

**ПИЛОТИРУЕМЫЕ ПОЛЕТЫ В КОСМОС**  
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 3(28)/2018

**ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ**

**Власов П.Н.,**  
Герой Российской Федерации,  
заслуженный летчик-испытатель Российской Федерации

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

**Крючков Б.И.,**  
докт. техн. наук

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

<b>Курицын А.А.,</b>	заместитель главного редактора, докт. техн. наук, доцент
<b>Алифанов О.М.,</b>	докт. техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Батурин Ю.М.,</b>	Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации, докт. юридических наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Бубеев Ю.А.,</b>	докт. мед. наук, профессор
<b>Бурдаев М.Н.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Жуков В.М.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Зубов Н.Е.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Микрин Е.А.,</b>	докт. техн. наук, профессор, академик РАН
<b>Наумов Б.А.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Орлов О.И.,</b>	докт. мед. наук, академик РАН
<b>Соколов В.П.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Соловьев В.А.,</b>	дважды Герой Советского Союза, летчик-космонавт СССР, докт. техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН
<b>Сохин И.Г.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Усов В.М.,</b>	докт. мед. наук, профессор
<b>Шукшунов В.Е.,</b>	докт. техн. наук, профессор
<b>Ярополов В.И.,</b>	докт. техн. наук, профессор

**РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНАЯ ГРУППА:**

<b>Харламов М.М.,</b>	руководитель редакционно-экспертной группы
<b>Бондарева Е.Н.,</b>	технический редактор
<b>Васильева Л.К.,</b>	выпускающий редактор
<b>Волкова Н.В.,</b>	координатор
<b>Гордиенко О.С.,</b>	ответственный за информационное обеспечение
<b>Дмитриев В.Н.,</b>	канд. воен. наук
<b>Долгов П.П.,</b>	канд. техн. наук
<b>Игнатьев С.В.,</b>	канд. техн. наук, доцент
<b>Кальмин А.В.,</b>	ответственный секретарь
<b>Каспранский Р.Р.,</b>	канд. мед. наук
<b>Орешкин Г.Д.,</b>	канд. техн. наук, доцент
<b>Саев В.Н.,</b>	докт. техн. наук, доцент
<b>Титова М.Л.,</b>	ответственный за распространение журнала
<b>Токарева С.Г.,</b>	редактор
<b>Тюрин М.В.,</b>	Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ

**MANNED SPACEFLIGHT**  
SCIENTIFIC JOURNAL No 3(28)/2018

**CHAIRMAN OF THE EDITORIAL BOARD**

**Vlasov P.N.,**  
Hero of the Russian Federation,  
Honored Test Pilot of the Russian Federation

**EDITOR IN CHIEF**

**Kryuchkov B.I.,**  
Doctor of Technical Sciences

**EDITORIAL BOARD:**

<b>Kuritsyn A.A.,</b>	<b>Deputy Editor-in-Chief,</b> DScTech, Associate Professor
<b>Alifanov O.M.,</b>	DScTech, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Baturin Yu.M.,</b>	Hero of the Russian Federation, pilot-cosmonaut of the Russian Federation, Doctor in Law, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Bubeev Yu.A.,</b>	M.D., Professor
<b>Burdaev M.N.,</b>	DScTech, Professor
<b>Zhukov V.M.,</b>	DScTech, Professor
<b>Zubov N.E.,</b>	DScTech, Professor
<b>Mikrin E.A.,</b>	DScTech, Professor, Academician of the RAS
<b>Naumov B.A.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Orlov O.I.,</b>	M.D., Academician of the RAS
<b>Sokolov V.P.,</b>	DScTech, Professor
<b>Solovyov V.A.,</b>	twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut of the USSR, DScTech, Professor, Corresponding Member of the RAS
<b>Sokhin I.G.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Usov V.M.,</b>	M.D., Professor
<b>Shukshunov V.E.,</b>	DScTech, Professor
<b>Yaropolov V.I.,</b>	DScTech, Professor

**EDITORIAL-EXPERT GROUP:**

<b>Kharlamov M.M.,</b>	<b>Head of the Editorial-Expert Group</b>
<b>Bondareva E.N.,</b>	Technical editor
<b>Vasilieva L.K.,</b>	Executive editor
<b>Volkova N.V.,</b>	Coordinator
<b>Gordienko O.S.,</b>	Information support officer
<b>Dmitriev V.N.,</b>	Candidate of Military Sciences
<b>Dolgov P.P.,</b>	Candidate of Technical Sciences
<b>Ignatiev S.V.,</b>	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
<b>Kalmin A.V.,</b>	Executive secretary
<b>Kaspranskiy R.R.,</b>	PhD of Medical Science
<b>Oreshkin G.D.,</b>	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
<b>Saev V.N.,</b>	DScTech, Associate Professor
<b>Titova M.L.,</b>	Distributor
<b>Tokareva S.G.,</b>	Editor
<b>Tyurin M.V.,</b>	Hero of the Russian Federation, pilot-cosmonaut of the Russian Federation

## СОДЕРЖАНИЕ

ИТОГИ ПОЛЕТОВ ЭКИПАЖЕЙ МКС.....	5
Основные задачи подготовки и результаты деятельности экипажа МКС-53/54 при выполнении программы космического полета. <i>А.А. Мисуркин, А.А. Курицын, А.И. Кондрат, В.А. Копнин, Д.Е. Рыбкин, Е.И. Корзун</i> .....	5
Медицинские аспекты обеспечения безопасности полета экипажа МКС-53/54 (экспресс-анализ). <i>В.В. Богомолов, В.И. Почуев, И.В. Алфорова, Е.Г. Хорошева, В.В. Криволапов</i> .....	17
Результаты выполнения программы КЭ «ЭЖОН-М» космонавтом А.А. Мисуркиным в составе экипажа МКС-53/54. <i>Г.Д. Орешкин, А.Н. Ядренцев, А.В. Севериненко</i> .....	34
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС.....	45
Лаборатория «Плазменный кристалл-3 Плюс» на российском сегменте Международной космической станции – успешный проект по физике комплексной плазмы. <i>В.Е. Фортков, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев, С.А. Храпак, В.И. Молотков, В.Н. Наумкин, Д.И. Жуховицкий, А.Г. Храпак, Х.М. Томас, М. Швабе</i> .....	45
Основы анализа и проектирования ИТ-инфраструктуры для интегрированного тренажерного комплекса подготовки космонавтов. <i>В.Е. Шукинунов, В.В. Янюшкин, М.М. Харламов, В.П. Хрипунов, Б.А. Наумов, С.Н. Ковригин</i> .....	65
Робот космического назначения как составляющая научной аппаратуры. <i>А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф. Пермяков</i> .....	83
ОБЗОРЫ.....	97
Виртуальное 3D-моделирование реальных ПКК в интересах историко-технических исследований и сохранения научно-технической информации об объектах. <i>Ю.М. Батурин, Б.И. Крючков, А.В. Леонов</i> .....	97
ИСТОРИЯ. СОБЫТИЯ. ЛЮДИ .....	117
ГИРД – как историческое научно-практическое начало отечественного ракетостроения. <i>А.П. Александров</i> .....	117

