, которая выполняет некоторые функции человека (иногда животного) при взаимодействии с окружающим миром. В искусстве робот изображается в виде человекообразной структуры, имеющей, в первую очередь, ориентацию на культурно-массовый, непрофессиональный интерес. Антропоморфные роботы (андроиды), имитирующие внешний облик и движения человека, использовались преимущественно в развлекательных, рекламных и демонстрационных целях, в недавнее время – для операций бытового обслуживания, а также при изготовлении протезов частей тела (рис. 5). Применение андроидов в промышленном производстве не выявлено. Существуют роботы-манипуляторы, фотороботы, информационные роботы и др.

Роботизация – автоматизация производства на основе замещения людей промышленными роботами в таких технологических процессах, автоматизация которых другими средствами невозможна или нецелесообразна. В роботизированных технологических комплексах робото-манипуляционные системы осуществляют все технологические процессы, за исключением функций управления и контроля, сохраненных за человеком. При этом будем иметь в виду, что не каждая автоматическая линия, не любая автоматизированная система, снабженная манипулятором, является роботом.

Манипулятор – исполнительный механизм в виде многозвенного устройства, имитирующий по функциям руку человека, с захватным приспособлением (рабочим органом) на конце, исключающим контакт человека с предметом труда. Шарнирные соединения звеньев искусственной руки обеспечивают рабочему органу от трех до восьми степеней подвижности (линейные и угловые перемещения, вращение, схваты и удержание) (рис. 6).



Рис. 5

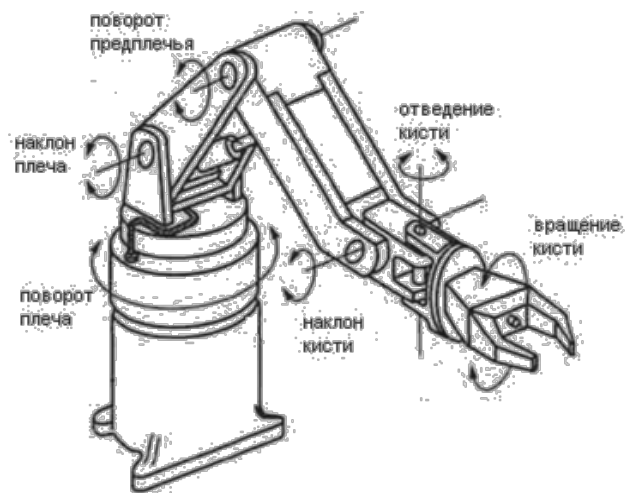


Рис. 6

Перемещение технологического робота может осуществляться посредством транспортных устройств, грузового манипулятора (рис. 7), собственными средствами шаганием по реперным точкам или магистральным линиям (в случае существующей орбитальной станции – по поручням). При перемещении робота по поверхности, которое сопряжено с переносом манипулятора с грузом и преодолением инерционных нагрузок, возможны колебательные явления, которые в определенной степени будут искажать точность попадания на опорные элементы. Очевидно, что шагающий робот, который перемещается с помощью собственных средств, должен стационарно фиксироваться в рабочих зонах, используя для этой цели также собственные средства.

При выполнении операций, требующих высокой точности рабочих движений, например подстыковка блочного электросоединителя или ввинчивание резьбовой детали, статическое равновесие и устойчивость робота может быть достигнута тремя захватами: один на корпусе робота и два на манипуляторах. Исполнительное действие в этом случае может быть реализовано третьим манипулятором, если объект инфраструктуры неподвижен относительно робота. Для стыковки двух кабельных электросоединителей или двух резьбовых деталей между собой понадобится два манипулятора-исполнителя (рис. 8). Такая избыточность рассматривается как излишнее усложнение механики и, особенно, системы управления РМС. Избежать такого усложнения можно путем конструирования объектов инфраструктуры в сопряжении с функциональными возможностями РМС, имеющей не более трех манипуляторов.

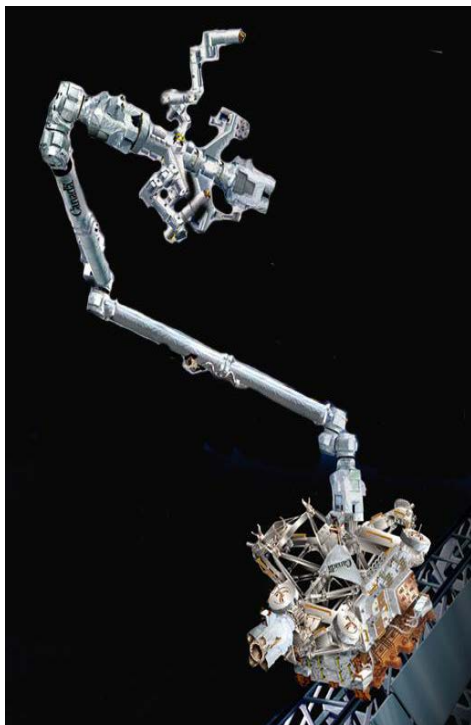


Рис. 7

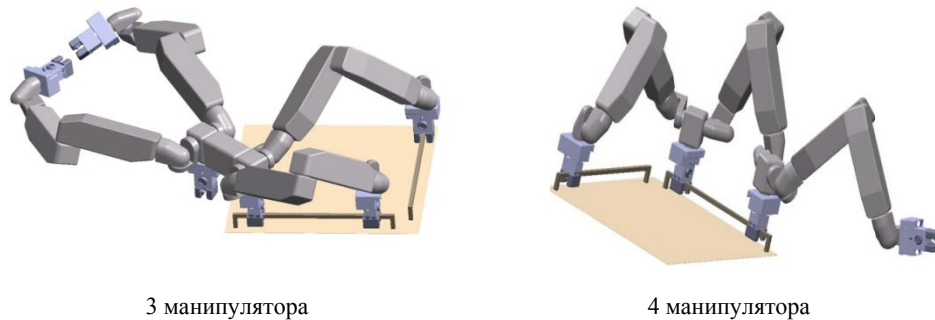


Рис. 8

Каковы организационно-технологические перспективы применения РМС?

Интеграция вновь создаваемой или существующей РМС в средовую обстановку находящихся в эксплуатации объектов (например, модулей РС МКС) предполагает ограниченную отдачу по причине априорно недостаточной согласованности объектов этой среды с РМС. Это означает использование РМС в качестве исполнителя для мониторинга состояния внешней поверхности, транспортировки укладок, позиционирования, фиксации блочного оборудования и, главное, исполнения роли (функции) помощника, ассистента космонавта в сложных операциях ВКД.

Проекты новых станций и кораблей будут, по-видимому, содержать единую систему эксплуатационно-технического обслуживания, представляющую собой взаимoadaptированные с технологическим роботом объекты инфраструктуры, что и станет основой эффективного использования робототехники. При наличии адекватной инфраструктуры эффективность ВКД будет зависеть от степени совершенства РМС, в том числе: наличия тактильного и силомоментного осязания рабочих органов; использования в системе управления РМС автономного, супервизорного и ручного (в частности, копирующего) режимов управления; установления целесообразного режима управления применительно к возможным техническим ситуациям и конкретным технологическим операциям; обеспечения ручного управления РМС космонавтом из скафандра; наличия средств ручного воздействия на шарниры [8].

Наряду с тем, что РМС заменит космонавта в моторных функциях, человек получит еще некоторые преимущества как личность, которые можно назвать социальными, т.е. избавление от рутинных, однообразных, механически выполняемых операций в пользу более интеллектуальных видов труда:

- более высокий удельный вес контрольных операций в общем объеме ВКД;
- самостоятельное внесение изменений в программу управления РМС;
- предоперационная подготовка по ориентированию РМС в условиях недетерминированной среды функционирования;
- межоперационные действия;
- эксплуатация и техническое обслуживание РМС.

Одним из обсуждаемых аспектов проблемы роботизации ВКД является выбор концепции робототехнического устройства: тип андроида или техногенный механизм. По мнению авторов, система, подменяющая космонавта – это симулякр

(simulacres) человека в его функциональной действительности, которому не нужна иррациональная усложненность чисто формальными признаками *imag* а человека, отягощение лишними функциями психологической проекции, приоритета, престижа.

Человек, сформировавшийся в условиях планеты Земля, не приспособлен к работе в космическом пространстве. Будучи же облаченным в современный скафандр, он тем более не обладает оптимальными исполнительными способностями, чтобы стать абсолютным эталоном для формирования концепции РМС космического назначения. Не биоморфность, не полное человекоподобие, а техногенное решение, обеспечивающее выход робота за пределы человеческих возможностей или отождествление с ними при выполнении рабочих операций, является основным критерием в выборе концепции РМС для ВКД.

Надо полагать, что в период становления космической робототехники компоненты современной системы ВКД не останутся в стагнации.

Каковы же футурологические перспективы развития систем ВКД и ее ключевого технического компонента – скафандра? В составе скафандра постепенно появляется бортовой компьютер для управления агрегатами жизнеобеспечения, а также с функциями экспертной системы и интеллектуального партнера; криогенные агрегаты, биоэлектронные органы зрения, экзоскелетон, автономные средства перемещения, достаточные энергоресурсы. Ввод информации осуществляется устными командами, указания космонавту передаются речевым синтезатором, вся информация отражается на остеклении гермошлема. Положено начало концептуальным и экспериментальным исследованием в области создания новых видов защитного снаряжения, когда на базе новых материалов и технологий создается оболочка облегающего типа без газовой прослойки между телом и оболочкой, как это реализовано в существующих скафандрах. Такое решение позволит сохранить локомоторные возможности человека при минимуме ограничений. При этом вся система защиты могла бы иметь модульно-сборную конструкцию, которую можно трансформировать в композицию для условий орбитального или межпланетного полета, для условий Марса, Луны, астероида или других инопланетных тел.

А что же человек? По-видимому, по мере космизации человечества, будет происходить изменение *Homo sapiens*, базой которого должна стать потенция самоэволюции, позволяющая человеку совершенствовать себя. Утверждения некоторых «прорицателей» о неизбежности биологического преобразования человека неестественным путем свидетельствует о неверии адептов этих идей в развитие научно-технического направления космизации, а следовательно – в интеллект человека, в его творческий потенциал. На взгляд авторов, путь совершенствования человека будет связан с применением методов биотехнологии, биоэлектроники, медицины, психотерапии, и возможно, в будущем, генной инженерии.

При условии положительного вектора самоэволюции человека в области психики и интеллекта, такой симбиоз человека и техники превращает систему «человек–скафандр» в некий когнитивно-технический комплекс, который позволительно рассматривать в качестве субъекта человеческой деятельности в открытом космическом пространстве и именовать его **космоантропом**. Скафандр будущего – это внешняя граница внутреннего «Я» космонавта.

Функциональные характеристики акторов ВКД

| Преимущественные возможности робототехники | Преимущественные способности человека |
|---|---|
| <p>Длительная, без усталости, непрерывная работа с сохранения заданного режима</p> <p>Неподверженность эмоциям</p> <p>Автоматическое выполнение стандартизированных операций ВКД без присутствия космонавта в открытом космосе</p> <p>Выполнение операций ВКД при использовании различных систем дистанционного управления из орбитального и наземного сегментов управления</p> <p>Точное выполнение движений, особенно повторных (без учета погрешностей средового окружения)</p> <p>Функционирование в радиационно опасных зонах</p> <p>Наличие нескольких манипуляторов, агрегатирование</p> <p>Повышенные силовые моменты параметры</p> <p>Наличие режима запоминания траектории движения</p> <p>Движение в заданном направлении с преодолением постоянного и переменного сопротивления (сборочные, стыковочные операции)</p> <p>Движение по траектории с поддержанием постоянного усилия (работа сменными инструментами, нанесение покрытий)</p> <p>Перемещение по такелажным элементам в реперных точках (в отсутствие поручней)</p> <p>Контроль столкновений исполнительных органов с препятствиями в недетерминированной внешней среде, способность огибать препятствия или останавливаться перед ними</p> <p>Достигаемость объектов инфраструктуры при длине рук-манипуляторов до 1.5 м</p> <p>Концевой захват, не решающий технологических задач, не имеющий собственных средств формообразования, может быть оснащен технологическим агрегатом с автономным приводом</p> | <p>Адаптивность и креативность Homo sapiens</p> <p>Сотрудничество и взаимопомощь членов экипажа</p> <p>Идентификация и опознание ситуаций и событий требующих действий по обстановке с учетом большого количества параметров</p> <p>Определение причин возникновения нештатных ситуаций, оценка их последствий, планирование пути оперативного выхода из них и выполнение целенаправленных действий по их парированию</p> <p>Действия в непредвиденных ситуациях без задержек, в реальном масштабе времени</p> <p>Проверки и оценка состояния оборудования органолептически, без использования телеметрических данных (по диагностическим сигналам)</p> <p>Выполнение работы в условиях неопределенности рабочей зоны</p> <p>Выполнение работы с импровизацией при использовании стандартного инструмента</p> <p>Работа одновременно двумя руками и двумя инструментами</p> <p>Выполнение операций с высокой манипулятивной сложностью</p> <p>Микродвижения пальцами (в зависимости от конструкции перчатки)</p> <p>Манипулирование нежесткими, маложесткими, эластичными деталями</p> <p>Манипулирование малоразмерными и крупногабаритными деталями</p> <p>Операции отталкивания</p> <p>Ударные воздействия</p> <p>Преодоление погрешностей, больших допусков, упругой податливости конструкций инфраструктуры при установке блочных объектов</p> |

Таким образом, ответ на вопрос заголовка статьи представляется возможным кратко сформулировать следующим образом: космическая робото-манипуляционная система предназначена для выполнения операций ВКД, которые могут быть выполнены без участия космонавта, и для помощи космонавту при выполнении тех операций, в которых заменить человека невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дж.Ф. Янг. Робототехника. – Л.: «Машиностроение», 1979.
- [2] Ф.Л. Черноусько. Манипуляционные роботы. – М.: «Наука», 1989.
- [3] П.Н. Белянин. Робототехнические системы для машиностроения. – М.: «Машиностроение», 1986.
- [4] А.П. Александров, В.Д. Гречка, В.Н. Кобрин, О.С. Цыганков. Сборочно-монтажные и ремонтно-восстановительные работы в космическом пространстве. – Харьков: ХАИ, 1990.
- [5] О.С. Цыганков. Трудовая деятельность в безопорном пространстве // Полет– № 3. – 2012.
- [6] О.С. Цыганков, В.М. Кобрин. Технологічна діяльність космонавта. – Харків: ХАІ, 1995. – с. 33–36.
- [7] О.С. Цыганков. Инженерное обеспечение внекорабельной деятельности // Полет – № 5. – 2011.
- [8] А.П. Александров, Ю.А. Богданов, О.С. Цыганков. Космонавт и манипулятор: «сотрудничество» в процессе внекорабельной деятельности. XXXVI Научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. – Калуга, 2001.

И-СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ В КОСМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРАХ

Е.В. Полунина

Канд. техн. наук, доцент Е.В. Полунина (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Предложены модифицированные сети Петри – И-сети (имитационные сети) для формализованного описания и имитационного моделирования бортовых вычислительных комплексов в тренажерах пилотируемых космических аппаратов. Определены операции на множестве И-сетей и соответствующие им преобразования структуры данных И-сети. Предложенная алгебра дает возможность представлять И-сети в линейной формульной записи и осуществлять на ЭВМ автоматические преобразования И-сетей на уровне структур данных.

Ключевые слова: тренажеры, бортовые вычислительные комплексы, сложные системы, имитационное моделирование, модифицированные сети Петри.

I-nets to Simulate Onboard Computational Complexes for Space Simulators. E.V. Polunina

The paper puts forward the idea to use the modified Petry networks – I-networks (imitation networks) for formalized description and simulation of the onboard computational complexes for simulators of manned space vehicles. Operations with the I-nets set and a corresponding conversion of data structure of I-networks are defined. The proposed algebra makes possible to present I-networks by linear formulae and to realize the automatic transformation of I-nets at the level of data structures.

Key words: simulators, onboard computational complexes, complex system, modified Petry networks.

Введение

Основная подготовка экипажей к космическим полетам проводится на тренажерах, представляющих собой сложные и дорогостоящие системы, которые являются практически единственным средством для формирования у экипажей профессиональных навыков по управлению космическим аппаратом и его системами в штатных и предполагаемых нештатных ситуациях. Эффективность и качество подготовки экипажей на тренажерах в значительной мере определяются соответствующими характеристиками математических моделей бортовых систем пилотируемых космических аппаратов и установленной на них полезной нагрузки.

К настоящему времени на основе более чем тридцатилетнего опыта построения отечественных космических тренажеров отработаны и совершенствуются технология построения тренажеров, методы и средства математического моделирования логики функционирования и физических процессов, протекающих в бортовых системах, достаточно унифицированы модели движения и модель внутренней среды пилотируемых космических аппаратов [1]. Вместе с тем, основным проблемным моментом при создании тренажеров остается моделирование бортовых вычислительных комплексов (БВК), под которыми понимается совокупность вычислительных средств – бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ), спецвычислителей и устройств их сопряжения с бортовыми системами. Проблемой является как выбор метода моделирования – полунатурное или математическое, так и реализация этих методов.

До последнего времени на тренажерах в основном применяется полунатурное моделирование бортовых вычислительных комплексов (использование штатного БВК, использование эмуляторов БЦВМ, использование штатного программного обеспечения на наземных вычислительных средствах).

Полунатурное моделирование БВК имеет преимущества в сроках разработки, быстрой смене версий программного обеспечения, небольших затратах на испытания тренажера, высокой степени адекватности реальному изделию. Однако его использование существенно ограничивает обучающие свойства тренажера, не позволяя осуществлять приостановку тренировки, оперативный возврат в исходное или любое предшествующее состояние, масштабирование времени; делает невозможным ввод расчетных нештатных ситуаций, связанных с отказами аппаратуры БВК; увеличивает время установки начальных условий тренировки и восстановления тренажера при сбоях технических средств и ошибках оператора, что существенно снижает качество тренажера и эффективность подготовки экипажей на нем.

Функциональное (математическое) моделирование свободно от недостатков полунатурного моделирования. Проблема функционального моделирования БВК на тренажере состоит в самом описании объекта моделирования, учета в этом описании не только реализуемых алгоритмов управления, но и особенностей организации вычислительного процесса БВК. Требуется найти такой подход, который на едином языке давал бы возможность адекватно описывать структуру БВК (как программные, так и аппаратные части) и процесс его функционирования в системе управления ПКА. Средства разработки моделей БВК должны отвечать основным принципам моделирования бортовых систем для тренажеров: обеспечивать моделирование в реальном и ускоренном масштабах времени, необходимую для задачи подготовки глубину моделирования, контроль и управление моделью в процессе имитации, регистрацию всех воздействий оператора на модель, минимизировать затраты на доработку модели при изменении структуры БВК и смене версий штатного программного обеспечения [2].

Современные БВК характеризуются большим объемом программного обеспечения, сложным взаимодействием составных частей при реализации многочисленных алгоритмов управления, разнообразием способов взаимодействия с реальной аппаратурой, возможностью наращивания вычислительных средств и замены версий штатного программного обеспечения. На сегодняшний день единственной методологией, претендующей на общность функционального описания и исследования сложных дискретных систем, к классу которых относятся БВК, является методология имитационного моделирования.

С целью выбора исходного формализма для описания БВК были проанализированы подходы к моделированию сложных систем – имитация сложных систем, базирующаяся на концепции событий, активностей, процессов [3], состояний [4], теории агрегатов [5] и модифицированных сетях Петри [6, 7].

Языки дискретного моделирования направлены, прежде всего, на моделирование динамики сложной системы, в них отсутствует статическая основа и отодвигается на второй план такое ключевое понятие имитационного моделирования, как состояние системы. Применение языков дискретного моделирования для моделирования бортовых вычислительных средств на тренажерах ПКА неэффективно из-за слабой структурированности, низкой наглядности построенной модели, трудности контроля и управления моделью, а также больших затрат на программирование, отладку и модификацию модели.

В системе имитации автоматизированных систем с использованием концепции состояний, статической основой которой является ориентированный и размеченный граф переходов системы из состояния в состояние, система имеет статическую структуру (графы переходов и динамики) и описывается на более высоком алгоритмическом уровне, что обеспечивает быстрое и надежное конструирование программной модели, но в ней не отражены явно связи между объектами. Они задаются косвенно через общие ребра-события системы. События разбросаны по графам состояний объектов. При большом числе объектов моделируемой системы такое представление теряет свою наглядность.

При агрегатном моделировании производится декомпозиция системы на элементы, каждый из которых описывается как кусочно-линейный агрегат. Агрегаты взаимодействуют друг с другом и с внешней средой на уровне обмена сигналами. В модели отражены все связи системы, структурная схема наглядна, иерархична, но отсутствует концепция состояния системы, что затрудняет оперативный контроль и управление моделью. К тому же, агрегатное моделирование эффективно применяется для моделирования многоуровневых иерархических структур из элементов, которые сами являются довольно сложными системами. В случае моделирования БЦВК, где элементы не являются сложной структурой, применение агрегатного метода малоэффективно, так как алгоритмическое описание функционирования элемента короче или сравнимо с его параметрическим заданием в виде агрегата.

В настоящее время в различных предметных областях широко используются имитационные модели, основанные на сетях Петри и их расширениях. Сеть Петри иерархична, имеет статическую структуру, позволяет описывать и отображать текущее состояние и процессы функционирования моделируемых систем. И хотя существующие модификации сетей Петри в силу их ограниченной мощности моделирования не позволяют моделировать БВК на тренажерах, сам аппарат сетей Петри содержит большие потенциальные возможности для формализованного описания и имитационного моделирования бортовых вычислительных средств на тренажерах ПКА и допускает модификации, направленные на расширение задач моделирования.

В качестве исходного формализма для разработки аппарата формализованного описания и имитационного моделирования БВК были выбраны Е-сети [8], ориентированные на решение задачи анализа и оценивания операционных систем на стадии их проектирования или выбора. В Е-сетях элементы вычислительной системы (память, процессор, внешние устройства, регистры и т.д.) и программы ОС представляются вершинами сети, поток заданий в вычислительной системе – метками, движущимися по сети. Атрибутами меток являются потребные вычислительные ресурсы для выполнения программы. При этом сама программа в процессе моделирования не выполняется.

Для возможности моделирования аппаратно-программной платформы БВК совместно с выполнением алгоритмов управления в Е-сети были введены модификации, направленные на расширение имитационных возможностей сетей, придания им универсальности, сокращения объема сетевых моделей и приближения модели к реальной системе. Полученные сети были названы И-сетями (имитационные сети).

1. И-сети

1.1. Введенные модификации

1) Вместо набора базовых типов переходов введен универсальный переход, условия реализации которого и правила приема меток из входных позиций могут быть любыми функциями статусов входных и выходных позиций перехода, а правила выдачи меток в выходные позиции перехода – функциями статусов входных и выходных позиций и атрибутов принятых меток.

Данная модификация обусловлена тем, что БЦВМ представляет собой сложную систему из разнородных многофункциональных элементов. Моделировать все элементы системы с помощью ограниченного набора типов переходов нецелесообразно. В тех случаях, когда логика наступления некоторой активности не может быть описана каким-либо типом перехода, активность приходится моделировать несколькими связанными между собой типовыми переходами, а если это невозможно – вводить новый тип перехода. Это приводит к увеличению размера сетевой модели и увеличивает дистанцию между сетевой моделью и реальной системой.

2) Переход может содержать процедурную часть – вычислительный алгоритм, выполняемый при срабатывании перехода.

Введение в процедуру перехода вычислительной части вызвано необходимостью моделирования выполнения алгоритмов управления, реализуемых БВК. Но данная модификация позволяет описывать и моделировать И-сетями не только дискретные системы, на что направлены классические сети Петри и известные модификации сетей Петри, но и сложные системы, включающие в себя как дискретные, так и непрерывные части.

3) Метка в качестве своего атрибута может содержать не только переменные, но и алгоритмы, выполнением которых управляют переходы, принявшие метку, что позволяет моделировать выполнение рабочих программ БЦВМ.

4) Временной параметр перехода может быть принадлежностью данного перехода, атрибутом принятой метки, а также функцией атрибутов принятых меток и модельного времени. В последнем случае переход моделирует активность, длительность которой определяется свойствами данных, над которыми она действует.

5) Структура метки не фиксированная, как в предшествующих модифицированных сетях, а произвольная, т.е. количество атрибутов и порядок их следования в метке произвольный в рамках одной сети. В общем случае переход может принять метку одной структуры, а сформировать и передать метку в выходную позицию другой структуры.

6) Практика сетевого моделирования показала, что в сетевой модели БЦВМ можно выделить позиции, в которых постоянно находятся метки (например, списки временных заданий, значения некоторых регистров и т.д.). Для их моделирования введены информационные позиции (графически изображаются наполовину заштрихованными кружками). При приеме метки из такой позиции ее статус не обнуляется, метка сохраняется. Статус информационной позиции обнуляется только при записи в нее нулевой информации.

7) Из каждой позиции выходит и в каждую позицию входит не более одной дуги. Наличие у позиции нескольких входных или выходных дуг может приводить к конфликтным ситуациям. Введенное ограничение на количество дуг инцидентных позиции сети возлагает на разработчика модели разрешение возможных конфликтов.

Новый формализм объединил преимущества рассмотренных подходов – универсальность языков дискретного моделирования, функциональность агрегатного моделирования и наглядность, структурность и управляемость, присущие сетям Петри.

1.2. Определение И-сети

Формально И-сеть определяется как набор:

$N = (Q, QI, P, I, O, M)$, где:

$Q = \{q_i\}$ – конечное непустое множество позиций, $i=1, l$;

$QI \subseteq Q$ – подмножество, быть может, пустое, информационных позиций;

$P = \{p_i\}$ – конечное непустое множество переходов, $i=1, n$;

$p_i = \{L_i, PM_i, PROC_i\}$, где:

L_i – логическая функция статусов входных и выходных позиций перехода,

PM_i – процедура приема меток из входных позиций перехода,

$PROC_i$ – процедура определения временного параметра перехода p_i , преобразования входных меток, формирования выходных меток и выдачи их в выходные позиции перехода;

$I \subseteq Q \times P \Rightarrow \{0, 1\}$ – входные дуги;

$O \subseteq P \times Q \Rightarrow \{0, 1\}$ – выходные дуги;

$M = \{mq_1, mq_2, \dots, mq_l\}$ – начальная разметка, где:

$mq_i = \{a_j\}$ – конечное множество атрибутов метки.

При условии, что:

1) $\forall q \in Q, I(q) = \{p \in P \mid I(q, p) = 1\} = \{0, p_i\}$, $O(q) = \{p \in P \mid O(p, q) = 1\} = \{0, p_j\}$;

2) $I(q) \cup O(p) \neq \emptyset$;

3) $\forall p \in P, \{q \in Q \mid I(q, p) = 1\} \neq \emptyset, \{q \in Q \mid O(p, q) = 1\} \neq \emptyset$.

В графической форме имитационная сеть изображается как ориентированный граф со множеством вершин $Q \cup P$. Из вершины-перехода p в вершину-позицию q ведет дуга тогда и только тогда, когда $O(p, q) = 1$; из вершины-позиции q в вершину-переход p ведет дуга тогда и только тогда, когда $I(q, p) = 1$. В первом случае позиция q называется выходной позицией перехода p , во втором – входной позицией. Позиции, которые имеют только входную или выходную дугу, называются периферийными позициями сети.

Вершины-позиции изображаются кружками, информационные позиции – наполовину заштрихованными. Вершины-переходы с временными параметрами, априори равными нулю, изображаются барьерами, остальные – прямоугольниками. Метки изображаются точками в вершинах-позициях.

Условие 1 в определении сети означает, что в каждую позицию входит и из каждой позиции выходит не более одной дуги. Условие 2 означает, что каждая позиция имеет хотя бы одну входную или выходную дугу. Условие 3 означает, что каждый переход имеет, по крайней мере, одну входную и одну выходную позицию.

Набор переходов и позиций вместе с направленными дугами описывают топологию сети. Сеть функционирует, переходя от одной разметки к другой. Метки двигаются по сети путем так называемой реализации переходов. При реализации перехода метки из входных позиций изымаются и с некоторой задержкой τ_p , называемым временным параметром перехода, переводятся в выходные позиции перехода, при этом переход может преобразовывать атрибуты принятых меток в соответствии с процедурой перехода.

Переход p_i реализуется при разметке M тогда и только тогда, когда $L_i(M)=1$. Если одновременно выполняются условия реализации нескольких переходов, переходы реализуются в любой последовательности.

Действие перехода состоит из трех фаз.

Фаза наступления. В этой фазе принимаются метки из входных позиций перехода в соответствии с процедурой приема меток PM_i . При этом статусы простых, не информационных позиций обнуляются, метки в них уничтожаются. Информационные позиции сохраняют свои метки. Выполняется процедура перехода $PROC_i$, в которой определяется временной параметр перехода, выполняются действия над атрибутами принятых меток, формируются выходные метки. Временной параметр может быть константой, атрибутом принятой метки, а также функцией атрибутов принятых меток и модельного времени.

Фаза активности. Продолжается временной промежуток, равный временному параметру перехода. В этой фазе изменений в сети не происходит.

Фаза завершения. Сформированные на первой фазе при выполнении $PROC_i$ метки передаются в выходные позиции перехода, изменяются статусы выходных позиций. Статусам простых позиций, в которые передаются метки, присваиваются единичные значения. Статусам информационных позиций могут присваиваться как единичные (в позицию поступает метка), так и нулевые значения (метка в позиции обнуляется).

При сетевом моделировании БЦВМ модули ОС представляются вершинами-переходами сети, данные – вершинами-позициями, алгоритмы управления – метками, содержащими в качестве атрибутов имя и характеристики программы алгоритма, используемые операционной системой для ее управления и подлежащие моделированию. Состояние БЦВМ, под которым понимается состояние среды ОС и состояние выполнения рабочих программ, описывается разметкой сети.

И-сетевая модель близка к реальной системе. В ней отражены как структура и функциональные связи моделируемой системы – топология сети, так и динамика системы – движение меток по сети и изменение их атрибутов в процессе движения. В реальной БЦВМ имеются два уровня программ – программы операционной системы и рабочие программы полета. Программы первого уровня управляют выполнением программ второго уровня. В И-сетевой модели также присутствуют два уровня программ – процедуры переходов и программы, являющиеся атрибутами меток. Процедуры переходов управляют движением меток по сети и выполнением программ, содержащихся в метках. Состояние модели в любой момент времени определяется разметкой сети. Отсюда вытекает возможность контроля функционирования модели и управления процессом функционирования модели путем изменения текущей разметки. Отображая граф сети и текущую разметку, можно непосредственно наблюдать функционирование модели во времени.

1.3. Структура данных И-сети

При машинной имитации И-сеть представляется в памяти ЭВМ в виде структуры данных, являющейся исходной для программы имитации, которая собственно осуществляет имитацию функционирования И-сети во времени – ведет счет модельного времени, циклически просматривает статусы позиций сети, находит переходы, для которых выполняются условия наступления, управляет реализацией этих переходов в модельном времени.

Исходя из того, что: а) таблица является наиболее удобным способом упорядочения информации; б) независимость данных проще обеспечить в табличной структуре, чем в древовидной или в сетевой; в) «физическое размещение» двумерных файлов намного проще, чем размещение древовидных и сетевых структур [9], для представления И-сети в памяти ЭВМ была разработана структура данных в виде таблиц, содержащих информацию о переходах (*TP*), позициях (*TQ*), связях между ними (*TC*) и библиотек программ, реализующих процедуры переходов (*L*, *PM*, *PROC*) и алгоритмы, являющиеся атрибутами меток (*PRG*) (рис. 1).

Таблица позиций – *TQ* – содержит информацию о позициях сети. Каждая строка содержит информацию об одной позиции: имя позиции, признак информационной позиции, статус позиции (наличие метки в позиции), текущую и начальную метку.

Таблица переходов – *TP* – содержит информацию о переходах сети. Под каждый переход отведена одна строка таблицы, в которой содержатся номер, имя перехода, фаза перехода и принятые метки, если переход находится в активной фазе. (В начальный момент времени фазы всех переходов равны нулю.)

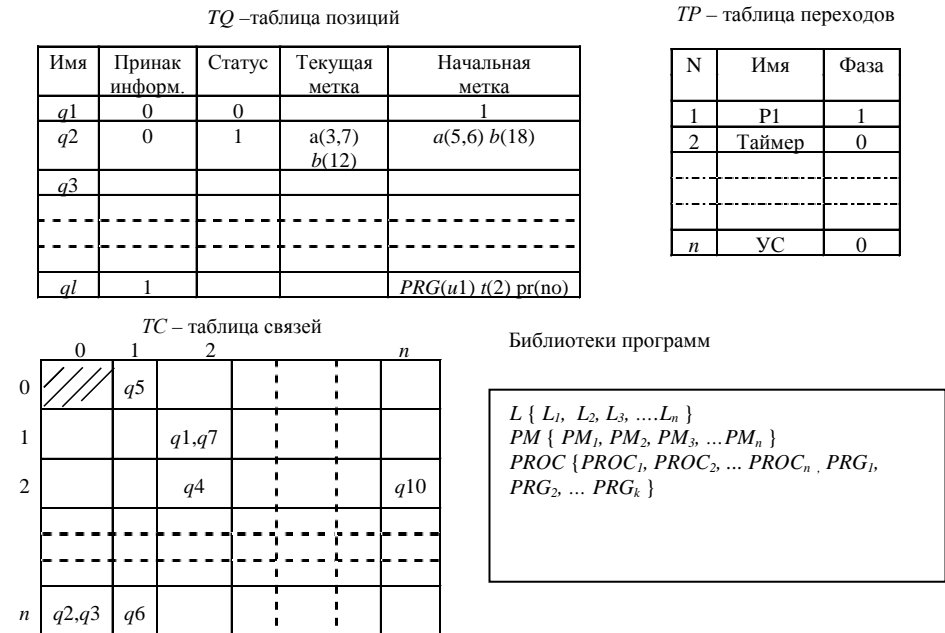


Рис. 1. Структура данных И-сети

Таблица связей – *TC* – отражает топологию сети. В силу того, что каждая позиция может иметь не более одной входной и не более одной выходной дуги (см. условие 1 в определении И-сети), функции инцидентности *I* и *O* могут быть заданы с помощью квадратной матрицы размером $(n+1)*(n+1)$ (*n* – число переходов сети), где на пересечении *p_i* строки и *p_j* столбца находятся позиции, являющиеся выходными позициями перехода *p_i* и входными позициями перехода *p_j*. Нулевой столбец содержит выходные периферийные позиции сети, нулевая строка – входные периферийные позиции сети. Соответственно *p_i*-я строка таблицы содержит все выходные позиции перехода *p_i*, *p_i*-й столбец – все входные позиции перехода *p_i*.