## CONTENTS

RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS.....	5
Main Results of the ISS-53/54 of Expedition Training and Activity When Carrying out the Mission Plan. <i>A.A. Misurkin, A.A. Kuritsyn, A.I. Kondrat, V.A. Kopnin, D.E. Rybkin, E.I. Korzun</i> .....	5
Medical Aspects of Securing the Flight of the ISS Crew for Expedition 53/54 (Express Analysis). <i>V.V. Bogomolov, V.I. Pochuev, I.V. Alferova, E.G. Khorosheva, V.V. Krivolapov</i> .....	17
Results of Implementing the “Ekon-M” Space Experiment Program by A.A. Misurkin, a Member of the ISS Crew for Expedition 53/54. <i>G.D. Oreshkin, A.N. Yadrentsev, A.V. Severinenko</i> .....	34
THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS .....	45
“Plasma Crystal-3 Plus” Laboratory at the Russian Segment of the International Space Station is a Successful Project on the Complex Plasma Physics. <i>V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitsky, A.G. Khrapak, H.M. Thomas, M. Schwabe</i> .....	45
Basics of the Analysis and Designing of IT-Infrastructure for the Integrated Simulator Complex of Cosmonaut Training. <i>V.E. Shukshunov, V.V. Yanushkin, M.M. Kharlamov, V.P. Khripunov, B.A. Naumov, S.N. Kovrigin</i> .....	65
Robot of Space Application as a Component of Scientific Hardware. <i>A.A. Bogdanov, I.M. Kutlubaev, A.F. Permyakov</i> .....	83
OVERVIEWS .....	97
Virtual 3D-Simulation of Real Manned Space Complexes in the Interests of Historical and Technical Studies and Saving Scientific and Technical Information About Objects. <i>Yu.M. Baturin, B.I. Kryuchkov, A.V. Leonov</i> .....	97
HISTORY. EVENTS. PEOPLE .....	117
Group on Propulsion Research (GPR) – as a Historical Scientific and Practical Initial Point of National Rocketry. <i>A.P. Aleksandrov</i> .....	117

# ИТОГИ ПОЛЕТОВ ЭКИПАЖЕЙ МКС

## RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS

УДК 629.78.007

### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА МКС-53/54 ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОГРАММЫ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

А.А. Мисуркин, А.А. Курицын, А.И. Кондрат, В.А. Копнин,  
Д.Е. Рыбкин, Е.И. Корзун

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ А.А. Мисуркин;  
докт. техн. наук А.А. Курицын; А.И. Кондрат; В.А. Копнин; Д.Е. Рыбкин;  
Е.И. Корзун (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Рассматриваются результаты деятельности экипажа МКС-53/54 на борту транспортного пилотируемого корабля (ТПК) «Союз МС-06» и Международной космической станции (МКС). Дан обзор задач, решаемых при выполнении ВКД.

**Ключевые слова:** задачи подготовки экипажа, космический полет, Международная космическая станция, научно-прикладные исследования и эксперименты.

### **Main Results of the ISS-53/54 of Expedition Training and Activity When Carrying out the Mission Plan. A.A. Misurkin, A.A. Kuritsyn, A.I. Kondrat, V.A. Kopnin, D.E. Rybkin, E.I. Korzun**

The paper considers results of the ISS-53/54 crew activity aboard the “Soyuz-MS-06” spacecraft and the ISS. The tasks solved when performing extravehicular activity are reviewed.

**Keywords:** tasks of crew training, spaceflight, International Space Station, scientific applied research and experiments.

### **Состав экипажа**

Основной экипаж длительной экспедиции МКС-53/54 (рис. 1) в составе:

Мисуркин Александр Александрович	командир ТПК «Союз МС-06», бортинженер экспедиции МКС-53, командир экспедиции МКС-54 (Роскосмос, Россия)
Ванде Хай Марк	бортинженер-1 ТПК «Союз МС-06», бортинженер МКС-53/54 (НАСА, США)

Акаба Джозеф

бортинженер-2 ТПК «Союз МС-06»,  
бортинженер МКС-53/54 (НАСА, США)

выполнил космический полет длительностью 168 суток 5 часов 13 минут 57 секунд с 13 сентября 2017 года по 28 февраля 2018 года. Позывной экипажа ТПК «Союз МС-06» – «Альтаир».



Рис. 1. Экипаж ТПК «Союз МС-06»

### **Опыт полетов членов экипажа**

Мисуркин Александр Александрович в отряде космонавтов с октября 2006 года. До назначения в экипаж совершил 1 космический полет с 29 марта по 11 сентября 2013 года в составе экипажа МКС-35/36 в качестве бортинженера корабля «Союз ТМА-08М» и бортинженера МКС-35/36. В ходе полета Александр Мисуркин совершил три выхода в открытый космос общей продолжительностью 20 часов 02 минуты. Продолжительность полета составила 166 суток.

Ванде Хай Марк – с июня 2009 года астронавт НАСА, полковник. Опыта космических полетов не имел.

Акаба Джозеф – астронавт НАСА с мая 2004 года. 1-й полет совершил в качестве специалиста миссии STS-119, продолжительность полета 12 суток 19 часов, совершил 2 выхода в открытый космос; 2-й полет – с 15 мая 2012 года по 17 сентября 2012 года в качестве бортинженера «Союз ТМА-04» и бортинженера МКС-31/32 продолжительностью 125 суток.

### **Основные итоги полета**

Старт ТПК «Союз МС-06» состоялся 13 сентября 2017 года с космодрома Байконур (рис. 2).



Рис. 2. Экипаж ТПК «Союз МС-06» перед стартом

Программа полета экипажа МКС-53/54 предусматривала выполнение следующих работ:

- доставка экипажа экспедиции МКС-53/54 на борт МКС, завершившаяся стыковкой 13 сентября 2017 года ТПК «Союз МС-06» в автоматическом режиме с МКС к стыковочному узлу модуля МИМ2 ( $T_{М.З.} = 05:55:18$  ДМВ). Сближение и стыковка ТПК выполнялись по четырехвитковой схеме;

- расстыковка американского грузового корабля SpaceX-12 «Dragon» от манипулятора SSRMS AC МКС ( $T = 11:40$  ДМВ). Сход с орбиты и приводнение в расчетной точке Тихого океана ( $T = 17:14$  ДМВ) осуществлены 17 сентября 2017 года;

- научно-прикладные исследования и эксперименты в соответствии с программой НПИ;

- техническое обслуживание бортовых систем, ремонтно-восстановительные работы, дооснащение, проведение телевизионных репортажей, видео- и фотосъемок, работы по программе символической деятельности;

- стыковка транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс МС-07» выполнена 16 октября 2017 года ( $T_{М.З.} = 14:04$  ДМВ). Сближение грузового корабля проводилось по двухсуточной схеме;

- сближение американского грузового корабля «Cygnus OA-8», захват манипулятором станции SSRMS ( $T = 13:04$  ДМВ), перемещение и установка корабля на надирном порту модуля Node1 AC МКС ( $T = 15:15$  ДМВ) осуществлены 14 ноября 2017 года;

- расстыковка корабля «Cygnus OA-8» от манипулятора станции SSRMS ( $T = 16:11$  ДМВ), выдача импульсов увода проведены 6 декабря 2017 года;

- расстыковка ТПК «Союз МС-05» от стыковочного узла модуля МИМ1 выполнена 14 декабря 2017 года в 08:14:30 ДМВ, время посадки СА – 11:37:50 ДМВ;
- сближение американского грузового корабля SpaceX-13 «Dragon», захват манипулятором станции SSRMS ( $T = 10:57$  ДМВ), установка корабля на надирный порт модуля Node2 АС МКС ( $T = 16:25$  ДМВ) проведены 17 декабря 2017 года;
- стыковка ТПК «Союз МС-07» к стыковочному узлу МИМ1 осуществлена 19 декабря 2017 года ( $T_{М.З.} = 11:39:03$  ДМВ). Сближение и стыковка ТПК выполнялись по двухсуточной схеме;
- расстыковка ТПК «Прогресс МС-06» от АО СМ проведена 27 декабря 2017 года ( $T_{ФАКТИЧЕСКОЙ РАССТЫКОВКИ} = 04:03:33$  ДМВ);
- расстыковка американского грузового корабля SpaceX-13 «Dragon» от манипулятора SSRMS АС МКС в 12:58 ДМВ. Тормозной импульс для штатного схода с орбиты ( $T = 17:44$  ДМВ), приводнение корабля ( $T \sim 18:37$  ДМВ) в расчетной точке Тихого океана осуществлены 13 января 2018 года;
- выход в космос ВКД-44 выполнен 2 февраля 2018 года из стыковочного отсека СО1, продолжительность выхода – 8 часов 12 минут. Выход осуществили космонавты А. Мисуркин и А. Шкаплеров;
- стыковка ТПК «Прогресс МС-08» к АО СМ проведена 15 февраля 2018 года ( $T_{М.З.} = 13:38$  ДМВ). Сближение грузового корабля проводилось по двухсуточной схеме;
- расстыковка ТПК «Союз МС-06» от стыковочного узла МИМ2 выполнена 28 февраля 2018 года в 02:08:38 ДМВ, время посадки СА – 05:31 ДМВ.