2. Операции на множестве И-сетей

Преимуществом И-сетевой модели является также то, что модель является математической схемой и, как любая схема, допускает преобразования на уровне схем. Ниже описываются введенные операции на множестве И-сетей и соответствующие им преобразования разработанной для представления И-сетей в памяти ЭВМ структуры данных. Основная цель введения операций в такой форме и в таком составе, как представлено в данной работе, состоит в сокращении сроков создания и модификации И-сетевых моделей сложных систем, к классу которых относятся БВК. При разработке операций на И-сетях, там, где это оказалось возможным, были использованы терминология и обозначения, введенные в работе Котова по алгебре регулярных сетей Петри [10], но в ряде случаев они имеют другое смысловое содержание, обусловленное отличием И-сетей от классических сетей Петри.

Пусть $h(N)$ обозначает множество головных (входных периферийных) позиций сети N , а $l(N)$ – множество хвостовых (выходных периферийных) позиций сети N . Позиции $q \notin h(N) \cup l(N)$ назовем внутренними позициями сети.

Определим операции на множестве И-сетей.

Операция объединения " , ". Рассматривая элементы сети не как множества, а как комплекты [8] с числом экземпляров элементов в комплектах равным единице, операцию объединения можно представить как сумму комплектов исходных сетей. Если $N_1 = (Q_1, P_1, I_1, O_1, M_{01})$ и $N_2 = (Q_2, P_2, I_2, O_2, M_{02})$, то $N = (N_1, N_2) = (Q_1+Q_2, P_1+P_2, I_1+I_2, O_1+O_2, M_{01}+M_{02})$. (Пример выполнения операции объединения дан на рис. 2а.)

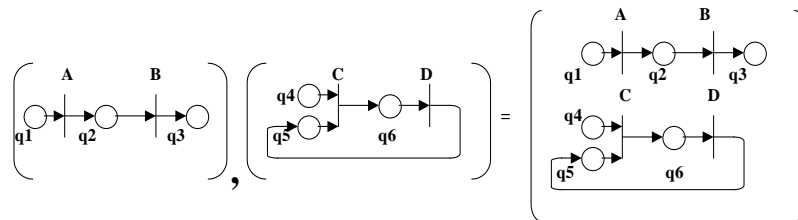


Рис. 2а. Объединение сетей

Операция объединения как самостоятельная операция может применяться к сетям N_1, N_2 с непересекающимися множествами P_1, P_2 и Q_1, Q_2 : $P_1 \cap P_2 = 0$, $Q_1 \cap Q_2 = 0$. В противном случае результирующая сеть не является И-сетью.

Порядок формирования структуры данных сети N из структур данных исходных сетей N_1, N_2 следующий. TQ и БП получаются попарным объединением в произвольном порядке таблиц TQ_1 и TQ_2 , БП₁ и БП₂ соответственно. Таблица переходов TP получается последовательным объединением TP_1 и TP_2 , при этом изменяется нумерация переходов сети $N_2 - i_2' = i_2 + n_1$. Таблица связей формируется в два этапа. Сначала TC_1 достраивается до размера $(n_1+n_2+1)*(n_1+n_2+1)$. Затем нулевая строка TC_2 переносится в нулевую строку TC , нулевой столбец TC_2 – в нулевой столбец TC , остальная часть TC_2 переносится в TC , начиная с n_1+1 строки и с n_1+1 столбца (рис. 3а).

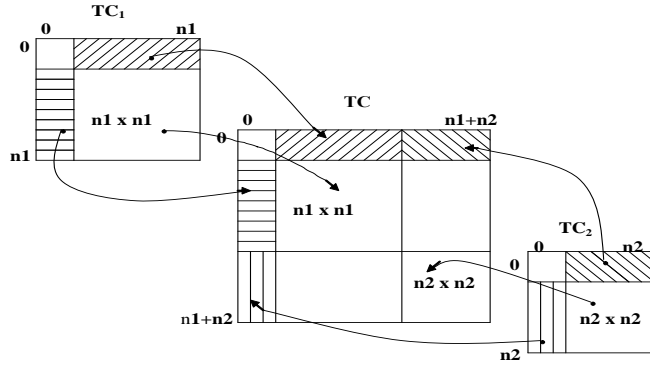


Рис. 2б. Преобразование таблицы связей при объединении сетей

Операция слияния позиций "μ". Операция слияния хвостовых позиций сети с головными позициями задает новую сеть $N' = \mu(N, X \otimes Y)$, $X \subseteq l(N)$, $Y \subseteq h(N)$, в которой каждая пара позиций заменяется одной позицией с двойным именем $z_i = x_i \& y_i$, разметкой $M_0(x_i)$ и соответствующими позициям x_i, y_i инцидентными дугами. (Пример выполнения операции приведен на рис. 2б.)

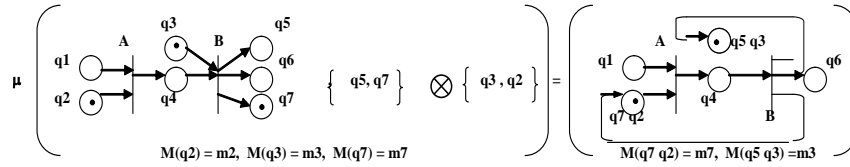


Рис. 3а. Слияние позиций

Преобразования структуры данных сети при этой операции затрагивают только таблицы связей и позиций. Из TQ удаляются строки, соответствующие позициям множества Y . В строках, соответствующих $q \in X$, x_i заменяется на z_i . В TC позиции $q \in X \cup Y$ переносятся из нулевых строк и столбцов во внутреннюю часть с двойным наименованием (рис. 3б).

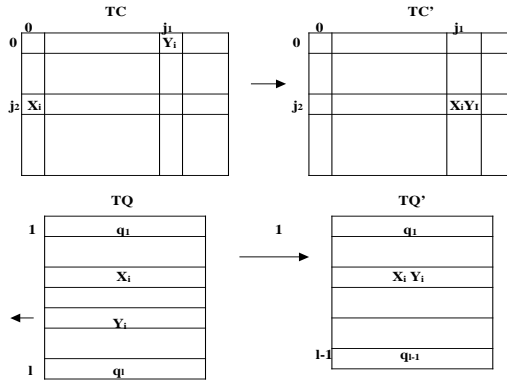


Рис. 3б. Преобразование таблиц связей и позиций при слиянии позиций

Операция сшивания сетей " ; ". Эта операция имеет две модификации.

а) Операция без параметров $N' = (N1; N2)$. Заключается в объединении сетей $N1, N2$ с последующим слиянием одноименных позиций. Если $Q_1 \cup Q_2 = 0$, то эта операция тождественно равна операции объединения сетей.

б) Операция с параметрами. $N' = (N1; N2)(X, Y)$, $X = \{X_1, X_2\}$, $Y = \{Y_1, Y_2\}$, $X_1 \in l(N1), X_2 \in l(N2), Y_1 \in h(N1), Y_2 \in h(N2)$. Эта операция объединяет сети $N1, N2$ с последующим слиянием одноименных и указанных в операции позиций. (Пример выполнения операции дан на рис. 4.)

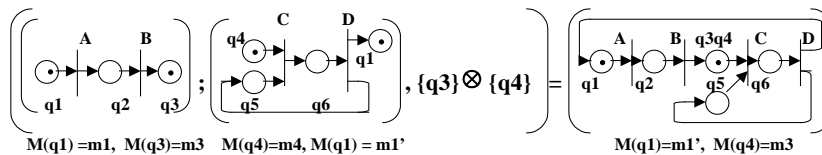


Рис. 4. Сшивание сетей

Определим вспомогательную операцию – *расщепление внутренней позиции* “v”. Эта операция создает в сети из одной внутренней позиции две периферийных – головную и хвостовую. (Пример выполнения операции дан на рис. 5а.)

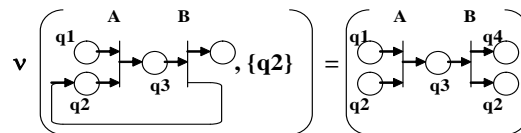


Рис. 5а. Расщепление внутренней позиции

В структуре данных сети расщепленная позиция переносится в нулевую строку и нулевой столбец TC (рис. 5б). В TQ добавляется строка, идентичная строке, соответствующей расщепляемой позиции.

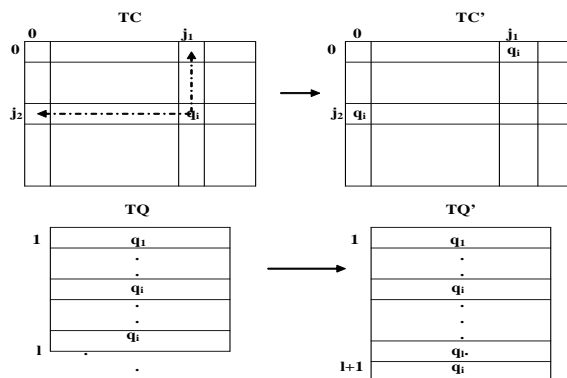


Рис. 5б. Преобразование таблиц связей и позиций при расщеплении позиций

Введем понятие *базового фрагмента сети*. Базовым фрагментом V_p сети N назовем подсеть, включающую переход p , все инцидентные ему дуги и выходные и входные позиции. Если $P = \{p_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, то все базовые фрагменты сети

есть $V_{p_1}, V_{p_2}, \dots, V_{p_n}$, а $N = (V_{p_1}; V_{p_2}; \dots; V_{p_n})$, т.е. сеть может быть получена путем сшивания всех своих базовых фрагментов. Фрагмент сети $V(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}) = (V_{p_{i1}}; V_{p_{i2}}; \dots; V_{p_{in}})$ есть сеть, полученная сшиванием входящих в него базовых фрагментов.

Операция выделения базового фрагмента из сети " / ". Если $N = (Q, P, I, O, M_0)$, а $p_i \in P$, то $N' = (N | p_i) = V_{p_i}$. (Пример выполнения операции дан на рис. 6а.)

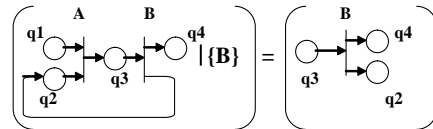


Рис. 6а. Выделение базового фрагмента из сети

Структура данных N' формируется из структуры данных N следующим образом: TP' представляет собой одну строку TP , описывающую переход p_i ; BP' – часть БП, относящаяся к переходу p_i ; TQ' – совокупность строк TQ , описывающих $q \in I(p_i) \cup O(p_i)$. TC' представляет собой матрицу размером 2×2 , дополненную следующим образом: все элементы, кроме элемента (i, i) , из i -той строки TC переносятся в элемент $(1,0) TC'$, из i -го столбца – в элемент $(0,1) TC'$; содержимое элемента $(i, i) TC$ переносится в элемент $(1,1) TC'$ (рис. 6б).

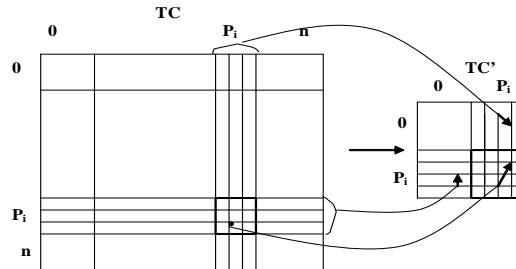


Рис. 6б. Преобразование таблицы связи при выделении базового фрагмента

Операция выделения фрагмента из сети. Эта операция формирует новую сеть, равную выделяемому фрагменту исходной сети. $N' = (N | \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}) = ((N | p_{i1}); (N | p_{i2}); \dots, (N | p_{in}))$. (Пример выполнения операции дан на рис. 7.)

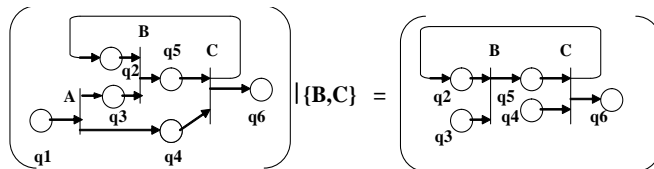


Рис. 7. Выделение фрагмента из сети

Операция удаления базового фрагмента из сети. $N' = N - V_{p_i}$ есть сеть, получаемая из исходной в два этапа. Сначала расщепляются все позиции, общие для фрагментов V_{p_i} и $V(P \setminus \{p_i\})$. Затем из полученного набора элементов сети удаля-

ются все элементы, принадлежащие базовому фрагменту V_{pi} . (рис. 8а).

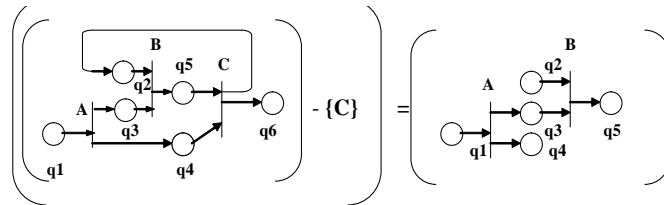


Рис. 8а. Удаление базового фрагмента из сети

Структура данных сети N подвергается следующим преобразованиям. Из TQ удаляются строки, соответствующие позициям, находящимся на пересечении p_i -й строки и p_i -го столбца TC , из TP – строка перехода p_i , из БП – программы процедур перехода p_i . В TC расщепленные позиции переносятся из внутренней части в нулевую строку и столбец и затем p_i -я строка и p_i -й столбец удаляются (рис. 8б).

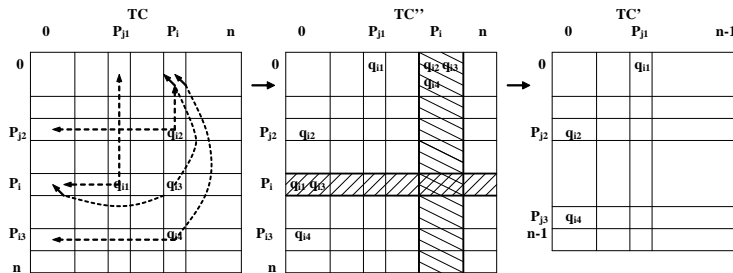


Рис. 8б. Преобразование таблицы связи при удалении базового фрагмента

Операция удаления фрагмента из сети. $N' = N - V(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}) = V(P \setminus \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\})$.

Операция удаления фрагмента из сети может быть выполнена двумя способами:

а) последовательным удалением всех базовых фрагментов, составляющих удаляемый фрагмент; б) выделением из сети фрагмента $V(P \setminus \{p, \dots, p\})$.

$N' = (N - V(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})) = (\dots((N - V_{pi1}) - V_{pi2}) - \dots - V_{pin}) = (N \setminus \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\})$. (Пример выполнения операции дан на рис. 9.)

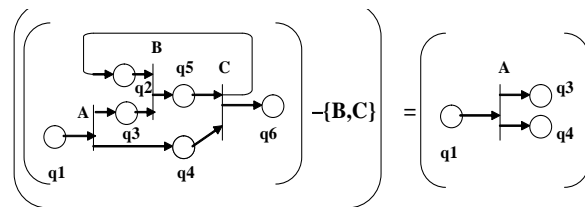


Рис. 9. Удаление фрагмента из сети

Операция замены фрагмента сети на сеть "γ". Эта операция включает в себя две операции – удаление фрагмента из сети и сшивание оставшейся части сети с сетью N_1 по одноименным позициям.

$N' = \gamma(N, V\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\}, N_1) = ((N - V\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\}); N_1)$. (Пример выполнения операции дан на рис. 10.)

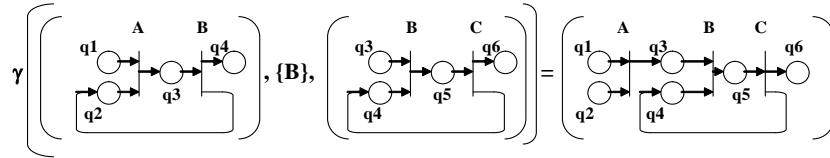


Рис. 10. Замена фрагмента сети на сеть

Операция замены позиции на сеть "g". Если $N = (Q, P, I, O, M_0)$ и $q \in Q$, а $N_1 = (Q_1, P_1, I_1, O_1, M_{01})$ и $x_i \in l(N_1)$, $y_i \in h(N_1)$, то $N' = g(N, q_i, N_1, x_i, y_i)$ есть сеть, полученная из сетей N, N_1 в два этапа:

- 1) в сети N расщепляется позиция q_i . В результате получается сеть $N'' = v(N, q_i)$, в которой присутствуют две одноименные позиции – $q_i^1 \in l(N'')$ и $q_i^2 \in h(N'')$;
- 2) сети N'' и N_1 сшиваются, при этом попарно сливаются позиции q_i^1, q_i^2 сети N'' с позициями x_i и y_i сети N_1 : $N' = (N''; N_1) (\{q_i^1, x_i\}, \{y_i, q_i^2\})$. (Пример выполнения операции дан на рис. 11.)

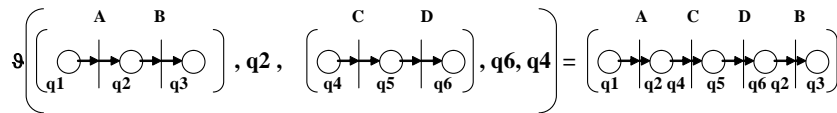


Рис. 11. Замена позиции на сеть

В результате получаем сеть, где все имена уникальны. Хотя имя заменяемой позиции входит дважды в TQ , сами двойные имена позиций q_i, x_i и y_i, q_i различны. В случае двойного имени позиции для входных меток используется второе имя, для выходных – первое имя.

При рекурсивных заменах позиций с двойными именами на сеть получаем позиции с тройными именами и т.д. Но как легко показать, внутренние составляющие имен позиций нигде не используются. Поэтому после каждого выполнения данной операции внутренние составляющие имен не сохраняются, остаются только крайние (первое и последнее) составляющие имени позиции.

Введенные операции на И-сетях позволяют на уровне манипулирования структурами данных И-сетей объединять различным образом несколько сетей в одну сеть, выделять из сети подсети, удалять из сети части сети, вставлять новые части в сеть, заменять части сети на новые, разрывать существующие и образовывать новые связи в сети.

Предложенная алгебра дает возможность представлять И-сети в линейной формульной записи и осуществлять на ЭВМ автоматические преобразования И-сетей на уровне структур данных, их конструирование из других сетей. Благодаря введенным операциям возможны параллельная разработка частей И-сетевой модели с последующим их объединением, использование при создании новой модели уже имеющихся моделей и их отдельных частей; обеспечиваются модуль-

ность и иерархичность построения моделей сложных систем, минимизируются затраты на модификацию модели.

Благодаря высокому уровню описания процесса функционирования БВК и возможности преобразования И-сетевых сетевых моделей на уровне схем, применение данного подхода в тренажере позволяет сократить сроки разработки, испытаний и модификации моделей БВК при изменении структуры и смене версий штатного программного обеспечения, а присущие И-сетевой модели свойства наглядности, контролируемости и управляемости – обеспечить эффективную подготовку экипажей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шукшунов В.Е. и др. Тренажерные комплексы и тренажеры. – М.: Машиностроение, 2005.
- [2] Наумов Б.А., Полунина Е.В., Саев В.Н., Синельников В.Г. Особенности разработки моделей бортовых систем для тренажеров российского сегмента Международной космической станции // Полет, № 6. – М.: Машиностроение, 2008.
- [3] Дал У. Языки для моделирования систем с дискретными событиями. В кн.: Языки программирования. – М.: Мир, 1972.
- [4] Виттих В.А., Коварцев А.И., Кораблин М.А. Имитация автоматизированных систем с использованием концепции состояний // Известия АН СССР. ТК.– 1981. – № 4.
- [5] Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1977.
- [6] Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
- [7] Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения (обзор) // ТИИЭР, 1989, № 4.
- [8] Noe J.D., Nutt G.J., Macro E-nets for representation of parallel systems, IEEE Trans. Comput. Vol. C-22, No 8, 1973.
- [9] Мартин Дж. Организация баз данных в вычислительных системах. – М.: Мир, 1978.
- [10] Котов В.Е. Алгебра регулярных сетей Петри // Кибернетика. – 1980. – № 5.

О ПОЛЕТЕ НА МАРС

М.Н. Бурдаев

Докт. техн. наук, профессор М.Н. Бурдаев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье дан краткий обзор развития в нашей стране идеи межпланетных сообщений, а затем конструктивных решений в ОКБ-1 С.П. Королёва по подготовке полетов к ближайшему к Земле небесному телу – Луне и к Марсу. Рассказывается о нереализованном предложении модифицировать лунный вариант «Союзов» 7К, 9К и 11К для облета Марса.

Ключевые слова: Марс, «Союз», ракета-носитель Н-1, облет Марса, баллистика, ЦНИИмашиностроения.

On the Mission to Mars. M.N. Burdaev

The paper gives a brief review of development of interplanetary traffic idea followed by constructive decisions of preparation of missions to the nearest celestial bodies to the Earth – the Moon and Mars at the Design Bureau-1 by S.P. Korolyov. Besides, the paper reports about the unrealized proposal to modify the lunar versions of Soyuz 7K, 9K, and 11K spacecraft for performing a circum-martian mission.

Key words: Mars, Soyuz, N-1 launch vehicle, circum-martian mission, ballistics, TsNIIMash.

К полетам на другие планеты наши соотечественники начали готовиться в начале прошлого века. 20 июня 1924 года в Москве было организовано Общество изучения межпланетных сообщений. В его состав вошли К.Э. Циолковский, Ф.А. Цандер и другие энтузиасты и популяризаторы космических полетов. Ф.А. Цандер первым рассчитал энергетические затраты для перелета на Марс [7, стр. 43]. Те, кто работал с ним, запомнили его призыв: «Вперед на Марс!».

Первая перспективная программа освоения космоса была предложена М.К. Тихонравовым в 1954 году [11, стр. 84]. В ней был предусмотрен полет беспилотного аппарата на Луну. Позднее в ОКБ С.П. Королёва был разработан документ под названием «О перспективных работах по освоению космического пространства». В третьем разделе этой программы упоминался полет автоматических аппаратов к Марсу и Венере [11, стр. 105]. Но мысли о полетах к планетам появились у С.П. Королёва на несколько лет раньше.

Для осуществления межпланетных полетов в программе была запланирована разработка ракеты-носителя Н-1. На одном из томов ее эскизного проекта сохранилась запись С.П. Королёва: «Мы думали об этом в 1956–57 годах» [9, стр. 8].

Проектным отделом ОКБ-1 руководил М.К. Тихонравов. Для полетов к Марсу две группы специалистов – под руководством Г.Ю. Максимова и К.П. Феоктистова – разрабатывали различные варианты тяжелого межпланетного корабля (ТМК).

Группа Г.Ю. Максимова разрабатывала более простой и легкий корабль для облета Марса и проведения исследований без выхода на орбиту около Марса и без посадки на него. Проект группы К.П. Феоктистова разрабатывался под ракету Н-1 в двух вариантах. В одном из них предусматривался вывод экипажа в космос непосредственно на ТМК, во втором – вывод корабля без экипажа и последующая доставка экипажа на ТМК (как позднее предполагалось, выполнить при первых пилотируемых полетах «Бурана»).

По результатам работ над первым вариантом ТМК было принято решение о создании наземного экспериментального комплекса. По второму варианту ТМК в

1969 году был выпущен его эскизный проект. Разработка ТМК была прекращена в связи с закрытием работ по ракете-носителю Н-1 [9, стр. 8–12].

Параллельно с проектированием ТМК разрабатывались теоретические и конструктивные аспекты сборки крупных блоков на орбите ИСЗ. В марте 1962 года С.П. Королёв утвердил технический проект «Комплекс сборки космических аппаратов на орбите спутника Земли (тема «Союз»)». В нем предлагалось использовать модифицированный пилотируемый корабль «Восток-7» для стыковки и сборки на орбите блоков ракеты-носителя и корабля с целью облета Луны. На этой ракете предполагалось отправить к Луне корабль Л-1 с экипажем 1–3 человека.

В том же документе предлагалось состыковать на орбите из трех блоков орбитальную станцию с экипажем из трех человек. В составе этого комплекса планировалось иметь пилотируемый корабль для доставки на орбиту экипажа. Он представлял собой переходный вариант от «Востоков» и «Восходов» к первым вариантам нынешних «Союзов».

В мае 1963 года С.П. Королёвым был утвержден документ под названием «Сборка космических аппаратов на орбите спутника Земли» [9, стр. 13–15]. Этим документом предусматривалось создание орбитального комплекса, состоящего из разгонного блока 9К и вариантов транспортных кораблей, получивших широко известное теперь название «Союз»: пилотируемого корабля 7К и кораблей-танкеров (заправщиков) 11К для доставки компонентов топлива [10, стр. 380].

Эта связка должна была выполнить облет Луны и вернуть экипаж на Землю с посадкой на территории нашей страны. Поэтому с полным основанием Б.Е. Черток в третьей книге своих воспоминаний «Ракеты и люди» [10] историю создания «Союзов» начинает словами: «У «Союзов» – лунное начало».

В процессе работ по этой программе были уточнены технические требования к пилотируемому кораблю «Союз». Эскизный проект «Союза» был утвержден в 1965 году. В ноябре 1966 года запуском беспилотного ИСЗ «Космос-133» были начаты его летно-конструкторские испытания. Запуск был неудачным: спуск по нерасчетной траектории, и автомат подрыва объекта, который стоял на корабле, подорвал его задолго до приземления [10, стр. 419].

В декабре 1966 года при запуске второго беспилотного корабля со стартовой площадки улетели только спускаемый аппарат и бытовой отсек. Их унесла система аварийного спасения. Ракета после этого взорвалась на старте.

В феврале 1967 года у третьего беспилотного корабля на спуске прогорела теплозащита, с ней вместе – днище спускаемого аппарата. Он приземлился не в штатном районе приземления, а на замерзшее Аральское море и ушел под лед. Извлекли его оттуда через четверо суток [10, стр. 435]. Но и после этих серьезных предупреждений, на апрель 1967 года был назначен запуск двух пилотируемых «Союзов» для стыковки и перехода двух космонавтов из корабля в корабль через открытый космос. Этот эксперимент закончился отменой запуска второго пилотируемого «Союза» и гибелью космонавта В.М. Комарова, ранее побывавшего в космосе в качестве командира первого многоместного космического корабля «Восход». Официальным дублером В.М. Комарова в последнем полете был Ю.А. Гагарин. Рассказываю об этом так подробно потому, что все это были шаги на трудном пути к полету на «Союзе» на Луну и впоследствии – к другим небесным телам. В том числе к Марсу.

В те же 60-е годы в нашей стране и в США разрабатывались и строились беспилотные марсианские аппараты. 25 октября 1962 года с космодрома Байконур стартовал к Марсу автоматический корабль 2МВ-4 № 3. В полете не запустилась

четвертая ступень его ракеты-носителя, и он остался на околоземной орбите. Через три дня был отменен старт следующего аппарата к Марсу. Пуск первого в истории человечества космического аппарата к Марсу все же был осуществлен с той же стартовой площадки 1 ноября 1962 года. Полет прошел успешно [10, стр. 53]. Следующие запуски двух беспилотных аппаратов к Марсу в нашей стране состоялись в мае 1971 года. Программы их полета предусматривали переход на орбиты искусственных спутников Марса, проведение многочисленных научных исследований с этих орбит, в том числе фотографирование поверхности Марса, и посадку спускаемых аппаратов на планету. Обе программы были выполнены.

В Соединенных Штатах тоже переживали и успехи, и неудачи. Первая попытка запуска беспилотного корабля «Маринер-3» к Марсу состоялась в Штатах через два года после нашей первой попытки и тоже была неудачной [6, стр. 232]. В ноябре 1964 года к Марсу был запущен «Маринер-4». Он прошел на удалении десяти тысяч километров от Марса и первым передал 22 снимка его поверхности [6, стр. 232]. После этого были запуски «Маринер-6» и «Маринер-7» в феврале и марте 1969 года, неудачный запуск «Маринер-8» и первый выход на орбиту искусственного спутника Марса космического аппарата «Маринер-9» в ноябре 1971 года.

27 февраля 1967 года на Земле, в тренажере, при подготовке к полету на «Аполлоне» на Луну сгорели заживо трое американских астронавтов. Это были: Вирджил Гриссом, командир экипажа, совершивший перед этим суборбитальный полет на космическом корабле «Меркурий» и трехвитковый орбитальный полет на космическом корабле «Джемини-3» в качестве командира; Эдвард Уайт, успевший слетать на «Джемини-4» вторым пилотом, первым из американцев выйти в открытый космос и первым в мире использовать для перемещения в свободном полете в космосе ручное управляющее реактивное устройство, и Роджер Чаффи, не успевший до этого ни разу слетать в космос.

Работы над тяжелыми ракетами-носителями для полетов к Луне и планетам в нашей стране продолжались. С февраля 1969 по декабрь 1972 года были проведены четыре пуска ракеты-носителя Н-1 с макетами лунного корабля. Все они окончились неудачно. Работы по этому проекту были остановлены. После принятия этого решения мне довелось побывать в монтажно-испытательном корпусе Н-1 на Байконуре. Не забыть этого царства спящей красавицы: высоченный светлый зал, пылеотталкивающий лак на полу и стерильная чистота в цехе. Две почти полностью собранные ракеты в сборочных стапелях. В.П. Мишин писал, что «был создан большой задел узлов, агрегатов, систем и элементов конструкции пакетных блоков для семи ракет-носителей» [8, стр. 37]. В начале 70-х годов работы по Н-1 были полностью прекращены. Перспективы дальних космических полетов на длительное время стали неопределенными.

К ракетам-носителям для пилотируемых космических кораблей предъявляются самые высокие требования по надежности. Не на каждой ракете разрешается летать людям. В начале 70-х годов все прежние программы и проекты создания тяжелых ракет-носителей для пилотируемых полетов оказались закрыты. Но оставалось много специалистов, которые считали такие полеты важной государственной задачей. Среди них были и некоторые космонавты, в том числе еще не летавшие.

Вспомнилась история возникновения и создания лунного комплекса «Союз». До Луны «Союз» всерьез собирался дотянуться. А дальше? Более дешевого и разработанного проекта орбитального комплекса для дальних полетов в России в то время не было, и сейчас нет. Можно ли долететь на «Союзе» до Марса и вернуть-

ся обратно? Что нужно добавить и переделать, чтобы такая перспектива приблизилась к реальности?

Первое ограничение – энергетические запасы на борту стартующего комплекса. Баллистики оценивают их суммарным затрачиваемым на полет импульсом скорости. Авторы научно-популярных статей оценивают расходуемый импульс примерно так: «выведение ИСЗ на низкую геоцентрическую орбиту (с учетом всех потерь) требует ускорения до скорости 9 км/с, полет к Луне (в один конец) – до скорости более 12 км/с, а для путешествия к Венере или Марсу – не менее 40–50 км/с» [5, стр. 49]. Следовательно, чтобы долететь с околоземной орбиты до Луны нужно дополнительно затратить импульс скорости более 3 км/с. В [3, стр. 91] эта цифра уточняется: 3,14 км/с. Но хотелось бы еще вернуться на Землю. Тот же автор подсказывает: добавьте еще 2,5–3 км/с [3, стр. 103]. Это для облета Луны без выхода на орбиту ее спутника.

Такую минимальную программу планировалось выполнить на лунном «Союзе». Значит, в его баках планировалось при старте с околоземной орбиты иметь запас топлива для создания импульса скорости примерно 6 км/с. А какой дополнительный импульс скорости потребуется для полета на Марс?

В книге [2] на рисунке 8.2.1 на странице 276 показаны «энергозатраты для ускоренных траекторий облета Марса» в период 1970–1990 годов. В комментариях к графику указано, что при оптимальном выборе даты старта для облета Марса с возвращением к Земле потребный суммарный импульс скорости не превышает 6 км/с. Значит, с энергетикой в таком варианте у «Союза» больших проблем не будет? Необходимо учесть расход топлива на управление кораблем в период полета. Для этого потребуется включить в связку стартующих с околоземной орбиты еще один корабль – танкер.

Проблемы будут в других областях: полеты по таким маршрутам длятся два года. На это время экипажу надо обеспечить сносные условия существования.

В той же книге [2] на странице 278 на рисунке 8.2.3 изображены характеристики наиболее экономичных по расходу топлива (и суммарного импульса скорости) маршрутов полетов к Марсу с переходом на орбиту его искусственного спутника для периода 1970–1990 годов. Здесь минимальный потребный суммарный импульс скорости также не превышает 6 км/с. Значит, и в этом варианте с энергетикой у «Союза» особых проблем не будет. Время полета по таким маршрутам лежит в пределах от 900 до 1100 суток, то есть от 2,5 до 3 лет. Проблемы жизнеобеспечения экипажа здесь встанут более остро. Но и ценность такого полета значительно выше: время работы на орбите около Марса здесь составляет 330–450 суток. Ближайшее (в то время) «окно» для полета по экономичной траектории, по расчетам баллистиков, открывалось в 1973–1974 годах. Условия для такого полета повторяются примерно через 15,8 лет.

Во что обойдется снабжение экипажа марсианского корабля пищей, водой, средствами личной гигиены и другими расходуемыми материалами? Опыт и статистика автономных полетов кораблей «Союз» показали, что на кораблях на каждого члена экипажа расходуется в среднем 11–12 кг в сутки. На орбитальных станциях эта величина за счет систем регенерации была снижена до 9 кг в сутки. Но для «Союза» примем первую цифру. При такой норме на два года для одного космонавта потребуется иметь $12 \cdot 365 \cdot 2 = 8760$ кг груза, на три года – соответственно 13 140 кг. Доставить такое количество грузов на околоземную орбиту могли бы грузовые транспортные корабли снабжения, разработанные на базе кораблей 11К.

В то время уже шла разработка грузовых кораблей «Прогресс», которые позднее обеспечивали снабжение орбитальных станций «Салют», «Мир», и сейчас работают с Международной космической станцией. «Прогресс» может взять на борт более двух тонн груза [6, стр. 304]. Для обеспечения расходуемыми материалами полета одного космонавта на Марс, кроме доставки топлива кораблями 11К, потребовалось бы 4–6 таких грузовых кораблей.

Куда разместить этот груз на корабле, уходящем в далекую экспедицию? Упакованные средства личной гигиены и сублимированные продукты питания имеют средний удельный вес, близкий к удельному весу воды. Следовательно, для указанного количества грузов потребуется 9–13 кубометров объема. Свободный объем бытового отсека «Союза» около 4 м³. Занимать его грузами нельзя. Значит, нужен дополнительный блок в составе конструкции корабля. Включить в состав марсианского корабля грузовой отсек объемом порядка 13 кубометров не составило бы большого труда. К тому же, этот объем по мере освобождения мог быть использован в других целях.

Если эти проблемы будут решены, вслед за ним встанут проблемы навигации и управления полетом корабля. Но для решения этих проблем на корабле, летящем к Марсу, необходимы те же средства, что и на лунном корабле. Следовательно, и эти проблемы разрешимы.

У медиков были свои проблемы: выдержит ли психика человека такую нагрузку? Во-первых, полетов такой длительности еще не было. Во-вторых, как ни опасны околоземные полеты, в них есть шансы на поддержку и выручку с Земли в случае возникновения аварийных ситуаций. В полете к Марсу таких шансов просто не будет. Надеяться нужно будет только на себя и свой корабль. Это в принципе совершенно другая ситуация, чем в околоземных полетах. Риск в таком полете намного больше, чем около Земли, и это могло перегрузить психику космонавта.