### Основные задачи подготовки экипажа к полету

Подготовка к полету членов экипажа МКС-53/54 проводилась с 29 июня 2015 года. Программа подготовки была разработана с учетом задач полета, уровня подготовленности и функциональных обязанностей членов экипажа.

Объемы подготовки в России основного экипажа представлены в таблице 1.

Таблица 1

Разделы подготовки	А. Мисуркин	М. Ванде Хай	Дж. Акаба
Подготовка по ТПК «Союз МС-06»	75	77	183,5
Подготовка по РС МКС	38	25	128
Подготовка к ВКД	6	–	–
Подготовка по научной программе	15,8	2	2
Медико-биологическая подготовка	31	10,5	138,5
Другие виды подготовки	22	23	151,5
Всего:	187,8	137,5	603,5



Подготовка экипажа проводилась поочередными тренировочными сессиями: в России – по российскому сегменту МКС, транспортным пилотируемому и грузовым кораблям, и на базах международных партнеров – по американскому сегменту МКС.

Основными задачами подготовки по РС МКС и ТПК «Союз МС-06» являлись:

- формирование у членов экипажа знаний и умений, необходимых для выполнения ими функциональных обязанностей в составе экипажа ТПК «Союз МС-06»;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при управлении бортовыми системами и агрегатами ТПК на всех этапах полета (в штатных и нештатных ситуациях);
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при выполнении сближения, причаливания, стыковки и перестыковки ТПК «Союз МС» на все стыковочные узлы РС МКС;
- отработка навыков выполнения ручного управляемого спуска (РУС);
- отработка навыков построения орбитальной ориентации в режимах РО-АК;
- отработка навыков построения орбитальной ориентации в режимах РО-ДК;
- построение солнечной ориентации и закрутки ТПК в режимах РО-АК и РО-ДК;
- отработка действий членов экипажа в аварийных ситуациях: пожар, разгерметизация, токсичность атмосферы;
- отработка действий по выполнению срочного спуска с орбиты в случае покидания МКС;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа при выполнении расстыковки ТПК с неориентированной и нестабилизированной МКС;
- отработка навыков по выполнению причаливания, стыковки и расстыковки ТПК «Прогресс МС» на стыковочные узлы РС МКС в режиме ТОРУ;
- контроль автоматического сближения и стыковки ТПК «Прогресс МС» с РС МКС;
- подготовка экипажа к приему, передаче смены и совместной работе в полете с экипажами МКС-52/53, МКС-54/55;
- выполнение операций по консервации и расконсервации ТПК, операциям по обеспечению готовности ТПК к спуску в случае срочного покидания МКС;
- эксплуатация бортовых систем РС МКС (модули ФГБ, СМ, СО1, МИМ1, МИМ2);
- выполнение технического обслуживания, ремонта и дооснащения систем РС МКС;
- ознакомление с выполнением разгрузочно-погрузочных работ на грузовых кораблях, укладке снаряжения и личных вещей, возвращаемых грузов на пилотируемых кораблях;

- выполнение программы научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС;
- подготовка по задачам внекорабельной деятельности в объеме типовых операций и по программе ВКД-44;
- отработка навыков, умений и взаимодействия членов экипажа в случае нештатной посадки в различных климатогеографических зонах;
- подготовка к адаптации к факторам космического полета, отработка навыков оказания само- и взаимопомощи и эксплуатации бортовых медицинских средств.

Результаты экзаменов и экзаменационных комплексных тренировок представлены в таблице 2.

Таблица 2

Вид экзамена	А. Мисуркин	М. Ванде Хай	Дж. Акаба
ЭКТ по ТПК «Союз МС»	5,0		
ЭКТ по РС МКС	5,0		
По ручному сближению ТПК «Союз МС»	5,0		–
По ручному причаливанию и перестыковке ТПК «Союз МС»	5,0	–	–
По ТОРУ ТГК «Прогресс МС»	4,7	–	–
По РУС ТПК «Союз МС»	5,0	5,0	–

### **Полет на борту транспортного пилотируемого корабля «Союз МС-06»**

Старт ТПК «Союз МС-06» состоялся 13 сентября 2017 года с космодрома Байконур (Казахстан). Выведение, отделение корабля от ракеты-носителя прошло штатно. В процессе предстартовой подготовки, выведения и маневров замечаний к работе бортовых систем не выявлено.

Сближение ТПК «Союз МС-06» осуществлялось по четырехвитковой схеме. Номинальный двухимпульсный маневр первого интервала маневрирования дальнего сближения с МКС проводился на 1-м и 2-м суточных витках. Корректирующий двухимпульсный маневр № 2 был выполнен на 2-м и 3-м суточных витках. На 3-м суточном витке началось автономное сближение с МКС. Сближение, облет, причаливание и стыковка к модулю МИМ2 выполнены в штатном режиме.

После стыковки экипаж выполнил контроль герметичности отсеков корабля, контроль герметичности стыка, ускоренное выравнивание давления между отсеками ТПК и МКС и открытие переходных люков.

Выполнив консервацию транспортного корабля, экипаж завершил первый этап программы автономного полета ТПК «Союз МС-06».

27 февраля 2018 года, завершив программу полета на борту МКС, началась подготовка экипажа к возвращению на Землю. Подготовка к спуску

проводилась на 15-витковых сутках. На 11-м суточном витке проведена расконсервация корабля. Переход на автономное питание выполнен по указанию с Земли экипажем с ПК в 22:20:00 ДМВ. В 23:00:00 ДМВ экипаж по указанию с Земли выполнил закрытие переходных люков на 12-м суточном витке.

Расстыковка выполнена 28 февраля 2018 года на 14-м суточном витке в автоматическом режиме в дежурной ориентации МКС. Команда на открытие крюков ТПК по указанию ЦУПа выдана экипажем в 02:07:00 ДМВ, время фактической расстыковки – 02:08:38 ДМВ.

Спуск выполнялся по штатной программе. Посадка – на 1-м суточном витке. Время включения СКД для выдачи тормозного импульса – 04:38:39 ДМВ. Двигатель работал штатно, отработал тормозной импульс 128,0 м/с без замечаний. Разделение отсеков прошло в 05:05:51 ДМВ. Расчетное время входа СА в атмосферу – 05:10:09 ДМВ. Спуск в атмосфере выполнен в режиме АУС. Внеатмосферный промах составил +6 секунд. Посадка по докладу специалистов ПСС произошла в 05:31 ДМВ в расчетной точке с координатами 47°19'07" с.ш., 69°35'02" в.д. вблизи г. Жезказгана. Двигатели мягкой посадки сработали штатно.

### **Полет на борту МКС**

Экипаж МКС-53/54 работал на борту МКС 168 суток с 13 сентября 2017 года по 28 февраля 2018 года. Был выполнен обширный объем работ по техническому обслуживанию и дооснащению бортовых систем МКС, программе научно-прикладных исследований и экспериментов. Экипаж провел ремонтно-восстановительные работы, большое количество телевизионных репортажей, видео- и фотосъемок.

Для продолжения дальнейшей эксплуатации МКС в пилотируемом режиме на российском сегменте выполнены следующие основные работы по материально-техническому обслуживанию систем:

- замена средств звукоизоляции СКВ1, СКВ2 в СМ;
- ресурсная замена блока колонок очистки (БКО) в СРВ-К2М и пролив блока колонок;
- перекачка воды из БВ1 «Родника» ТГК «Прогресс МС-06» в БВ1 «Родника» СМ;
- диагностика силового распределительного блока СУБК ФГБ, блока сборных шин (БСШ-2) и блока фильтров (БФ-2) системы СЭС ФГБ;
- регламентные работы с ноутбуком ЦП в СМ;
- профилактические работы с файловым сервером FS1 и БРИ в СМ;
- регламентный осмотр и чистка управляющих ноутбуков RS1, RS2, RS3;
- тестирование КЦП2 (проведение 1-го и 2-го этапов работ);
- наддув атмосферы МКС кислородом из секции СрПК ТГК «Прогресс МС-07».