Был еще один сложный вопрос: сколько человек брать на борт корабля? Для надежности – не менее двух. Для непрерывной работы на орбите около Марса – не менее трех. При этом соответственно возрастут веса и объемы грузов, которые нужно доставить и разместить на отлетающем комплексе.

Из перечисленных выше, проблема включения в состав комплекса дополнительных блоков представлялась наиболее сложной. Упростить ее решение можно было только за счет сокращения числа членов экипажа.

Срок пребывания на орбите искусственного спутника Марса – сотни суток. Можно особенно не спешить с наблюдениями и не вводить в состав экипажа третьего человека. В истории мореплаваний известны кругосветные путешествия, совершенные одним человеком и длившиеся более года. Учитывая это, может быть, наиболее разумно и расчетливо отправить в дальнее космическое путешествие одного космонавта?

Много времени ушло на обдумывание этих и других проблем. Среди факторов, которые учитывались, заметную роль играло мнение баллистиков головного НИИ космической отрасли – ЦНИИмашиностроения. Полет человека к Марсу некоторые из них тоже считали важным и возможным. Одним из необходимых условий его успешного выполнения было наличие на борту корабля, летящего к Марсу, космонавта, подготовленного для активного и надежного участия в навигационно-баллистическом обеспечении и управлении полетом.

В течение многих лет над решением проблемы полетов на Марс в РКК «Энергия» работает группа специалистов под руководством Л.А. Горшкова. Они

разрабатывают шестиместный корабль, намного более тяжелый и дорогой, чем лунный «Союз». Но о полете к Марсу на «Союзе» больше никто не вспоминает.

За прошедшие годы многое изменилось в нашей стране и в мире. Неоднократно повторялись условия для наиболее экономичных полетов на Марс. Следующее «окно» для старта появится примерно через пятнадцать лет. Поднимался и заглох вопрос об организации международной экспедиции на Марс. Эта идея сейчас решается на более скромном уровне в образе околоземной международной космической станции. Но мысль о полетах к планетам жива. Прошли по экранам кинотеатров и телевизоров фильмы Стэнли Кубрика «Космическая одиссея. Год 2001-й» о полете к Юпитеру и Андрея Тарковского «Солярис». Юпитер далеко. До Марса значительно ближе. Может быть, приближается время вспомнить призыв Фридриха Артуровича Цандера: «Вперед на Марс!»?

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Основы теории полета космических аппаратов. Под ред. докт. физ.-мат. наук Г.С. Нариманова и докт. техн. наук М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с. (Серия «Основы теории полета и проектирования космических аппаратов»).
- [2] Соловьёв Ц.В., Тарасов Е.В. Прогнозирование межпланетных полетов. – М.: Машиностроение, 1973. – 400 с.
- [3] Тарасов Е.В. Космонавтика. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.
- [4] Кубасов В.Н., Дашков А.А. Межпланетные полеты. – М.: Машиностроение, 1979. – 272 с., ил.
- [5] Гришин С.Д., Чекалин С.В. Космический транспорт будущего. – М.: Знание, 1983. – 61 с., ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 11).
- [6] Космонавтика: Энциклопедия / Гл. ред. В.П. Глушко – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 528 с., ил.
- [7] Салахутдинов Г.М. Фридрих Артурович Цандер (к 100-летию со дня рождения). – М.: Знание, 1987. – 64 с., ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 3).
- [8] Мишин В.П. Почему мы не слетали на Луну? – М.: Знание, 1990. – 64 с., ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 12).
- [9] Афанасьев И.Б. Неизвестные корабли. – М.: Знание, 1991. – 64 с., ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 12)
- [10] Черток Б.Е. Ракеты и люди. Горячие дни холодной войны. – М.: Машиностроение, 1997. – 536 с., [2] л. ил. (Третья книга воспоминаний).
- [11] Брыков А.В. У космоса в плену. – М.: Изд-во Центра перспективных технологий Международной инженерной академии, 2000. – 120 с.

**МАТЕРИАЛЫ СЕДЬМОГО МЕЖДУНАРОДНОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО КОНГРЕССА IAC'12,
ПОСВЯЩЕННОГО 55-ЛЕТИЮ ЗАПУСКА
ПЕРВОГО ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ
(представленные сотрудниками ЦПК)**

(МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва)
26–31 августа 2012 года)

**PROCEEDINGS OF THE SEVENTH INTERNATIONAL
AEROSPACE CONGRESS DEDICATED TO THE 55TH ANNIVERSARY
OF LAUNCHING THE FIRST ARTIFICIAL EARTH SATELLITE
(PRESENTED BY MEMBERS OF THE GCTC)**

(M.V. Lomonosov Moscow State University, August 26–31, 2012)

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ
(ОТБОР, ПОДГОТОВКА, КОСМИЧЕСКИЙ ПОЛЕТ,
ПОСЛЕПОЛЕТНАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ)**

Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Сохин И.Г.
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Жизненный цикл профессиональной деятельности космонавтов включает в себя последовательно стадии отбора, подготовки к космическому полету, выполнения космического полета в составе экипажей пилотируемых космических объектов (ПКО) и послеполетной реабилитации. Особенностью профессиональной деятельности космонавтов является необходимость приобретения первичного «космического» опыта в наземных условиях. Наземную составляющую профессиональной деятельности космонавтов обеспечивает комплекс отбора, подготовки и реабилитации космонавтов (КОПРК), созданный на базе российского Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина.

В настоящее время КОПРК является самостоятельным необходимым элементом космической инфраструктуры, без которого невозможно осуществление пилотируемых полетов в космос. Основные черты современного облика КОПРК приобрел в середине 70-х годов, когда наряду с обеспечением задач подготовки космонавтов к выполнению автономных полетов на пилотируемых космических аппаратах (ПКА), возникли задачи подготовки космонавтов к испытаниям и эксплуатации больших орбитальных комплексов. В ходе реализации национальных и международных программ (от кораблей типа «Восток» до Международной космической станции) он приобрел способность эффективно адаптироваться под различные проекты. КОПРК «научился» быть динамичной системой. Его отличительными особенностями являются научная обоснованность, способность к интеграции достижений науки и техники и обеспечению эффективной подготовки космонавтов в различных условиях. За прошедшие полвека он обеспечил эффективное выполнение множества пилотируемых программ.

В докладе рассматривается современное состояние российского КОПРК, стоящие перед ним проблемы и пути их решения.

**TOPICAL PROBLEMS OF COSMONAUT PROFESSIONAL ACTIVITY
(SELECTION, TRAINING, SPACEFLIGHT,
POST-FLIGHT REHABILITATION)**

Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Sokhin I.G.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The life cycle of a cosmonaut professional activity includes the following phases: selection, training for space mission, performance of space mission as the member of a manned space vehicle crew, and post-flight rehabilitation. The feature of professional cosmonaut activity is the necessity to acquire the primary "space" experience under the ground conditions. The ground-based component of cosmonaut professional activity is provided by Cosmonaut Selection, Training & Rehabilitation Complex (CSTRC), created at the Russia's Gagarin Cosmonaut Training Center.

At present the CSTRC is an essential independent element of space infrastructure without which the implementation of manned space missions is impossible. The CSTRC got its main features in the mid-70s, when along with cosmonaut training for autonomous flights aboard manned space vehicles (MSV) the tasks of cosmonaut training for testing and operating the large orbital complexes appeared. In the course of realization of national and international programs (from Vostok-type spaceships to International Space Station) the complex acquired the ability of effective adaptation to the various projects. The CSTRC "has learned" to be a dynamic system. Its distinguishing features are as follows: scientific validity, ability to integrate scientific and technical achievements and to provide effective training of cosmonauts under different conditions. Over the past half a century it has ensured effective implementation of many manned programs.

The report examines the current status of Russia's CSTRC, challenges it faces and ways of meeting them.

* * *

**ОПЫТ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ
К ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

Курицын А.А., Харламов М.М.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В докладе проведен анализ повседневной деятельности на борту МКС, а также распределение полетного времени экипажа по направлениям деятельности.

Показано, что объем и сложность операций, выполняемых на МКС космонавтами, значительно превышают эти показатели на станции «Мир», что оказывает существенное влияние на требования к подготовке совместных экипажей.

Одной из главных особенностей профессиональной подготовки космонавтов и астронавтов является необходимость приобретения первичного «космического» опыта в наземных условиях. Подготовка в реальных условиях космического полета невозможна из-за чрезвычайной опасности и дороговизны. Космонавты и астронавты должны приобретать «космический» опыт на наземных тренажерах, на которых моделируются условия деятельности экипажей космических кораблей и станций. Представлены цели и задачи подготовки космонавтов к деятельности на борту МКС.

Показаны основные технические средства подготовки космонавтов, которыми являются специализированные и комплексные тренажеры транспортных кораблей «Союз» и орбитальных модулей российского сегмента Международной космической станции. Тренажеры созданы на базе полномасштабных макетов реальных изделий, оснащены полным комплектом бортового и научного оборудования, современной системой имитации внешней визуальной обстановки, соответствующим программным обеспечением.

Выделен ряд специализированных тренажеров и технических средств, моделирующих различные факторы космических полетов, а также штатные и нештатные условия посадки на Землю. Обоснована необходимость использования в подготовке космонавтов виртуальных и компьютерных тренажеров на базе ПЭВМ.

EXPERIENCE IN COSMONAUT TRAINING FOR PROFESSIONAL ACTIVITY ABOARD THE INTERNATIONAL SPACE STATION

Kuritsyn A.A., Kharlamov M.M.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The report analyses an everyday activity aboard the ISS, flight time scheduling according to crew activity directions.

It is shown that the scope and complexity of operations performed by cosmonauts aboard the ISS far exceed those aboard the "Mir" orbital complex. This fact has a significant impact on requirements for training of joint crews.

One of the main peculiarities of cosmonaut and astronaut professional training is the necessity to obtain the basic "space" experience under the ground conditions. Training in real space flight is extremely dangerous and expensive. Cosmonauts and astronauts have to obtain their "space" experience on dedicated simulators, which simulate conditions of crew activity aboard spacecraft and space stations. The report presents aims and tasks of cosmonaut training for activity aboard the ISS.

The report represents also the main technical means of cosmonaut training, such as integrated and dedicated simulators of the "Soyuz" space vehicle and orbital modules of the ISS RS. The simulators are based on full-scale models of real objects, equipped with a full set of onboard and scientific hardware, a modern system of external vision simulation, relevant software.

A number of dedicated simulators and technical means, which simulate various factors of space flight, nominal and off-nominal conditions of landing are discussed. The report substantiates the necessity of using PC-based virtual simulators and other training facilities.

* * *

АДАПТИВНО-КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ В ИНТЕРЕСАХ ГАРАНТИРОВАННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Сохин И.Г.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В докладе рассматривается проблема гарантированного обеспечения требований по безопасности и надежности космических полетов с учетом состояний подготовленности космонавтов.

Проблема обеспечения безопасности и надежности пилотируемых космических полетов продолжает оставаться одной из наиболее актуальных и, вместе с тем, трудноразрешимых проблем использования авиационно-космической техники и снижения рисков чрезвычайных происшествий. Большая роль в обеспечении безопасности космических полетов принадлежит экипажу пилотируемого космического объекта (ПКО), на который возложены функции контроля состояния, обнаружения и идентификации нештатных ситуаций, осуществления необходимых действий по выходу из них. Нештатные ситуации космического полета, с точки зрения деятельности экипажа ПКО, характеризуются широким разнообразием условий проявления и способов парирования, неопределенностью информации, необходимостью принятия альтернативных решений и т.п. Поэтому одной из важных составляющих комплексной проблемы обеспечения безопасности и надежности пилотируемых космических полетов является эффективное управление качеством тренажерной подготовки космонавтов, обеспечивающее достижение требуемых состояний их подготовленности к деятельности в нештатных ситуациях, заданных на вероятностных мерах. Однако современные подходы к управлению подготовкой космонавтов, основанные на оценивании конечных результатов их деятельности, не обеспечивают возможности получения статистических оценок вероятности безошибочного парирования космонавтами множества всех расчетных нештатных ситуаций. Следовательно, не обеспечивается эффективное управление качеством подготовки космонавтов в условиях ограничений сроков и объемов их подготовки.

Для решения данной проблемы в докладе предлагается один из перспективных подходов к управлению качеством подготовки космонавтов к деятельности в нештатных ситуациях космического полета, основанный на использовании математических моделей компетентности космонавтов. Данный подход и связанные с ним технологии основаны на переходе от традиционной динамической системы «вход–выход» к динамической системе с внутренними пространствами состояний «вход–состояние компетентности–выход». В качестве научного фундамента адаптивно-компетентностного подхода предлагается использовать разработанный автором метод адаптивного моделирования состояний компетентности космонавтов в процессе их тренировок на тренажерах.

**ADAPTIVE COMPETENCE-BASED APPROACH
TO THE PROBLEM OF COSMONAUT TRAINING QUALITY MANAGEMENT
FOR ENSURING SPACEFLIGHT SAFETY AND RELIABILITY**

Sokhin I.G.

State Organization “Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center”

The report addresses the problem of guaranteed meeting the requirements for safety and reliability of space missions taking into account the level of cosmonaut preparedness to flight.

The problem of ensuring safety and reliability of a spaceflight remains one of the most topical and at once intractable problems of using aerospace engineering and decreasing risk of emergencies. The significant role in ensuring the spaceflight safety belongs to the crew, entrusted with the functions of status monitoring, detection and identification of off-nominal situations, performing appropriate actions to mitigate them. In terms of crew activity off-nominal situations in a spaceflight are characterized by a wide variety of conditions of their manifestation and methods to mitigate them, ambiguity of information, necessity for alternative solutions, etc. That is why the important component of the comprehensive problem of ensuring spaceflight safety and reliability

is the effective management of quality of ground simulator-based cosmonaut training which provides the required level of cosmonaut preparedness for activity in off-nominal situations on the basis of probabilistic measures. However, current approaches to management of cosmonaut training, based on the evaluation of outcomes of their activities, do not allow cosmonauts to estimate statistically the probability of error-free mitigation of the whole range of expected off-nominal situations. Hence it appears that the adequate management of training under conditions of time and scope restrictions is not being provided.

To solve this problem the report suggests one of the most promising approaches to quality management of cosmonaut training for the activity in off-nominal situations using mathematical models of a cosmonaut's competence. This approach and related technologies are based on the substitution of the traditional "input-output" system by a "in-state of competence-out" system. The author proposes to use developed by him method of adaptive modelling of a cosmonaut's competence status in the course of simulator-based training as the scientific basis for the competence-based approach.

* * *

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ СБЛИЖЕНИЯ, ПРИЧАЛИВАНИЯ И СТЫКОВКИ

Бурдаев М.Н., Саев В.Н.
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования методов и алгоритмов контроля качества выполнения экипажем пилотируемых космических аппаратов (ПКА) динамических операций при тренировках на тренажерах сближения, причаливания и стыковки.

На основе единого методологического подхода относительное движение ПКА и важнейшие характеристики процессов управления были представлены в аналитических и геометрических формах на плоскости промаха в виде семейств траекторных годографов положений и изолиний обобщенных параметров. Исследованы общие уравнения границ областей возможного управления при заданных максимальном и минимальном значениях угловой скорости линии визирования, максимальных величинах углового и тангенциального ускорений в системах управления ПКА. Определены реально возможные сочетания границ областей управления опасных для сближения или приводящих к срыву выполнения режима.

Вводится понятие предельных рубежей причаливания, которое позволяет рассчитать, проанализировать и наглядно показать их на экране монитора. Определены экономичные рубежи причаливания, получены их обобщенные уравнения и предложен метод их расчета.

Разработан комплекс программ для тренажера сближения, причаливания и стыковки, позволяющий инструктору контролировать качество выполнения экипажем тренировочного упражнения, вовремя отмечать ошибки, допущенные экипажем, которые не позволяют правильно и в отведенное время выполнить упражнение.

**METHODS AND ALGORITHMS OF QUALITY CONTROL
OF PERFORMING DYNAMIC RENDEZVOUS, BERTHING,
AND DOCKING OPERATIONS BY A CREW**

Burdaev M.N., Saev V.N.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The paper discusses issues of development and studying methods and algorithms of quality control of performing dynamic rendezvous, approaching, and docking operations by a crew of manned space vehicle during simulator-based training.

On the basis of the unified methodological approach, the relative motion of MSV and key parameters of control processes are presented in analytical and geometrical forms on a miss plane as a family of orbital hodographs of positions and isolines of generalized parameters. The general equations for boundaries of the feasible control areas under specified maximal and minimal values of angular motion of a sighting line, maximal values of angular and tangential accelerations in MSV's control systems have been analyzed. The feasible combinations of control area boundaries which present serious hazard to rendezvous operations or can lead to the failure of operation mode are defined.

The notion of berthing boundaries which allows calculating, analyzing and presenting them on the monitor screen is introduced. The effective berthing boundaries and generalized equations for calculating them are also defined in the paper.

The software package supporting the rendezvous, berthing and docking simulator was developed. It allows the instructor to monitor the quality of performing training exercises by a crew and promptly remark the errors which make it impossible to perform exercises correctly and in time.

* * *

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО БАЗИСА
ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ**

Наумов Б.А.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

За последние 40 лет было создано шесть долговременных орбитальных станций (ДОС). Последним отечественным ДОСом был орбитальный пилотируемый комплекс (ОПК) «МИР», который проработал в космосе 15 лет. Последние 12 лет в космосе активно функционирует ОПК Международной космической станции. Характерными особенностями последних ОПК является многомодульность конструкции и длительность эксплуатации. Создание и монтаж на орбите таких комплексов происходит поэтапно в течение нескольких лет.

Программа полета на ОПК определяет требования и задачи по подготовке будущих экипажей. Эти задачи определяют облик и состав комплекса технических средств подготовки космонавтов (ТСПК), который предназначен для практической отработки экипажами всех элементов космического полета. Основными компонентами данного комплекса являются тренажеры транспортных пилотируемых кораблей и орбитальных модулей, имитаторы условий космического полета, средства подготовки по работам в открытом космосе, технические средства, предназначенные для проведения теоретической и практической подготовок, средства подготовки к действиям после посадки и т.д. К примеру, комплекс технических средств, предназначенный для подготовки по российскому сегменту Международной космической станции, включает в себя около 100 различных по назначению, видам и типам компонентов.

При формировании комплекса ТСПК для решения задач подготовки космонавтов по конкретному ОПК необходимо определить:

1. Какие из имеющихся технических средств подготовки можно использовать и какие виды доработок и модернизации необходимо при этом провести.
2. Какие технические средства подготовки необходимо разрабатывать и создавать.

Основными критериями при проектировании нового комплекса ТСПК являются сроки разработки и создания, качество технических средств, пропускная способность и стоимость.

Создание рационального комплекса ТСПК с учетом сжатых сроков его разработки и создания, многофункциональности решаемых задач, взаимосвязи многих компонентов комплекса, требований по качеству является сложной научно-технической проблемой.

В статье предложены основные теоретические положения по проектированию рационального комплекса ТСПК.

TO THE QUESTION OF FORMATION OF THE THEORETICAL BASIS FOR DESIGNING THE COSMONAUT TRAINING COMPLEXES

Naumov B.A

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

Over the last 40 years six long-term manned orbital stations were created. The last one was the orbital complex MIR, which functioned in space for 15 years. ISS has been operating on the orbit for the last 12 years. The latest manned orbital complexes are characterized by a multi module construction and a long operation time. Such complexes are developed and deployed on orbit gradually for several years.

The spaceflight program aboard an orbital complex defines requirements and tasks for training of the future crews. These tasks define the configuration and components of the simulator complex designed for practicing all spaceflight procedures by a crew. The main components of the complex are as follows: simulators of manned transport spacecraft and orbital modules, spaceflight simulator, training facilities for extravehicular activity, theoretical and practical training media, and training means for post-landing operations, etc. For example, the simulator complex designed for ISS RS training includes about 100 components of different purpose and types.

To meet requirements of cosmonaut training for a specific orbital complex it is necessary to determine:

1. Available simulators and kinds of improvements and upgrading which should be carried out.
2. Simulators which should be developed and built up.

The key factors when designing a new simulator complex are the term of its designing and building as well as the issues of quality, capacity, and cost.

The problem of creation of the adequate multifunctional simulator complex considering tight deadline of its development, need for ensuring interconnection between its components and meeting quality requirements is a complicated one.

The paper describes the basic theoretical principles for designing the rational complex of cosmonaut training devices.

* * *

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТРЕНАЖЕРОВ

Шевченко Л.Е.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В докладе рассмотрены основные тенденции развития космических тренажеров, выявленные на основе опыта разработки и эксплуатации тренажеров по всем российским космическим программам. Показано, что основные тенденции определяются двумя взаимно обусловленными аспектами – требованиями, предъявляемыми к космическим тренажерам, и техническим уровнем существующей элементной базы.

Основная техническая тенденция формировалась в результате перехода от автономной структуры тренажера к многомашинным комплексам и затем к тренажерным системам. Перспективной тенденцией является создание интегрированных тренажерных комплексов, имитирующих различные национальные орбитальные модули МКС и расположенных в разных странах (Россия, США, Европейские государства, Япония).

Постоянными тенденциями на протяжении реализации всех программ являлись:

- улучшение дидактических возможностей, которое осуществлялось в двух направлениях – это повышение адекватности модели объекта и совершенствование системы оценки и контроля деятельности операторов;
- специализация тренажеров;
- вторичное использование технических и программных компонентов тренажеров и доработка для последующих программ.

TRENDS AND EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF SPACE SIMULATORS

Shevchenko L.E.

State Organization “Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center”

The report describes the main trends of development of space simulators, identified on the basis of experience in the development and operation of training simulators for all Russian space programs. It is shown that the main trends are determined by two mutually conditioned aspects - requirements for space simulators, and the technical level of the existing components.

The key technical tendency has become a result of transition from the autonomous structure of the simulators to multicomputer complexes and then to the simulator systems. A promising trend is the creation of integrated training systems that simulate a variety of national orbital modules of the ISS and are located in different countries (Russia, USA, European states, Japan).

The stable trends for all past and present programs are as follows:

- improvement of the didactic opportunities, realized in two directions, namely: increasing the adequacy of the object model and perfecting the system of evaluation and monitoring of an operator activity;
- specialization of simulators;
- reuse of hardware and software components of the simulator and their upgrading for follow-up program.

* * *

**МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
В ТРЕНАЖЕРАХ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Полунина Е.В.
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В докладе рассматриваются общие принципы моделирования бортовых систем пилотируемых космических аппаратов на тренажерах, отвечающие назначению тренажеров и позволяющие реализовать в полной мере их обучающие свойства. Обсуждаются современные технологии создания космических тренажеров, существующие методы и средства моделирования бортовых систем.

Приводится анализ способов моделирования бортовых вычислительных комплексов на тренажерах и в качестве перспективного выбирается функциональное (математическое) моделирование. Показывается основная проблема функционального моделирования бортовых вычислительных комплексов, состоящая в описании объекта моделирования, учета в этом описании не только реализуемых алгоритмов управления, но и организации вычислительного процесса.

Приводятся результаты сравнительного анализа известных методов имитационного моделирования сложных систем, к классу которых относятся бортовые вычислительные комплексы, по таким показателям как мощность моделирования, наглядность построенной модели, возможность контроля и управления моделью в процессе ее реализации, затраты на модификацию модели. В качестве формализма для описания бортовых вычислительных комплексов и построения на его основе средств имитационного моделирования предложены модифицированные сети Петри.

**METHODS OF MODELLING ONBOARD COMPUTATION COMPLEXES
IN MANNED SPACECRAFT SIMULATORS**

Polunina E.V.
State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The report considers the general principles of modelling onboard spacecraft systems, which answer the purpose of simulators and allow realizing in full their properties and also discusses current technologies of space simulator creation as well as existing methods and means of modelling onboard systems.

Also, the report presents an analysis of methods of modelling onboard computational complexes which has demonstrated the advantages of the functional (mathematical) modelling. It is shown that the key problem is the description of modeled objects in which both control algorithms and arrangement of computational processes should be taken into account.

Results of the comparative analysis of the well-known methods of complex systems simulation modelling (to which onboard computational complexes belong) for such parameters as power of modelling, demonstrativeness of the developed models, controllability of a model while realizing it, cost of a model modification are shown. Modified Petri nets are proposed as a tool of formalizing the description of onboard computational complexes and generating description-based means of simulation modelling.

* * *

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ТЕХНОЛОГИЙ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА ЭКИПАЖАМИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА МКС**

Васильев В.И., Крючков Б.И., Гордиенко О.С., Сохин И.Г.
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

На борту российского сектора Международной космической станции (РС МКС) создан аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий визуально-инструментальные наблюдения (ВИН) наземных, атмосферных и космических объектов и явлений с использованием космонавтами ручных средств регистрации. В состав комплекса входят: 1) бортовая баллистико-навигационная система поддержки экипажа «Сигма»; 2) ручная фотоаппаратура Nikon с набором объективов, обеспечивающих съемку в условиях, адекватных наблюдению невооруженным глазом, и с фокусным расстоянием до 1200 мм. Это позволяет получать высококачественные цветные снимки с разрешением на местности до 2–5 метров; 3) в распоряжении экипажа имеется фотоспектральная система и спектрометр «Фиалка МВ космос».

В настоящее время происходит стремительное развитие ручных средств фотосъемки, что позволяет эффективно их использовать совместно с беспилотными системами мониторинга. К основным преимуществам ВИН по сравнению с другими методами ДЗЗ следует отнести: обзорность, оперативность, универсальность, генерализацию, селективность, устойчивость к помехам (способность получения полезной информации в широком диапазоне световых помех).

Имеющиеся бортовые ручные средства фотосъемки позволяют решить силами космонавтов большой круг задач по наблюдению за пожарной обстановкой, последствиями стихийных бедствий (оценка разрушений). Кроме того, они позволяют выполнить оперативный мониторинг внезапных природных и техногенных катастроф, мониторинг промышленных территорий, контролировать загрязнение нефтепродуктами акваторий морских портов, потенциально опасных природных объектов, а также решать другие задачи.

Для обеспечения продуктивной работы экипажа РС МКС необходимо на Земле создать группу поддержки, имеющую постоянную связь со службами прогноза возможных катастроф и службами контроля ЧС. Эта группа поддержки должна обеспечить экипажу оперативное целеуказание для выполнения наблюдений интересующих объектов и явлений. Кроме этого, на борту РС МКС должна быть создана информационная база данных потенциальных объектов наблюдения с соответствующими комментариями.

Основную роль в готовности космонавта к выполнению задач ВИН играет наличие технических средств подготовки, информационных ресурсов и целевой программы подготовки. В настоящее время в ЦПК создается динамический стенд-тренажер для подготовки космонавтов по задачам ВИН.

Опыт целевой подготовки космонавтов был приобретен Центром подготовки космонавтов в период с 1992 по 1999 годы. Тогда на базе ЦПК была реализована переподготовка нескольких групп специалистов субъектов Российской Федерации по направлению «Комплексные наземные и аэрокосмические методы изучения окружающей среды в интересах экологически сбалансированного природопользования». В составе этих специализированных групп прошли подготовку пять космонавтов ЦПК, которые совершили космические полеты. Учебный процесс для этих групп строился как междисциплинарный и межотраслевой, что обеспечивало

комплексный характер изучения природной среды специалистами данной территории в интересах экологически сбалансированного природопользования. Космонавтам такая подготовка позволила освоить целевые методики наблюдений из космоса.

**CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS
OF THE VISUAL-INSTRUMENTAL OBSERVATION OF THE EARTH FROM
SPACE BY CREWS OF ISS RUSSIAN SEGMENT**

Vasilyev V.I., Kryuchkov B.I., Gordienko O.S., Sokhin I.G.
State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The hardware-software complex was created aboard Russian Segment of International Space Station (ISS RS) to support visual instrumental observation (VIO) of ground, atmospheric, and space objects and phenomena using manual recording means. The complex includes: 1) ballistic-navigation system "Sigma" for crew support; 2) hand photo camera "Nikon" with various lenses which provide photographing under conditions similar to observation with the naked eye, and with focal distance under 1200 mm. It allows receiving high-quality color photos with resolution up to 2–5 m; 3) photo-spectral system and spectrometer "Fialka MV kosmos".

We are currently witnessing the rapid development of hand photographic cameras what allows using them effectively together with unpiloted monitoring systems. The key advantages of visual instrument observation as compared to earth remote sensing (ERS) are as follows: visibility, operational efficiency, flexibility, generalization, selectivity, noise tolerance (ability to get useful information in a wide range of light interference).

Available onboard hand photographic cameras allow cosmonauts to monitor fire situation, aftermaths of natural disasters (damage assessment). Besides, they make possible to monitor sudden natural and technogenic catastrophes, industrial areas, oil pollution of sea harbor waters, potentially dangerous natural objects as well as to solve other problems.

To provide an efficient work of a crew aboard ISS RS it is necessary to form a ground support group, having fixed communication with forecasting services and emergencies control services. This support group should provide a crew with an operative target pointing on objects and phenomena of interest. Database of potential objects of observation with relevant comments should be created aboard ISS RS.

Technical training means, informational resources, and the purpose-oriented training program play the primary role for training cosmonauts for performing VIO. Currently the dynamic simulator stand for VIO training is being created at CTC.

Experience in purpose-oriented training was obtained by Gagarin Cosmonaut Training Center between 1992 and 1999. At that time a few groups of experts from the Russian Federation's entities completed retraining in «Complex methods of ground-based and aerospace investigation of environment with a view of ensuring balanced ecosystem exploitation» at GCTC. Five CTC's cosmonauts also completed this retraining course. The training process was based on the interdisciplinary and interindustry basis, ensuring the complex character of investigation of natural environment for purposes of environmentally balanced natural management. Such training allowed cosmonauts to master target-oriented techniques of observation from space.

* * *

**ОСОБЕННОСТИ ДИАЛОГОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КОСМОНАВТОВ С РОБОТОМ-ПОМОЩНИКОМ
ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
ПРИ РЕШЕНИИ ПОЛЕТНЫХ ЗАДАЧ**

Крючков Б.И., Усов В.М.
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В связи с возросшим вниманием к использованию технологий робототехники актуально уточнить области приложения конкретных типов роботов и потенциальные сценарии их применения, чтобы экипаж мог более оперативно, надежно и безопасно выполнять задачи на космических комплексах (КК). Рассматриваются длительно существующие на орбите КК, в том числе размещаемые на орбитах искусственных спутников Земли (ИСЗ) вплоть до радиационно-опасных орбит ИСЗ, и КК, стационарно размещаемые на Луне и Марсе. Ожидается, что в длительных межпланетных полетах перечень неблагоприятных для человека воздействий будет еще более широким, чем при полетах орбитальных станций, а сами воздействия – «жестче» и опаснее. С учетом этого обстоятельства особый интерес представляют роботы-помощники экипажа (РПЭ). Для того, чтобы эффективно использовать РПЭ на КК, необходимо исследовать состав и структуру совместной деятельности космонавта и включенного в экипаж РПЭ, а также факторы, влияющие на надежность деятельности. Это достигается: 1) эргономическим проектированием совместной деятельности членов экипажа КК и РПЭ; 2) проектированием естественной для человека коммуникативной среды; 3) испытанием РПЭ в модельных и натуральных условиях с участием опытных космонавтов (как наиболее глубоко и реалистично представляющих себе потенциальные условия применения РПЭ) и испытателей-добровольцев (специально отобранных и обученных применению роботов); 4) обучением космонавта методам и способам коммуникации с РПЭ; 5) комплексной подготовкой экипажа КК в полном составе с РПЭ; 6) экспериментальной отработкой разных вариантов распределения функций, способов инициирования «поведенческой активности» РПЭ и ее контроля в ходе выполнения плановых операций; 7) отработкой правил безопасности труда. Сегодня существует ряд технических средств подготовки космонавтов, начиная от учебных компьютеризированных классов и лабораторных стендов до полунатурных макетов и натуральных моделей, имитирующих воздействие факторов среды. Актуален вопрос о дополнительных средствах тактической подготовки, реализующих психолого-педагогические методы обучения космонавтов диалоговому взаимодействию с РПЭ в ситуации принятия и реализации решений. Именно естественность способа общения составляет главную особенность построения диалога с РПЭ при решении оперативных задач. Для компьютерного «подыгрыша» могут использоваться современные технологии имитационного моделирования, в том числе, виртуальные аналоги РПЭ. Анализ вариантов поддержки деятельности экипажа приводит к рассмотрению роботов следующих типов: антропоморфных, мобильных, манипуляционных и автономных. Кроме того, в рассмотрение попадают роботы, снабженные аналогами органов чувств, высокоселективные по способности опознания предметов, агрегатов и окружающих людей, когнитивные (способные к диалогу на ограниченном диалекте естественного языка в форме собственных речевых сообщений и семантически значимых «запрограммированных» жестов) и имеющие канал получения «обратной связи» посредством распознавания речи и

жестов космонавтов. Выбор РПЭ антропоморфного типа вытекает из того факта, что конструкция большинства узлов и модулей на КК оптимизирована для антропометрических характеристик человека (совместимость в рабочей зоне). Кроме того, в этом варианте легче реализовать управление посредством экзоскелетона. Перспективная задача – синтезировать в едином решении робототехнические изделия с разным функционалом и высокой защищенностью от помех на КК (шумы, вибрации, радиационный фактора, условия микрогравитации и др.).

FEATURES OF DIALOGUE INTERACTION OF COSMONAUTS WITH ROBOT-ASSISTANT OF THE SPACE COMPLEX'S CREW WHILE PERFORMING MISSION TASKS

Kryuchkov B.I., Usov V.M.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

Due to the increased attention to robotics technology, this is topical to define the application field of specific types of robots and potential scenarios of their application, in order that a crew will be able to perform mission tasks more quickly, reliably and safely. The long-existing on-orbit space complexes (SC) including those which are placed on the orbits of artificial earth satellites (AES) and even the radiation-hazardous orbits as well as permanent bases on the surface of the Moon and Mars are discussed. It is expected that in the course of the long interplanetary flights the list of adverse environmental effects on a man will be longer than when flying aboard space stations, and the effects will be more severe and dangerous. With this in mind the usage of the robotic assistants for crew support (RACS) is of special interest.

In order to take advantages of the RACS aboard space complexes it is necessary to investigate the content and structure of joint activity of a cosmonaut and a robotic assistant, included in the crew, as well as factors affecting the reliability of the crew's activity.

This is achieved by: 1) ergonomic planning the joint activities of the crew members and the RACS, 2) development of the natural communicative environment for a man, 3) testing RACS under simulated and field conditions with the participation of cosmonauts with spaceflight experience (as the most deeply and realistically knowledgeable the real conditions of robots application) and test volunteers (specially selected and trained for the use of robots), 4) cosmonaut training for methods and techniques of communication with the RACS, 5) integrated training of a crew in full complement with RACS, 6) experimental working out various options of the allocation of functions, ways of initiation of «behavioral activity» of RACS and its control in the course of execution of planned operations, and 7) working out safety rules. Today there are a number of technical means of cosmonaut training, ranging from computer-based classrooms and laboratory stands to scaled-down and full-size models that simulate the effects of environmental factors.