Выполнены основные ремонтно-восстановительные работы и дооснащение РС МКС:

- замена прибора ТВМ-3;
- замена вентилятора СО в газоанализаторе ГЛ2106;
- замена блока питания СКВ2 в СМ;
- замена насоса Н2 панели 4СНП2 в контуре КОБ2;
- замена полотна бегущей дорожки БД-2;
- замена вентилятора ЦВ1 в МИМ1;
- установка новой версии программного обеспечения (08.08) БВС на КЦП2;
- замена основного жесткого диска ноутбука RSS1 с установкой программного обеспечения (v.4.0);
- обновление программного обеспечения пульта управления силового нагрузателя НС-1М.

В процессе работ по связям с общественностью проводились различные ТВ-приветствия и поздравления. Выполнялись видеосъемки на борту РС МКС для сайта Роскосмоса и социальных сетей. Проводились бортовые фото-, видеосъемки хроники полета РС МКС и работы по программе символической деятельности.

### **Совместный полет с другими экипажами МКС**

Во время полета проводились совместные работы с экипажами МКС-52/53 и МКС-54/55.

С 13 сентября 2017 года по 14 декабря 2017 года – совместный полет с экипажем МКС-52/53 (рис. 3) в составе:

- Рязанский Сергей Николаевич (бортинженер МКС-52/53, Роскосмос, Россия);
- Брезник Рэндольф (бортинженер экспедиции МКС-52, командир экспедиции МКС-53, НАСА, США);
- Неспולי Паоло (бортинженер МКС-52/53, ЕКА, Италия).



Рис. 3. Совместный полет экипажей МКС-53/54 и МКС-52/53

С 19 декабря 2017 года по 28 февраля 2018 года – совместный полет с экипажем МКС-54/55 в составе:

- Шкаплеров Антон Николаевич (бортинженер экспедиции МКС-54, командир экспедиции МКС-55, Роскосмос, Россия);
- Тингл Скотт (бортинженер МКС-54/55, НАСА, США);
- Канаи Норишиге (бортинженер МКС-54/55, ДжАКСА, Япония).

### **Внекорабельная деятельность**

2 февраля 2018 года был выполнен выход в открытый космос ВКД-44 из шлюзового отсека СО1 «Пирс» в скафандрах «Орлан-МКС» и «Орлан-МК». Выход совершили космонавты А. Мисуркин и А. Шкаплеров из состава экспедиции МКС-54 (рис. 4).

Время открытия выходного люка стыковочного отсека (СО1) «Пирс» – 18:34 ДМВ, закрытия – 02:46 ДМВ. Продолжительность выхода составила 8 ч 12 мин.



Рис. 4. Выполнение ВКД-44

#### *Целевые задачи выхода:*

- замена прибора ША317АП в антенном приборном блоке ОНА на приемный модуль (ПрМ) широкополосной системы связи (ШСС);
- установка кронштейна с соединителями на поручне СО1 на экспонирование;
- фотографирование СКК № 9 (при наличии времени);
- демонтаж двух устройств экспонирования КЭ «Тест» с СО1 (при наличии времени);
- демонтаж платформы установочной КЭ «Биориск» с СО1 (при наличии времени);
- изменение положения якоря на выходном устройстве СО1 (при наличии времени).

#### *Особенности выхода:*

В ходе перевода остронаправленной антенны (ОНА) в положение «1» возникла нерасчетная нештатная ситуация: зацепление ОНА за элементы

конструкции АО СМ при перемещении из транспортного положения в положение «1».

Расчетное время ВКД-44 (6 ч 45 мин) было превышено и составило 8 ч 12 мин из-за возникновения нерасчетной нештатной ситуации при переводе ОНА из транспортного положения в положение «1».

По программе АС МКС за время полета экспедиции МКС-53/54 было выполнено пять выходов в открытый космос.

### **Основные задачи экипажа при выполнении научной программы**

В период полета БИ-1 МКС-53/КЭ МКС-54 выполнялись работы в соответствии с «Программой реализации научно-прикладных исследований, планируемых в период пятьдесят третьей и пятьдесят четвертой пилотируемых экспедиций МКС-53 и МКС-54».

#### *Физико-химические процессы и материалы в условиях космоса:*

- КПТ-21 (ТЕХ-20) «Плазменный кристалл» (этап 1б) (очистка камеры);
- ТХН-9 «Кристаллизатор» (фото);
- АСР-13 «Диффузионное пламя» (АСМЕ);
- АСР-16 «Перитектика» (ЕМЛ).

#### *Исследование Земли и космоса:*

- ИКЛ-2 «БТН-Нейтрон» (автомат);
- ГФИ-1 «Релаксация»;
- ГФИ-8 «Ураган»;
- ДЗЗ-17 «Напор-мини РСА» (очистка);
- ДЗЗ-18 «Дубрава»;
- ДЗЗ-19 «Сценарий»;
- КПТ-22 «Экон-М».

#### *Человек в космосе:*

- МБИ-13 «Спланх»;
- МБИ-25 «Пародонт-2»;
- МБИ-26 «Мотокард»;
- МБИ-27 «УДОД»;
- МБИ-30 «МОРЗЭ»;
- МБИ-32 «Профилактика-2»;
- МБИ-33 «Биокард»;
- МБИ-34 «Космокард»;
- МБИ-35 «Альгометрия»;
- МБИ-36 «Контент»;
- МБИ-37 «Пилот-Т»;
- МБИ-38 «Взаимодействие-2»;
- МБИ-39 «ДАН»;
- РБО-3 «Матрешка-Р».

*Космическая биология и биотехнология:*

- БИО-1 «Полиген» (фото- и видеосъемка);
- БИО-2 «Биориск» (пассивное экспонирование + подготовка перед ВКД-44);
- БИО-16 «Электронный нос» (рис. 5);
- БИО-19 «Феникс» (перенос);
- БТХ-10 «Конъюгация»;
- БТХ-42 «Структура» (фото);
- БТХ-44 «Кальций»;
- БТХ-45 «Биопленка»;
- БТХ-47 «Микровир»;
- БТХ-49 «Фаген»;
- БТХ-50 «Константа-2» (перенос);
- БТХ-51 «Продуцент».

*Технологии освоения космического пространства:*

- ТЕХ-14 «Вектор-Т» (автомат);
- ТЕХ-15 «Изгиб» (автомат);
- ТЕХ-22 «Идентификация»;
- ТЕХ-33 «Контроль»;
- ТЕХ-42 «Наноспутник» (автомат);
- ТЕХ-44 «Среда МКС»;
- ТЕХ-52 «Визир»;
- ТЕХ-58 «Выносливость» (пассивное экспонирование);
- ТЕХ-60 «Таймер»;
- ТЕХ-62 «Альбедо» (автомат);
- ТЕХ-64 «Пробой»;
- ТЕХ-68 «ИМПАКТ»;
- КПП-24 «Тест» (подготовка перед ВКД-44);
- ТЕХ-46 «Кварц-М»;
- ТЕХ-55 «Перспектива-КМ» разъемов за пан. 202 в МИМ.



Рис. 5. А. Мисуркин проводит эксперимент «Электронный нос»

*Образование и популяризация космических исследований:*

- ОБР-4 «РадиоСкаф» (автомат);
- ОБР-7 «О Гагарине из космоса»;
- ОБР-10 «Интер-МАИ-75»;
- АСР-1 «Сферы»;
- АСР-2 «EarthКАМ».

*Новые эксперименты:*

- ОБР-11 «Ряска».
- АСР-13 «Диффузионное пламя» (АСМЕ);
- ТЕХ-46 «Кварц-М».

Всего 57 экспериментов, из них 8 без участия экипажа (рис. 6). Время, затраченное на выполнение экспериментов, составило 282 часа (из них 49 часов по Task List). Общее рабочее время составило 1012 часов.