The issue of additional tactical training means that make possible the usage of psychological and pedagogical methods of cosmonaut training for dialog with the RACS in a situation of making and implementing decisions is a topical one. The natural way of communication is the principal feature of dialoging between crewmen and the robot while solving operational problems. Modern simulation modelling technology, including virtual robotic assistant prototypes can be used for the computer "playing along". Analysis of options to support activities of the crew has shown that the following types of robots should be dealt with, namely: anthropomorphic, mobile, manipulating and autonomous. Besides, the sensor-equipped robots which have high selective ability to identify objects, accessories, and people around them as well as the "cognitive robots" (capable to communicate using a limited dialect of natural language by means of own voice communications and semantically meaningful "programmed" gestures) which have a "feedback" channel for recognition of cosmonaut speech and gestures should be also taken into consideration. Selection of the anthropomorphic RACS is accounted for the fact that most components and modules of space complexes are optimized considering anthropometric characteristics of a man (to ensure compatibility in the work area). Also, this version makes it possible to exercise exoskeleton control.

The long-term goal is to synthesize in a single solution various robotic devices having different functionality and high protection against such interferences as noise, vibration, radiation, microgravity, etc. on the space complexes.

* * *

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ
АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ**

Зайцев М.А.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В докладе рассматриваются вопросы, связанные с созданием антропоморфной (человекоподобной) робототехнической системы (АфРТС), реализацией принципа партнерства человека и машины при работе в открытом космосе; перспективы создания самостоятельной системы, способной работать в экстремальных условиях, в которых присутствие человека нежелательно.

Рассмотрены возможные сценарии участия АфРТС при внекорабельной деятельности космонавта.

Проведен анализ исследований, разработок, испытаний и использования подобных систем зарубежными специалистами космических агентств, научных лабораторий и коммерческих организаций.

Разработаны рекомендации по формированию концепции будущей АфРТС, а также принципы подхода к ее проектированию и их экономическая целесообразность.

**PROPOSALS FOR THE DEVELOPMENT OF ANTHROPOMORPHIC
ROBOTIC SYSTEM FOR EXTRAVEHICULAR ACTIVITY SUPPORT**

Zaytsev M.A.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

The report addresses issues of creating the anthropomorphic (humanoid) robotic system (ARS), realizing the concept of a man – machine cooperation in space, and prospects of designing a self-contained system, capable to operate under extreme conditions in which human presence is undesirable.

Besides, the different scenarios of participation of the ARS in extravehicular activity of a cosmonaut are discussed.

The analysis of research, development, testing, and use of such systems by specialists of foreign space agencies, research laboratories, and commercial organizations has been made.

Recommendations for the development of the future ARS concept, design philosophy and economic feasibility of the project are also presented.

* * *

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ПИЛОТИРУЕМОЙ КОСМОНАВТИКЕ

Ядревский К.С.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Человек в процессе трудовой деятельности и в повседневной жизни привык взаимодействовать с окружающей средой с помощью движений. Вне зависимости от того, происходит ли это взаимодействие с использованием простых орудий труда или сложных человеко-машинных интерфейсов, в конечном счете оно сводится к мышечным усилиям как основному управляющему воздействию. Однако такой способ управления не единственный, более того, иногда в силу особенностей системы или среды управления он может быть не оптимален.

Ярким тому примером может являться ситуация, когда космонавту, испытывающему сильные перегрузки, приходится работать с органами управления пилотируемого космического аппарата (ПКА). Как правило, такая ситуация возникает на участках выведения и спуска ПКА, особенно в случае нештатного спуска по баллистической траектории. В этом случае возникают проблемы с координацией движений вплоть до невозможности ручного управления с использованием опорно-двигательного аппарата.

Чтобы избавить экипаж от необходимости ручного управления с использованием мышечных усилий или свести их к минимуму, в качестве управляющих воздействий могут быть использованы и другие проявления жизнедеятельности, такие как изменение температуры тела, звуковые и механические явления, сопровождающие физиологические процессы организма и т.д. Однако одним из наиболее практически удобных проявлений для цели управления является биоэлектрический процесс, сопровождающий функционирование органов и тканей организма.

На сегодняшний день спектр задач, в которых применяются биоэлектрические системы управления, достаточно широк. В первую очередь сюда входит диагностическая медицинская аппаратура, средства протезирования, аппаратура поддержания жизнедеятельности и т.п. Однако в рамках задачи управления техническими средствами можно выделить отдельный класс такого рода систем, как биотехнические системы, в которых роль управляющего звена играет человек-оператор, сознательно формирующий биоэлектрические потенциалы в своем организме в интересах управления.

Биотехнические системы управления имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными:

- использование биопотенциалов отдельных органов и тканей позволяет следить и оценивать функциональное состояние оператора;
- надежность управления может быть повышена использованием биоэлектрической системы в качестве дублирующей;
- выдача управляющих воздействий сопровождается минимальными мышечными усилиями, достаточными для считывания биоэлектрического потенциала, что облегчает деятельность оператора.

Эти и некоторые другие преимущества систем биоэлектрического управления представляют ценность для использования этих систем в области пилотируемой космонавтики в качестве основного или дублирующего контура ручного управления экипажем космического аппарата.

**PERSPECTIVES OF BIOTECHNICAL CONTROL SYSTEMS
USAGE IN MANNED SPACE EXPLORATION**

Yadrevsky K.S.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

During his labor activity and everyday life human got used to interact with the environment by means of motions. It doesn't matter if it is happening with use of simple tools or complicated human-machine interfaces in the issue it results in muscular efforts as the main control input. However, such control method is not exclusive and what is more sometimes due to peculiarities of the system or control environment may be not the optimal one.

As an example we can take a situation when a cosmonaut under the effect of heavy G-loads is forced to operate with controls of a manned spacecraft (MS). As a rule such situation arises during ascent and descent, especially in case of off-nominal descent on ballistic trajectory. In such case troubles with coordination of movements appear which can lead up to the impossibility to perform manual control by means of supporting-motor apparatus.

To free the crew from manual controlling by means of muscular efforts or to minimize them, some other physiologic control inputs can be used, like body temperature change, mechanical or sound phenomena, etc. However, bioelectrical process which goes along with functioning of organs and tissues seems to be the most appropriate.

At the moment the field of application of the bioelectrical control systems is enough wide. First of all it is medical diagnostic equipment, prosthetic repair means, life support equipment, etc. However, within the frame of the task of controlling the technical means it is possible to point out the particular class of biotechnical systems where a human acts as an operator, and self-consciously generates intra-body bioelectrical potentials in the interests of controlling. Biotechnical control systems have a number of advantages in comparison to traditional ones:

- usage of bio-potentials of separate organs and tissues allows to monitor and evaluate the functional status of an operator;
- reliability of control can be improved by using the bioelectrical system as a backup system;
- issuing of control inputs requires minimal muscular efforts, enough for registering the bioelectrical potential. It eases the operator work.

These and some other advantages of bioelectrical control systems are quite valuable for using them in manned cosmonautics as a primary or backup manual control loop of a manned vehicle.

* * *

**ВНЕЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ ИСЗ –
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДСТВА ОПЕРАТИВНОГО
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

Бурдаев М.Н.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Многолетняя практика эксплуатации геостационарных ИСЗ убедительно подтвердила целесообразность их применения для решения широкого круга задач: связи, наблюдения, управления и других.

Условия эксплуатации этого вида ИСЗ с течением времени все более усложняются. На единственной геостационарной орбите, лежащей в плоскости экватора Земли, уже размещены десятки активно функционирующих ИСЗ.

Количество ИСЗ, которые могут быть безопасно размещены и эффективно работать на геостационарной орбите, не беспредельно.

Существует принципиальная возможность рассредоточения геостационарных ИСЗ в окрестности экваториальной геостационарной орбиты. Более того, в принципе уже сегодня технически реальна возможность «подвешивать» ИСЗ над любой точкой земного шара на любой высоте на ограниченное время за счет расхода его массы или, возможно, подвода энергии извне.

Для сбора, обработки и передачи информации в перечисленных и других ситуациях используются различные наземные стационарные и подвижные пункты наблюдения, связи и управления, а также летательные аппараты: вертолеты, самолеты, искусственные спутники Земли, различающиеся по своим возможностям, ограничениям условий применения, техническим и экономическим характеристикам. Возможно также использование некоторых других видов летательных аппаратов, например, баллистических ракет, дирижаблей, малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, мотодельтапланов и других средств.

Среди возможных способов применения летательных аппаратов для решения перечисленных задач недостаточно изучен вариант их стационарного размещения над заданной точкой (или над заданным районом) поверхности Земли на заданной высоте (или в заданном диапазоне высот). Этот вариант актуален при оперативной организации непрерывного наблюдения, связи и управления в ограниченных районах сухопутных территорий и Мирового океана на ограниченное время, например, при необходимости контроля быстро развивающихся экстремальных и чрезвычайных ситуаций и при ведении локальных боевых действий в вооруженных конфликтах различного масштаба.

Удержание ИСЗ на заданной высоте над заданной точкой земной поверхности вне экваториальной геостационарной орбиты потребует расхода топлива из его бортовых резервов или подвода энергии извне. Однако возможность длительного непрерывного пребывания аппарата над определенным районом поверхности земного шара существенно повышает эффективность его применения по сравнению с обычными ИСЗ, в частности, позволяет использовать его в режиме непрерывного сбора и передачи информации в этом районе.

OUT-OF-EQUATORIAL GEOSTATIONARY ARTIFICIAL EARTH SATELLITES (AESs) – THE PROMISING MEANS TO ADDRESS OPERATIONAL CHALLENGES

Burdaev M.N.

State Organization “Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center”

The longstanding usage of geostationary AESs has convincingly demonstrated their effectiveness for solving problems of communication, monitoring, control, etc.

Operational environment of this type of satellites becomes more and more complicated as time goes. There are dozens of actively functioning AESs placed on the same geostationary orbit, lying in the equatorial plane of the Earth.

Number of AESs that can be safely placed in geostationary orbit is not unlimited.

There is a principal possibility “to scatter” geostationary AESs in vicinity of equatorial geostationary orbit. Basically, even today the hovering of AES over any point on the Earth’s surface at any height for a limited time at the expense of its mass or perhaps using the external power supply is technically feasible.

Various fixed and mobile ground-based stations of monitoring, communication, and control as well as helicopters, aircraft, artificial satellites which are differed in functionality, requirements to use conditions, technical and economical characteristics, are used for data acquisition, processing and transfer in listed or other situations. It is also possible to use some other types of flying vehicles, for example ballistic rockets, dirigibles, unpiloted small-size vehicles, motodelta planes, etc.

Among the possible methods of usage of flying vehicles for performing above-said tasks the feasibility of their stationary location over a given point (or region) of the Earth's surface at a given height (or heightband) is poorly understood. This option may be of interest while providing operational continuous monitoring, communication and control in restricted areas of land and ocean for a limited time, for example, when it is required to monitor rapidly evolving extreme or emergency conditions and while conducting local military operations in the armed conflicts of different scale.

Maintaining AESs at a given height over a given ground point out of equatorial geostationary orbit requires fuel consumption from the AES's onboard resources or provision of external power supply. However the possibility of long-term continuous presence of a flying vehicle above a given region on the Earth essentially increases its efficiency in comparison to ordinary AESs and also allows using them for continuous acquiring information and downlinking it.

* * *

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ВИДЕОАНАЛИЗА НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Черняк Е.А.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

В настоящее время при прибытии космонавта, не имеющего опыт космического полета, на борт Международной космической станции, у него возникают проблемы с передвижением, объективным восприятием нагрузок и пространственной ориентацией. Главным образом, это связано с реакцией вестибулярного аппарата на невесомость.

Даже после длительного пребывания на борту МКС космонавты не вырабатывают нужные навыки пространственной ориентации и передвижения. Это связано в первую очередь с тем, что данный вопрос является до сих пор полностью не изученным из-за сложности получения количественной и качественной оценки биомеханических характеристик двигательных функций человека на борту пилотируемого космического аппарата. Что, в свою очередь, затрудняет подготовку экипажей специалистами на Земле.

Одним из перспективных способов получения количественной и качественной оценки двигательных функций человека является метод видеоанализа.

Видеоанализ – это запись и обработка видеoinформации о движениях различных объектов. Видеоанализ был разработан и впервые применен в исследованиях по биомеханике, и в настоящее время активно применяется в медицине, спорте, компьютерных играх и прочих областях деятельности.

Так как современная электроника и компьютерная техника не позволяет полностью реализовать всех возможностей человеческого мозга, то, воспроизводя мозговую деятельность человека (в данном случае видеоанализ), приходится идти на упрощения. В видеоанализе упрощение заключается в том, что, вместо наблю-

дения за целым предметом, отслеживается и анализируется положение только укрепленных на нем маркеров.

Анализ положения маркеров производится компьютерной системой. В результате компьютерного анализа видеосигнал преобразуется в запись трехмерного (одномерного в случае использования одной камеры) движения маркеров. Подобная система является одной из возможных реализаций технологии захвата движения.

Анализ движений, основанный на оптической регистрации, обладает безусловными, в сравнении с другими системами, преимуществами, так как на теле человека отсутствуют устройства, ограничивающие передвижение. Таким образом, естественная двигательная активность не искажается.

Накопленный опыт по созданию систем обработки видеоизображений может быть использован при разработке систем видеоанализа передвижений членов экипажа на борту МКС.

В докладе рассмотрены основные принципы и существующие технологии видеоанализа, применение систем видеоанализа в медицинской практике и научных исследованиях и т.д.

POSSIBILITY OF THE USAGE OF VIDEO ANALYSIS SYSTEMS ABOARD THE ISS

Chernyak E.A.

State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"

At the present time when a cosmonaut without spaceflight experience arrives on the ISS he faces with disorder of motor functions, objective perception of g-loads, and space orientation. Mainly it is connected with reaction of vestibular system to weightless condition.

Even after a long staying aboard the ISS cosmonauts cannot properly orientate and move. First of all it is accounted for the inadequate studying on this matter what is explained by the complexity of quantitative and qualitative estimation of biomechanical parameters of the human motor functions aboard a manned space vehicle. This situation complicates training of the crews by specialists on the ground.

One of perspective methods of obtaining quantitative and qualitative estimation of motion functions of a man is a video analysis method.

Video analysis implicates recording and processing of video information about motion of different objects. Procedure of video analysis was developed and applied for the first time in biomechanical research and at the moment it is widely used in medicine, sport, computer games, and other spheres.

Because the modern electronics and computer technology do not allow using all capabilities of human brain in full, we have to make some simplifications when reproducing the activity of human brain (video analysis in this particular case). Video analysis allows watching and analyzing the motion not of the whole object but only markers on it.

Marker position analysis is done by the computer system which converts video signals to 3D recording of the markers' movements (1D - when using one camera). Such system is one of the possible realizations of motion lock-on technology.

Motion analysis based on optical registration has unconditional advantages in comparison to other systems because there are no any devices attached to human's body and limiting its motion. Analysis of motion on the basis of optical registration has unconditional advantages in comparison to other systems because there are no any devices on a body of a man that restrict his motion. Thus natural motion activity is not distorted.

Experience of designing video processing systems can be used for designing video systems to analyze cosmonauts' motion aboard the ISS.

The report discusses the main principles and technologies of video analysis and application of video analysis systems for medical care and research.

* * *

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ НАЗЕМНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТАНЦИЙ ПО ОБЗОРУ И СОПРОВОЖДЕНИЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТ ЛАЗЕРНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Бикмучев А.Р.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Саттаров А.Г.

Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева

Проведенные «огневые» испытания экспериментального лазерного ракетного двигателя (ЛРД) на 10 кВт-ном электроразрядном CO_2 -лазере подтвердили принципиальную возможность создания ЛРД на основе непрерывного оптического разряда. По результатам «огневых» испытаний тяга составляла $R = 4,85 \text{ Н}$, а удельный импульс на рабочем газе аргоне $I_{y0} = 2300 \text{ м/с}$ [1].

Данные экспериментальные результаты получены в лабораторных условиях. На следующем этапе исследований необходимо выявление области применения данных двигателей. Сравнение ЛРД с другими типами двигателей показывает, что по сравнению с химическими ракетными двигателями ЛРД имеют более высокий удельный импульс. Электрические ракетные двигатели (ЭРД) имеют более высокий удельный импульс, однако низкие уровни тяги на уровне mH ограничивают маневренные возможности космических аппаратов (КА), использующих ЭРД.

Возможен вариант использования ЛРД в КА для разгона и коррекции орбиты с бортовой лазерной установкой, но в этом случае потребуется мощный источник энергии, возможно, на основе использования ядерного реактора, что приведет к увеличению стоимости системы в целом. Поэтому в данной работе предлагается для разгона и коррекции орбиты КА применить лазерные ракетные двигатели и использовать для этого энергию наземных, например, волоконных лазеров.

В работе получены соотношения, позволяющие оценить продолжительность наблюдения КА и размеры зоны обзора неба в зависимости от высоты полета КА и угла обзора лазерной станции, расположенной на Земле. Оценены потребные мощности лазерного излучения с учетом необратимых потерь, характерных для ракетных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дрегалин А.Ф., Черенков А.С., Саттаров А.Г., Бикмучев А.Р., Пислегин С.Н. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик лазерного ракетного двигателя на основе непрерывного оптического разряда // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 4. – С. 39–43.