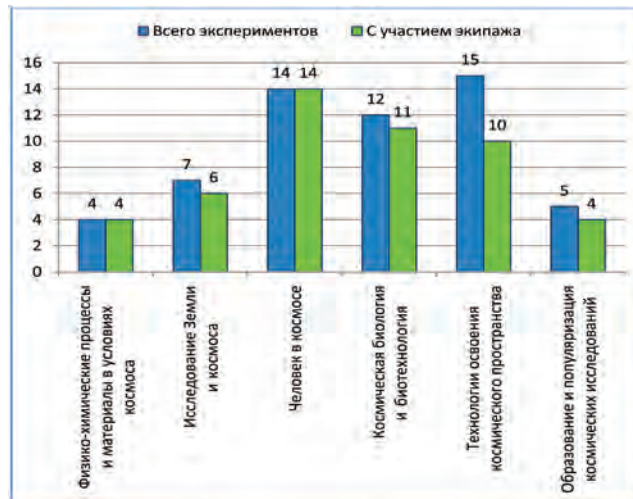


Рис. 6. Космические эксперименты

## Выводы

Уровень подготовленности экипажа МКС-53/54 по ТПК «Союз МС-06» и РС МКС позволил экипажу успешно выполнить запланированную программу космического полета и высказать много важных замечаний и предложений по ТПК.

Полет экипажа МКС-53/54 продолжил этап эксплуатации МКС международными экипажами.

Высказанные экипажем в ходе полета и послеполетного разбора замечания и предложения целесообразно использовать заинтересованным организациям для совершенствования космической техники, повышения качества подготовки космонавтов и деятельности экипажа в ходе выполнения программы полета, организации работы персонала ГОГУ и других заинтересованных организаций.



УДК 61:629.78.007

## МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА ЭКИПАЖА МКС-53/54 (ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ)

В.В. Богомолов, В.И. Почуев, И.В. Алферова,  
Е.Г. Хорошева, В.В. Криволапов

Докт. мед. наук, профессор В.В. Богомолов (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)  
Канд. мед. наук В.И. Почуев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)  
Канд. мед. наук И.В. Алферова; ст.н.с. Е.Г. Хорошева;  
ст.н.с. В.В. Криволапов (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)

В статье представлены результаты медицинского обеспечения полета экипажа МКС-53/54. Дается краткая характеристика функционирования систем медицинского обеспечения полета и поддержания стабильности среды обитания космонавтов на РС МКС. Подведены итоги выполнения рекомендаций медицинских специалистов, программы медицинского контроля и использования бортовых средств профилактики нарушения состояния здоровья космонавтов в полете.

**Ключевые слова:** медицинское обеспечение, медицинский контроль, система профилактики, среда обитания, режим труда и отдыха.

### **Medical Aspects of Securing the Flight of the ISS Crew for Expedition 53/54 (Express Analysis). V.V. Bogomolov, V.I. Pochuev, I.V. Alferova, E.G. Khorosheva, V.V. Krivolapov**

The paper shows the results of medical maintenance of the ISS-53/54 expedition and gives a brief description of operation of the medical support system and maintaining the stability of human environment aboard the ISS RS. Besides, the paper sums up results of implementing medical recommendations, program of medical monitoring and the use of onboard means designed to prevent the alteration of cosmonauts' health status in spaceflight.

**Keywords:** medical support, medical monitoring, preventive system, human environment, work-rest schedule.

### **Выполнение программы полета**

Полет в составе экспедиций (рис. 1):

– экспедиция МКС-53 – с 13 сентября по 13 декабря 2017 года в составе шести человек (два представителя Роскосмоса, три представителя NASA и один представитель ESA);

– экспедиция МКС-54 – с 14 по 19 декабря 2017 года в составе трех человек (один представитель Роскосмоса и два представителя NASA); с 19 декабря 2017 года по 28 февраля 2018 года в составе шести человек (два представителя Роскосмоса, три представителя NASA и один представитель JAXA).



Рис.1. Экспедиция МКС-53/54

Длительность полета одного российского (БИ-1МКС-53/КЭ МКС-54) и двух американских (БИ-2 и БИ-3) членов экспедиции 53/54, прибывших на корабле «Союз МС-06», составила 168 суток.

*Этапы полета экспедиции*

13.09.17 г. – выведение ТПК «Союз МС-06» – 00:17 ДМВ/21:17 GMT (12.09.17 г.).

Стыковка ТПК «Союз МС-06» к МИМ2 – 02:55 GMT/05:55 ДМВ.

27/28.02.18 г. – расстыковка ТПК «Союз МС-06» от МИМ2 – 23:08 GMT/02:08 ДМВ (28.02.18 г.). Время посадки – 02:31:43 GMT/05:31 ДМВ (28.02.18 г.).

*Основные динамические операции*

16.09.17 г. – отстыковка SpX-12 «Dragon» манипулятором SSRMS от Node2 – 21:58 GMT.

14.10.17 г. – выведение ТГК «Прогресс МС-07» – 11:46:53 ДМВ/08:46:53 GMT.

(12.10.17 г. – старт ТГК «Прогресс МС-07» не состоялся по техническим причинам.)

16.10.17 г. – стыковка ТГК «Прогресс МС-07» к СО1 – 11:04 GMT/14:04 ДМВ.

12.11.17 г. – выведение корабля ОА-8 «Cygnus».

14.11.17 г. – стыковка корабля ОА-8 «Cygnus», установка на надирный порт Node1 с помощью манипулятора SSRMS. ОПЛ.

05.12.17 г. – отстыковка корабля ОА-8 «Cygnus» от Node1 – 17:06 GMT/20:06 ДМВ.

14.12.17 г. – расстыковка ТПК «Союз МС-05» от МИМ1 – 05:14 GMT/08:14 ДМВ.

Время посадки – 11:38 ДМВ.

15.12.17 г. – выведение корабля SpX-13 «Dragon» – 15:36 GMT/18:36 ДМВ.

17.12.17 г. – выведение ТПК «Союз МС-07» – 10:21 ДМВ.

17.12.17 г. – стыковка корабля SpX-13 «Dragon», установка на Node2 с помощью манипулятора SSRMS – 13.25 GMT/16:25 ДМВ.

19.12.17 г. – стыковка ТПК «Союз МС-07» к МИМ1 – 08:42 GMT/11:42 ДМВ.

27.12.17 г. – расстыковка ТГК «Прогресс МС-06» от АО СМ – 01:03 GMT/04:03 ДМВ.

12.01.18 г. – расстыковка корабля SpX-13 «Dragon» – 22:45 GMT. Освобождение от SSRMS – 09:58 GMT/12:58 ДМВ (13.01.18 г.).

13.02.18 г. – выведение ТГК «Прогресс МС-08» – 08:14 GMT/11:14 ДМВ.

15.02.18 г. – стыковка ТГК «Прогресс МС-08» к АО – 09:38 GMT/12:38 ДМВ.

*Внекорабельная деятельность*

*в СК «Орлан-МКС»:*

02.02.18 г. ВКД № 44 РС – КЭ, БИ-4 МКС-54. ОВЛ – 15:34 GMT, ЗВЛ – 23:48 GMT.

Общее время пребывания космонавтов в открытом космосе – 8 ч 13 мин.

*в ЕМУ:*

05.10.17 г. ВКД-44 АС – КЭ МКС-53, БИ-2, продолжительность – 6 ч 5 мин.

10.10.17 г. ВКД-45 АС – КЭ МКС-53, БИ-2, продолжительность – 6 ч 23 мин.

20.10.17 г. ВКД-46 АС – КЭ МКС-53, БИ-3, продолжительность – 6 ч 49 мин.

23.01.18 г. ВКД-47 АС – БИ-2, БИ-5 МКС-54, продолжительность – 7 ч 23 мин.

16.02.18 г. ВКД № 48 АС – БИ-2, БИ-6. ОВЛ: 11:58, ЗВЛ: 17:50 GMT, продолжительность – 5 ч 52 мин.

## **Выполнение программы полета и организация режима труда и отдыха (РТО) экипажа**

Старт ТПК «Союз МС-06» состоялся 13.09.17 г. в 00:17 ДМВ.

Выведение, автономный полет ТПК «Союз МС-06» и стыковку с МКС БИ-1 перенес хорошо. Сонливости и утомления не отмечал, симптомов космической болезни движения не было, организм сразу «вспомнил» состояние невесомости и чувства «перевернутости» не было, по сравнению с первым полетом.

После выполнения маневров сближения 13.09.17 г. в 05:55 ДМВ была проведена стыковка ТПК «Союз МС-06» с МИМ2 в автоматическом режиме по короткой 4-витковой схеме. После ОПЛ прибывший экипаж перешел на станцию. Космонавты провели консервацию ТПК, инструктаж по безопасности, а также сушку скафандров.

Режим труда и отдыха (РТО) экипажа ТПК «Союз МС-06» в первые сутки полета был напряженным в связи с выполнением сложной и ответст-

венной динамической операции по стыковке (рис. 2). Общее время работы в этот день с момента старта, с учетом времени работ в ТПК и на станции, составило у КК (БИ-1) 14,5 ч. После завершения работ на станции всем космонавтам было предоставлено время для отдыха и сна с 11:00 (13.09.17 г.) до 06:00 (14.09.17 г.) продолжительностью 19 часов.

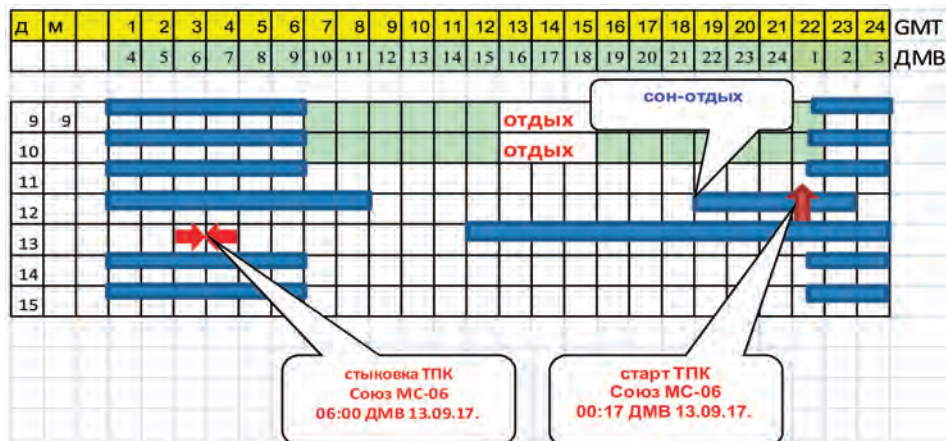


Рис. 2. РТО экипажа МКС на период выведения и стыковки ТПК «Союз МС-07»

Согласно требованиям «Основных правил и ограничений», в первые 2 недели полета, начиная с 15.09.17 г., рабочая зона у БИ-1 была сокращена на один час в день с целью предоставления ему времени на адаптацию и ознакомление со станцией. БИ-1 активно включился в выполнение программы полета.

Последующие 4 недели БИ-1 совместно с БИ-4 выполнял текущие работы на станции, научные эксперименты, эксперименты по программе Task List (список задач экипажа, которые могут быть выполнены на усмотрение экипажа во время рабочего дня или в личное время вне рабочих часов) и другие работы.

На 5-й неделе полета 16.10.17 г. в 14:04 ДМВ в штатном режиме состоялась стыковка ТГК «Прогресс МС-07» с СО1. ОПЛ произошло 16.10.17 г. в 17:14 ДМВ.

В день стыковки с ТГК «Прогресс МС-07» (16.10.17 г.) РТО был относительно напряженным: плановое время работы в этот день составило у БИ-1 8 ч 25 мин. Дополнительно к плану, по собственной инициативе, космонавт выполнил работы по разгрузке ТГК «Прогресс МС-07» № 437, фактическое время выполнения работ в этот день у БИ-1 составило 10 ч 10 мин. Рабочая зона увеличилась за счет сокращения физических тренировок на 1 час.

На 7-й неделе полета (25.10–31.10.17 г.) 25.10.17 г. БИ-1 на выполнение работы по замене средств звукоизоляции СКВ1 затратил два часа дополнительно к плановому времени, из-за чего не выполнил ФУ на БД-2 (1,5 ч);

в тот же день разгрузкой ТГК «Прогресс МС-07» он занимался на 2 часа больше, чем было запланировано, а также выполнил по программе Task List эксперимент «Экон». В итоге 25.10.17 г. фактическое время выполнения работ у БИ-1 составило 11 ч 15 мин (планировалось 6 ч 25 мин, что являлось существенной переработкой).

В другие рабочие дни БИ-1 инициативно выполнял разгрузку ТГК «Прогресс МС-07» и эксперименты по программе Task List, на что затрачивал от 30 минут до 1 часа 30 минут.

В дни отдыха 28.10 и 29.10.17 г. БИ-1 продолжал инициативно разгружать ТГК «Прогресс МС-07», затрачивая по 2 часа ежедневно, и выполнял эксперименты по Task List (общее время работ за 2 выходных дня составило 8 ч 15 мин). Таким образом, на 7-й неделе полета у БИ-1 отмечались переработки в рабочие дни, и не было полноценных выходных дней. РТО 7-й недели можно оценить как напряженный.

На 10-й неделе полета планировались 5 рабочих дней и 2 дня отдыха. Среднее время плановой занятости в рабочие дни у БИ-1 составило ежедневно 6 ч 30 мин. Это значит, что в рабочие дни космонавт работал в штатном режиме.

Дни отдыха планировались на 18.11 и 19.11.17 г. По указанию с Земли 18.11.17 г. БИ-1 выполнил РВР АСУ СМ, на что затратил 3 часа. Кроме того, он занимался видеосъемкой приветствий, выполнением работ и экспериментов по программе Task List. Фактическое время выполнения работ в этот день у БИ-1 составило 5 ч 15 мин. 19.11.17 г. БИ-1 занимался подготовкой репортажей для сайта «Роскосмоса» и социальных сетей. Фактическое время выполнения работ у БИ-1 составило в этот день 1 ч 30 мин.

На 14-й неделе полета (13.12–19.12.17 г.) РТО российского экипажа МКС оценивался как напряженный. Планировалось 4 рабочих дня и 3 дня отдыха (один из них – 14.12.17 г. – день отдыха после отстыковки ТПК «Союз МС-05» от МКС). Ежедневная рабочая нагрузка планировалась для БИ-1 в пределах 6,5–7,5 ч. Увеличение рабочей нагрузки до 7,5 ч связано с выполнением работ по отстыковке ТПК «Союз МС-05» (13.12–14.12.17 г.) и стыковке с МКС ТПК «Союз МС-07» (19.12.17 г.).

В начале отчетной недели (13.12.17 г.) на станции был подписан Акт о передаче смены по РС от БИ-4 к БИ-1, а также проведена церемония передачи командования, в результате чего БИ-1 стал КЭ МКС.

В этот день был изменен РТО: подъем состоялся в штатное время (6:00 GMT). После выполнения ряда работ по подготовке к спуску ТПК «Союз МС-05» экипажу МКС был предоставлен дневной отдых (13.01.17 г. с 13:00 до 18:00 GMT) продолжительностью 5 часов. После дневного отдыха космонавты продолжили работы по укладке возвращаемых грузов на ТПК «Союз МС-05» и другие работы по подготовке к спуску.

Отстыковка ТПК от МИМ1 осуществлена 14.12.17 г. в 05:14 GMT/08:14 ДМВ. Посадка СА – в 11:37 ДМВ в заданном районе.

По оценке специалистов ГМО РТО космонавтов в сутки расстыковки и посадки был напряженным. Рабочая нагрузка у КЭ составила 7 ч 20 мин. Период бодрствования у всех космонавтов составил 15 часов (с момента подъема до времени отхода ко сну экипажа МКС-54). Расстыковка и посадка проходили в ночные и ранние утренние часы.

После ухода экипажа ТПК «Союз МС-05» оставшимся на станции космонавтам было предоставлено время для сна и отдыха с 09:00 14.12.17 г. до 06:00 15.12.17 г. продолжительностью 21 час. Работы для КЭ 14.12.17 г. не планировались.

Дни отдыха КЭ планировались на 16.12 и 17.12.17 г. Дополнительно к плану космонавт выполнял эксперименты и работы по программе Task List. Фактическое время работы 16.12.17 г. составило 4 ч, 17.12.17 г. – 6 ч 45 мин, полноценных выходных дней у КЭ не было.