**EVALUATION OF CAPABILITIES OF GROUND TRACKING LASER
STATIONS USING LASER-DRIVEN ROCKET ENGINES FOR CORRECTION
OF A SPACE VEHICLE ORBIT**

Bikmuchev A.P.

State Organization "Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center"

Sattarov A.G.

Kazan State Technical University named after A.N.Tupolev

Firing tests of the experimental laser-driven rocket engine (LRE), based on 10 kW electric-discharge CO₂ laser, have confirmed the principal possibility of creating LRE on the continuous optical discharge basis. Those tests showed the engine thrust $R = 4.85$ N and specific impulse $I_{sp} = 2300$ m/s given that argon is a working gas [1].

These experimental results were obtained in laboratory conditions. At the following stage of research it is necessary to determine the application field of such engines. In comparison with other engine types the LREs have a higher specific impulse. Electric rocket engines (EREs) provide a higher specific impulse, however low levels of thrust (measured in mN) limit the maneuvering characteristics of space vehicles with EREs.

LREs can be used for acceleration of a space vehicle with the laser assembly onboard and correction of its orbit, however in this case a powerful source of energy, possibly based on the nuclear reactor, will be required, what increases the cost of the entire system. Therefore it is proposed to use laser-driven rocket engines to accelerate the space vehicles and to correct their orbit using the energy of ground lasers, for example, fiber lasers.

The paper presents correlations, allowing evaluation of the tracking time of a space vehicle and the size of sky coverage area depending on the flying height of a space vehicle and angular coverage of an earth-based laser station. Also, the required power of laser emission, considering irreversible losses, typical for rocket engines, has been estimated.

REFERENCE

- [1] Dregalin A.F., Cherenkov A.S., Sattarov A.G., Pislegin S.N. Experimental and theoretical investigation of characteristics of a laser-driven rocket engine on the continuous optical discharge basis // News of Institutions of Higher Education. Aerotechnics. 2010. № 4. P. 39–43.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ

SCIENTIFIC-INFORMATION SECTION

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ МКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ МИССИЙ

Материалы к докладу на совместной комиссии Райкунова-Стаффорда
ЦНИИмаш, июнь, 2012 год

Main Directions of Upgrading the ISS Systems for Purposes of Long-term Missions

Materials for the Report to the Raykunov-Stafford Joint Commission
TsNIIMash, June, 2012

Герой Советского Союза, Герой Российской Федерации,
летчик-космонавт СССР, канд. психологических наук С.К. Крикалёв
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

1. К настоящему времени в мировой пилотируемой космонавтике накоплен определенный опыт осуществления долгосрочных миссий на орбитальных станциях. Завершено несколько программ орбитальных станций: Россия (СССР) – «Салют-1»–«Салют-7», «Мир»; США – «Скайлэб». Выполняется программа Международной космической станции, Китай заявил о начале работ по космической станции Тяньгун.

Степень обитаемости орбитальных космических станций за 40 лет их использования повысилась более, чем в 10 раз, и приближается в настоящее время на МКС к 100% (рис. 1).

На МКС достигнута высокая стабильность выполнения пилотируемых миссий. Средняя продолжительность полетов экипажей МКС составляет около 6 месяцев (рис. 2). Максимальная длительность полетов достигнута экипажами ОК «Мир».

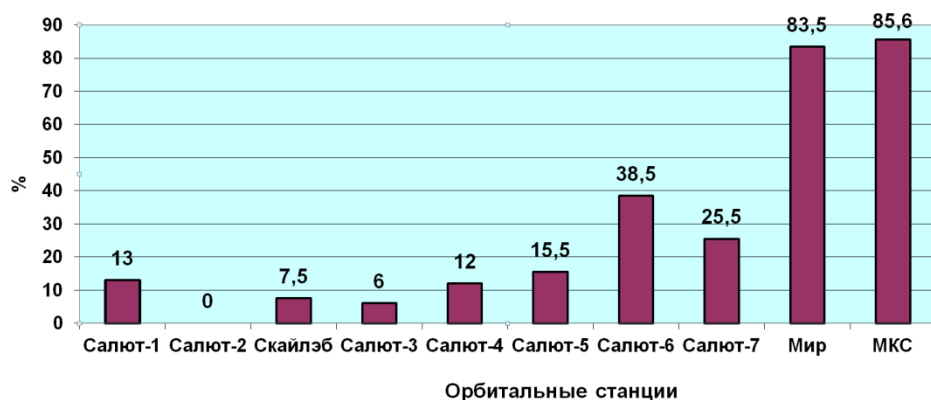


Рис. 1. Использование орбитальной станции в пилотируемом режиме
(в % к общему времени полета)

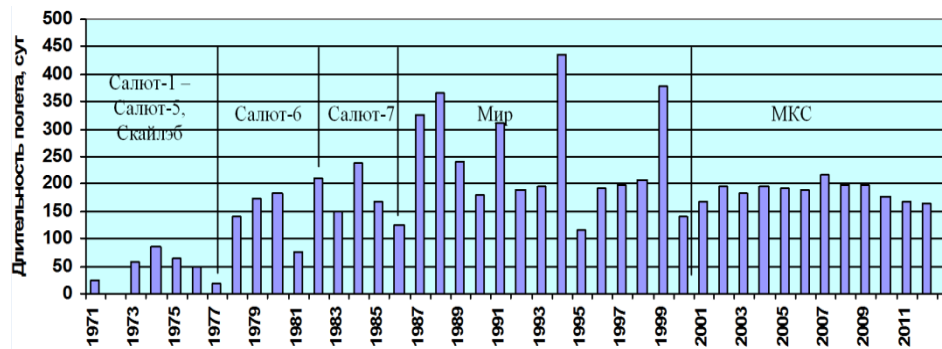


Рис. 2. Максимальная продолжительность полета экипажа орбитальной станции (по годам)

2. На основании опыта полетов орбитальных станций структурированы факторы, влияющие на безопасность долгосрочных миссий.

Выделены 4 группы факторов:

1-я группа. Факторы, воздействующие на материалы, элементы конструкции и оборудование:

- естественная деградация материалов;
- длительное пребывание оборудования, научной аппаратуры и образцов материалов снаружи комплекса;
- длительное воздействие на иллюминаторы микрометеоритов, внешней атмосферы, продуктов отработки двигателей.

2-я группа. Факторы, связанные с эксплуатацией комплекса и его оборудования:

- длительная эксплуатация бортовых систем и оборудования;
- нерасчетные отказы бортовых систем;
- нарастающее увеличение отклонений конструкции, схем и алгоритмов функционирования бортовых систем от исходных;
- устаревание программного обеспечения бортовых персональных компьютеров;
- длительное неиспользование бортовых средств;
- длительное воздействие вибраций, возникающих при работе некоторых систем;
- постоянное выпадение конденсата в холодных и плохо вентилируемых зонах;
- накопление пыли в замкнутых отсеках в результате деградации и износа материалов и покрытий, плохой очистки доставляемых с Земли грузов.

3-я группа. Факторы, связанные с доставкой, разгрузкой и хранением грузов:

- большое количество, разнообразие и длительное хранение доставляемых грузов.

4-я группа. Факторы, связанные с дооснащением комплекса и модификацией его оборудования:

- изменение конструктивно-компоновочной схемы рабочих мест и функциональных зон;
- изменение конфигурации, состава и состояния оборудования в процессе развертывания, дооснащения, эксплуатации и использования.

3. Одним из важнейших комплексов, определяющих безопасность экипажей в космических полетах, является комплекс средств жизнеобеспечения (КСОЖ). КСОЖ орбитальной станции включает:

- СОГС – средства обеспечения газового состава;
- СВО – средства водообеспечения;
- СОП – средства обеспечения питанием;
- ССГО – средства санитарно-гигиенического обеспечения;
- скафандры – спасательные, для ВКД (орбитальные, напланетные).

С точки зрения улучшения КСОЖ, для долгосрочных миссий стоит задача повышения его замкнутости (регенерации). Так для РС МКС в настоящее время она составляет примерно 45%, после пристыковки МЛМ степень замкнутости по воде и кислороду достигнет 70%. В целом на МКС и будущих долгосрочных миссиях может быть достигнута степень регенерации по воде и кислороду более 90%.

Направления совершенствования КСОЖ для долгосрочных миссий:

- создание и включение в состав КСОЖ витаминной оранжерей;
- создание универсального скафандра для работ на орбите ИСЗ, Луне и др. (трансформируемого);
- обеспечение оперативности ВКД;
- расширение возможностей ССГО (душевая кабина, сауна и др.);
- прессовка и переработка отходов;
- создание бортового комплекса оборудования для анализа воды, качества атмосферы, оценки микрофлоры и др.

4. Актуальным является вопрос интегрированного экипажа для международных космических комплексов. В «Меморандуме о взаимопонимании между Российским космическим агентством и Национальным управлением Соединенных Штатов Америки по аэронавтике и исследованию космического пространства относительно сотрудничества по Международной космической станции гражданского назначения» сказано, что экипаж Международной космической станции действует как единая интегрированная команда с одним командиром. В долгосрочных космических миссиях требование максимальной интеграции экипажа становится более значимым.

5. МКС должна использоваться как экспериментальная платформа для отработки различных технологий и систем для долгосрочных миссий по перспективным программам (рис. 3).

Следующие экспериментальные работы могут быть проведены на МКС:

- автономная деятельность экипажа (предоставление экипажу максимальной самостоятельности в планировании работ на борту МКС, в выполнении программы полета и в действиях по выходу из НшС);
- новые средства информационной поддержки деятельности экипажа (в т.ч. с использованием современных компьютерных средств и систем искусственного интеллекта);
- создание и оснащение рабочего места космонавта для выполнения операций ТОР. Необходимо экспериментально отработать минимальный набор типовых инструментальных средств из состава МКС, пригодных для проведения РВР в условиях полета марсианского экспедиционного комплекса (лунной базы);
- создание и применение роботов – помощников космонавтов;
- имитация управления транспортными средствами после длительного нахождения в космосе (луноходы, марсоходы);



Рис. 3. Международная космическая станция – платформа для отработки технологий и систем для долгосрочных миссий

- имитация ВКД в условиях марсианской и лунной гравитации (в т.ч. после длительного пребывания в невесомости 200–300 суток);
- оснащение и использование экипажем необходимых средств диагностики и лечения отклонений в состоянии здоровья, обеспечивающих самостоятельное решение экипажем задач поддержания здоровья (технологии телемедицины с учетом задержки связи, экспертные медицинские системы и др.);
- разработка принципов создания радиационного убежища, системы радиационного мониторинга, предупреждения и профилактики;
- обеспечение карантина экипажа при посадке на планету и при возвращении на Землю.

6. В интересах осуществления долгосрочных миссий может быть проведен комплексный эксперимент в условиях существующей сборки МКС. В таком эксперименте целесообразно участие всего интегрированного экипажа, поскольку он в целом, а не отдельные его представители, будет выполнять долгосрочную миссию (например, на Луне или при полете на Марс).

При разработке программы космического эксперимента необходимо учесть максимальное количество факторов и условий, влияющих на деятельность экипажей долгосрочных миссий. При постановке и реализации эксперимента целесообразно использовать МКС совместно с наземными средствами, моделирующими условия и факторы деятельности экипажей.

**МОЛОДЕЖНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ
В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ»**
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок,
Московская область, 27–29 июня 2012 года

**Youth Conference
“New Materials and Technologies in Rocket-and-Space
and Aviation Industry”**
State Organization “Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center”,
Star City, Moscow Region, June 27–29, 2012

В целях дальнейшего развития научно-технической деятельности молодых специалистов ракетно-космической и авиационной отраслей промышленности России в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А.Гагарина» 27–29 июня 2012 года прошла Молодежная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике» (далее – конференция). Эта конференция проводится ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» второй год подряд и становится ежегодной.

Организаторами конференции являются Федеральное космическое агентство, Комитет по развитию авиационно-космического комплекса Торгово-промышленной палаты Российской Федерации, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина».

Программой конференции предусматривалась работа следующих секций:

Секция 1. Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники.

Секция 2. Системы и устройства для ракетно-космической и авиационной техники.

Секция 3. Технологии двойного назначения (применение ракетно-космических и авиационных технологий в других отраслях промышленности, народном хозяйстве, медицине, бытовой технике и др.).

Секция 4. Менеджмент и экономика инноваций.

На открытии конференции с приветственными словами к гостям и участникам конференции обратились заместитель начальника ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» по научной работе Крючков Б.И., Герой РФ, летчик-космонавт РФ Корниенко М.Б., председатель Комитета по развитию авиационно-космического комплекса Торгово-промышленной палаты РФ Белоусов А.Н. и другие.

В конференции приняли участие более 100 молодых специалистов из более 30 предприятий и организаций ракетно-космической и авиационной отраслей промышленности России, студентов и аспирантов профильных вузов. На конференции были заслушаны 84 доклада, которые рассматривала экспертная комиссия, сформированная из высококвалифицированных специалистов ведущих предприятий ракетно-космической и авиационной отраслей промышленности. Авторы 10 лучших докладов, отобранных экспертной комиссией, отмечены денежными призами и дипломами, еще 5 докладов отмечены специальными наградами и грамотами.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина») инициировало издание научного журнала «Пилотируемые полеты в космос» по широкому кругу проблем, связанных с тематикой пилотируемых полетов в космос. В журнале публикуются работы в области: обеспечения пилотируемых космических программ; научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области изучения космического пространства и создания космической техники; отбора, подготовки деятельности и послеполетной реабилитации космонавтов; безопасного пребывания космонавтов на орбите, а также теории конструирования и технологии летательных аппаратов, двигателей; вычислительных систем; экспериментальных исследований; дистанционного зондирования Земли, информационных спутниковых технологий; проблем нанотехнологий для авиа- и аэрокосмических систем.

Приглашаются к сотрудничеству ученые различных областей.

Приглашаются начинающие авторы. Конструктивная и доброжелательная критика специалистов на страницах журнала призвана способствовать повышению уровня и качества работ начинающих исследователей, стимулировать приток свежих сил в сложнейшую отрасль мировой науки и техники.

<http://www.gctc.ru>

Вниманию авторов

Авторы присылают подготовленные к изданию работы объемом до пятнадцати страниц, выполненные в программе Word for Windows, IBM PC, и экспертное заключение на них. Необходима качественная распечатка (лазерный принтер) на хорошей белой бумаге и дублирующая пересылка по электронной почте.

Размер полосы набора (поле текста, формат А4) – 12,5х20 см. Верхнее и нижнее поле – 4,82 см, левое и правое поле – 4,25 см. Отступы в начале абзаца – 0,8 см. Заголовок – Times New Roman, 11 pt, через один интервал; основной текст – Times New Roman, 10 pt, через один интервал; иллюстрации – в компьютерном исполнении (рисунок в Word, файлы с расширением – .bmp, .jpg, .gif) с возможностью их редактирования. Рисунки размещаются в тексте. Таблицы, схемы, рисунки и формулы в тексте должны нумероваться; схемы и таблицы должны иметь заголовки, размещенные над схемой или полем таблицы, а каждый рисунок – подрисуночную подпись.

Структура текста:

1. Название статьи.
2. Сведения об авторе / авторах: имя, отчество, фамилия, должность, место работы, ученое звание, ученая степень, домашний адрес (с индексом), контактные телефоны (раб., дом.), адрес электронной почты.
3. Аннотация статьи (3–10 строк).
4. Ключевые слова по содержанию статьи (8–10 слов), которые размещаются после аннотации.
5. На английском языке повторить название статьи, фамилию и инициалы автора.

6. На английском языке повторить аннотацию статьи.
7. На английском языке повторить ключевые слова.
8. Основной текст статьи на русском языке.

За автором сохраняется право копирования своей публикации. Журнал может быть выслан по заказу за отдельную плату.

Статьи, предназначенные для публикации в журнале, должны быть поданы в трех экземплярах. Статьи направляются по указанному ниже адресу или тому члену редакционного комитета, который, по мнению автора, наиболее близок к теме работы.

Статьи, оформленные без учета вышеизложенных правил, к публикации не принимаются.

Вниманию читателей

Редакционная коллегия журнала не несет ответственности перед авторами и/или третьими лицами и организациями за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Редакция вправе изъять уже опубликованную статью, если выяснится, что в процессе публикации статьи были нарушены чьи-либо права или же общепринятые нормы научной этики. О факте изъятия статьи сообщается автору, который представил статью, специалистам, давшим рекомендации, и организации, где работа выполнялась.

To the Attention of Readers

The editorial board of the magazine shall not bear any responsibility in front of authors and/or third parties and institutions for potential losses caused by an article publication. The editorial board has the right to withdraw a published article if during its publication somebody's rights or customary scientific ethic norms had been violated. Author of the article, specialists who gave recommendations and organization, where the work was done, shall be informed about the withdrawal.

Наши координаты для контактов

(по вопросам публикации, рекламы, и деловых предложений)

Кальмин Андрей Валентинович (организационные вопросы)

тел.: 8 (495) 526-37-31; 8 (495) 526-38-90, e-mail: A.Kalmin@gctc.ru.

Факс: 8 (495) 526-26-12

Электронный вариант научного журнала «Пилотируемые полеты в космос» выполнен в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». Содержание журнала размещено на сайте <http://www.gctc.ru>

**ПИЛОТИРУЕМЫЕ
ПОЛЕТЫ В КОСМОС**
(научный журнал)

Научный редактор *Л.К. Васильева*
Технический редактор *Н.В. Волкова*
Корректор *Т.И. Лысенко*
Перевод *С.Б. Беляковская*

Подписано в печать 20.09.2012 г.
Формат 70х108/16. Бумага ксероксная.
Усл. печ. л. 11,9. Тираж 120 экз. Зак. 552-12.

Отпечатано в типографии редакционно-издательского отдела
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»