19.12.17 г. была проведена стыковка ТПК «Союз МС-07» с МКС по 2-суточной схеме в автоматическом режиме в 08:42 GMT. После ОПЛ в 10:55 GMT экипаж МКС-54 перешел на станцию и приступил к выполнению работ.

В сутки стыковки 19.12.17 г. РТО экипажа МКС-54 был напряженным. Время работы у КЭ составило 7 часов, у БИ-4, прибывшего на МКС, – 8 часов 55 минут. После окончания работ на МКС космонавтам было предоставлено время для сна и отдыха с 18:30 GMT (19.12.17 г.) до 06:00 GMT (20.12.17 г.) продолжительностью 11,5 часа.

На 15-й неделе полета (20.12–26.12.17 г.) в рабочие дни КЭ работал в штатном режиме, время работы увеличивалось за счет выполнения экспериментов по программе Task List, на что КЭ ежедневно затрачивал от 1 до 2 часов.

Дни отдыха планировались 23.12, 24.12 и 25.12.17 г. (25.12 – в связи с празднованием католического Рождества). В дни отдыха КЭ инициативно выполнял работы по разгрузке ТПК «Прогресс МС-06» и эксперименты по программе Task List, на что ежедневно затрачивал от 1 до 5,5 часов, из 3 планируемых дней отдыха у КЭ один день был практически рабочим днем.

На 16-й неделе (27.12.17–02.01.18 г.) экипажу планировались 4 рабочих и 3 дня отдыха. Дополнительный отдых 01.01.18 г. был предоставлен в связи с празднованием Нового года. В этот день по указанию с Земли была выполнена видеосъемка для Национальной федерации бадминтона России, на что КЭ затратил 4 часа.

Последующие 4 недели КЭ совместно с БИ-4 штатно выполняли работы по подготовке к операции «Выход» (ВКД-44), текущие работы на станции, научные эксперименты и другие задания.

На 21-й неделе полета (31.01–06.02.18 г.) РТО оценивался как напряженный и характеризовался выполнением операции «Выход» ВКД-44 в условиях измененного РТО (в ночное время 02.02.18 г.).

Планировались 4 рабочих дня, полдня отдыха 01.02.18 г. (перед ВКД-44), полдня отдыха 03.02.18 г. (после ВКД-44) и 1 день отдыха 05.02.18 г. (в понедельник).

Плановая рабочая нагрузка в среднем за неделю в рабочие дни составила у КЭ 6 ч 40 мин. Фактическое время выполнения работ увеличивалось за счет выполнения экспериментов по программе Task List и за счет увеличения продолжительности выполнения плановых работ, на что в каждый рабочий день затрачивалось от 30 минут до 2,5 часа.

Перед ВКД-44 сон экипажу был запланирован с 20:30 GMT 01.02.18 г. до 06:00 GMT 02.02.18 г. продолжительностью 9,5 часа.

02.02.18 г. КЭ и БИ-4 провели операцию «Выход» (ВКД-44). В соответствии с планом ВКД должна была продолжаться 6 ч 40 мин, в действительности ВКД продолжалась 8 ч 13 мин. Космонавты работали спокойно и уверенно. Основная задача ВКД была выполнена.

РТО экипажа в день проведения ВКД был напряженным, у КЭ время работы составило 19 ч 15 мин, а длительность периода бодрствования – 21 ч 30 мин.

После завершения ВКД зона сна планировалась с 03:30 GMT до 13:30 GMT 03.02.18 г. продолжительностью 10 часов. Остаток дня был посвящен отдыху с выполнением небольших по объему плановых операций с оборудованием, использованным при ВКД. У КЭ плановые работы заняли 2 ч 50 мин.

В день отдыха 05.02.18 г. рабочим планом КЭ были предусмотрены работы общей продолжительностью 1 ч 25 мин. Кроме того, космонавт выполнял эксперименты по программе Task List, на что затратил 1 час. Остальное время КЭ посвятил отдыху.

На 23-й неделе (14.02–20.02.18 г.) РТО экипажа был частично напряженным. 15.02.18 г. плановая рабочая нагрузка была увеличена за счет работ, связанных со стыковкой и разгрузкой ТГК «Прогресс МС-08», и составила у КЭ 7 ч 15 мин.

Согласно требованиям «Основных правил и ограничений», начиная с 13.02.18 г., у КЭ рабочая зона была сокращена на 1 час. Это время отводилось на подготовку к возвращению на Землю. Сокращение рабочей зоны проводилось в рабочие дни ежедневно, кроме 15.02.18 г., когда выполнялись плановые работы с ТГК «Прогресс МС-08».

На 24-й неделе (21.02–27.02.18 г.) РТО оценивался как напряженный в связи с выполнением отстыковки ТПК «Союз МС-06» от МКС в ночное время.

Рабочая нагрузка КЭ планировалась в пределах 5 часов 30 минут–5 часов 55 минут, ему продолжали выделять 1 час для подготовки к возвращению на Землю.

КЭ в каждый из выходных дней занимался видеосъемкой по программе Task List, на что затрачивал ежедневно по 2 часа.

2 дня (26.02 и 27.02.18 г.) были посвящены завершению укладки возвращаемого оборудования и выполнению работ по подготовке к расстыковке ТПК «Союз МС-06» с МКС. Накануне посадки, 26.02.18 г., на станции был подписан акт о передаче смены по РС от КЭ к БИ-4 и проведена церемония передачи командования, в результате чего на БИ-4 были возложены функции КЭ МКС-55 (рис. 3).

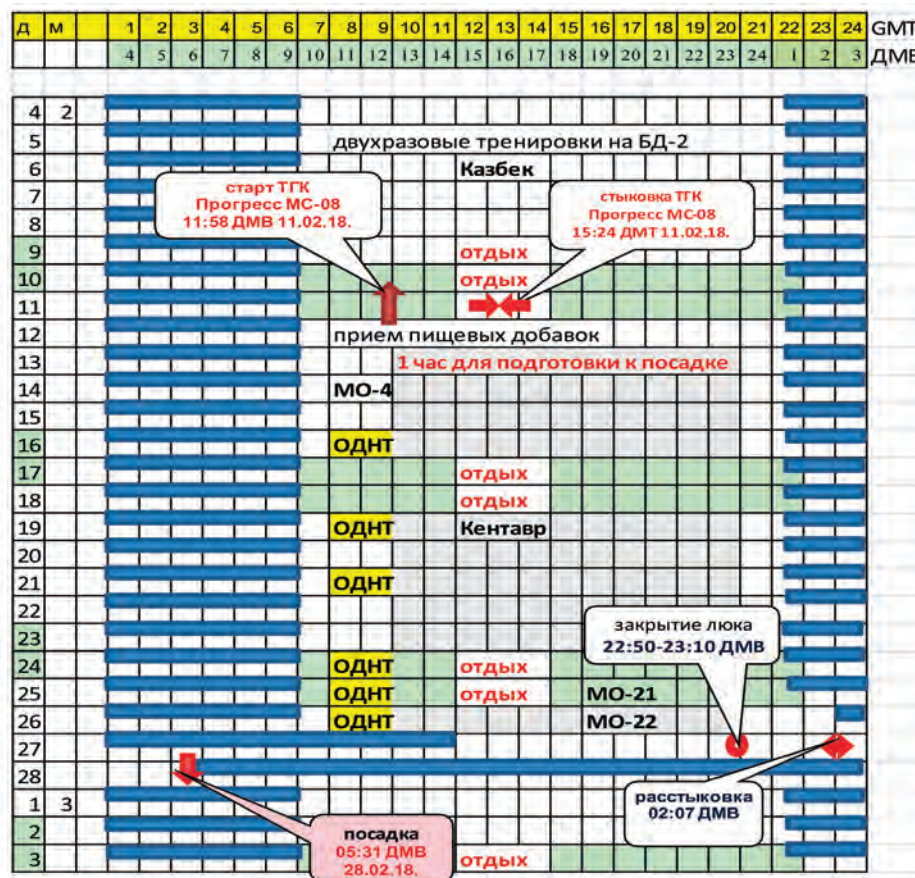


Рис. 3. Режим основных мероприятий для подготовки к посадке ТПК «Союз МС-05» № 735 (ОДНТ – отрицательное давление на нижнюю часть тела; ЗПЛ – закрытие переходного люка)

Сон перед отстыковкой ТПК «Союз МС-06» планировался с 23:00 GMT (26.02.18 г.) до 11:00 GMT (27.02.18 г.) продолжительностью 12 часов.

После завершения укладки грузов в ТПК «Союз МС-06» (27.02.18 г.) экипаж перешел в транспортный корабль. ЗПЛ произведено в 20:00 GMT/23:00 ДМВ.

Отстыковка корабля осуществлена в 23:08 GMT (27.02.18 г.)/02:08 ДМВ (28.02.18 г.). Посадка СА состоялась 28.02.18 г. в 05:31 ДМВ в заданном районе. РТО в сутки расстыковки и посадки был напряженным. Период бодрствования космонавта составил 16 часов, рабочая нагрузка – 12 ч 15 мин (6 ч 45 мин на МКС и 5 ч 30 мин в ТПК). Расстыковка и посадка проходили в ночное время суток (рис. 4).

Общая продолжительность экспедиции МКС-53 составила 168 суток, из которых планировались 115 рабочих дней и 53 дня отдыха.





Рис. 4. Эвакуация КЭ из спускаемого аппарата

Из 24 полетных недель 8 недель были отмечены признаками полной или частичной напряженности РТО, связанной с приходом на станцию и убытием со станции очередных экипажей, с проведением погрузочно-разгрузочных работ с грузовыми и пилотируемыми кораблями, с подготовкой и осуществлением внекорабельной деятельности, с выполнением заданий по программе Task List.

Большой объем дополнительных работ, выполненных в полете, во многом обеспечивался ограничением свободного времени в дни отдыха.

Фактически, по сообщениям с борта и данным специалистов ГОГУ, из 53 дней отдыха у КЭ было 19 полноценных дней отдыха, когда время работы не превышало 2 часов, и 16 неполных дней отдыха, когда фактическая продолжительность работ составляла от 2 до 4 часов. При этом 18 дней, предназначенных для отдыха, были практически рабочими днями, когда ежедневное время работы составляло 4,5 и более часов.

За весь полет суммарная плановая продолжительность работ в дни отдыха у КЭ составила 47 ч 25 мин. Фактически в дни отдыха КЭ на выполнение плановых и дополнительных работ израсходовал 84 ч 40 мин. Из них на работы и эксперименты по программе Task List в дни отдыха космонавт затратил 71 ч (на выполнение заданий по Task List в рабочие дни было затрачено 68,5 ч).

За весь полет на проведение всех работ по Task List по инициативе экипажа и по указанию с Земли БИ-1/КЭ затратил 212,5 часа, что практически равноценно 32,5 рабочим дням при плановой рабочей нагрузке 6,5 часа в день.

Во время рабочей встречи с космонавтом, которая состоялась 21.03.18 г. в ЦПК им. Ю.А. Гагарина, на вопрос об оценке РТО во время полета сказал: «РТО в целом планировался хорошо, чувствовалась забота и поддержка ЦУПа...». Отметил, что Task List стал таким, каким он хотел бы его видеть: разнообразным, появились разноплановые работы.

### **Медицинский контроль**

Медицинское обеспечение осуществлялось в соответствии с требованиями по медицинским операциям на Международной космической станции (International Space Station Medical Operations Requirements Documents – ISS MORD).

БИ-1/КЭ выполнил весь объем запланированных штатных операций периодического медицинского контроля состояния здоровья и среды обитания.

Оперативный медицинский контроль проводился:

– во время выведения, автономного полета и стыковки с МКС ТПК «Союз МС-06»: 12–13.09.17 г.;

– перед и во время проведения ВКД-44: 02.02.18 г.;

– при проведении ОДНТ-тренировок: 16, 19, 21, 24, 25, 26.02.18 г.;

– во время расстыковки и спуска на Землю ТПК № 734: 27–28.02.17 г.;

– при проведении научных экспериментов:

• МБИ-33 «Биокард»: 09.10.17 г.; 12.01.18 г.; 06.02.18 г.;

• МБИ-39 «ДАН»: 06.10.17 г.; 03.11.17 г.; 01.12.17 г.; 05.01.18 г.; 12.02.18 г.

Результаты динамического медицинского контроля свидетельствовали об адекватных физиологических реакциях, достаточных функциональных резервах организма и отсутствии каких-либо существенных отклонений в функциональном состоянии организма БИ-1/КЭ, что обеспечило сохранение высокого уровня работоспособности на всех этапах экспедиции.

Психологический климат в экипаже и взаимодействие с наземными службами оценивался высоко. БИ-1/КЭ отличался четкостью в работе, отличным взаимопониманием с группой медицинского обеспечения Главной оперативной группы управления (ГМО ГОГУ) и с полетными врачами, службами, и строго следовал всем медицинским рекомендациям.

### **Физиолого-гигиеническая характеристика среды обитания**

Параметры микроклимата колебались в нормальных пределах за исключением пониженной относительной влажности.

Повышение температуры воздуха в основном отмечалось в периоды «солнечной» орбиты станции. Для снижения температуры воздуха в служебном модуле российского сегмента МКС (СМ РС МКС) система обеспечения теплового режима (СОТР) переводилась в максимальный режим работы: включались в параллельную работу КОХ1 и КОХ2; РРЖ перенастраивались с 14 °С на 10 °С.

Замечания экипажа по температуре воздуха в СМ:

13.10.17 г. на вопрос ЦУПа-М о температурном режиме в РС МКС, БИ-4 МКС-53 ответил: «жарковато». По рекомендации специалистов СОТР, для снижения температуры РРЖ1 КОХ1 перенастроен с 14 °С на 10 °С.

14.11.17 г. на запрос ЦУПа-М относительно температурного режима в РС МКС, БИ-4 МКС-53 ответил, что «можно и понизить температуру», в связи с чем РРЖ2 КОХ2 переведен с режима 14 °С в режим 10 °С.

10.01.18 г. в 12:45 GMT КЭ попросил немного (на 2 °С) повысить температуру воздуха в СМ. РРЖ перенастроен на 14 °С. Вечером того же дня КЭ сообщил, что температура воздуха в СМ стала комфортной +24 °С.

11.01.18 г. КЭ попросил понизить температуру воздуха в СМ на 2 °С (на тот момент температура составляла +26 °С) и держать ее в комфортной зоне +24 °С.

12.01.18 г. утром экипаж пожаловался на повышение температуры в СМ до +26 °С, в связи с чем произведено переключение РРЖ2 с 14 на 10 °С.

04.02.18 г. КЭ отметил повышение температуры на РС МКС до 28 °С и связанный с этим дискомфорт, особенно во время выполнения ФТ; КЭ высказал пожелание понизить температуру на РС до 24 °С. Проведена перенастройка РРЖ КОХ1 с 14 °С на 10 °С.

06.02.18 г. во время частных медицинских конференций КЭ и БИ-4 отметили, что после перенастройки КОХ1 (04.02.18 г.) температурный режим комфортный.

Жалоб на сухость воздуха от экипажа не поступало. Для оптимизации влажностного режима периодически отключалась СКВ в РС.

Функционировали постоянно действующие системы российского сегмента:

БМП, СРВ-К2М, СКВ-1/СКВ-2, СОА «Воздух», СКО «Электрон-ВМ»; УОВ «Поток 150 МК» в СМ и функционально-грузовом блоке (ФГБ) включались ежедневно на 6 часов.

Периодически включался поглотительный патрон CO<sub>2</sub> в СМ и проводились наддувы станции кислородом, азотом и воздухом из ТПК.

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-06» на различных этапах полета показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-06» на участке выведения, орбитального полета и стыковки с МКС (12–13.09.17 г.)

Параметры	Минимально	Максимально	Допустимый диапазон
ДСА мм рт. ст.	811	847	450–970
ДБО мм рт. ст.	806	821	450–970
РО <sub>2</sub> мм рт. ст.	159	200	140–310
РСО <sub>2</sub> мм рт. ст.	1,4	2,1	<10
РН <sub>2</sub> О мм рт. ст.	12,1	17,6	<15
ОВ %	55	77	40–75
ТСА, °С	22,9	24,9	18–25
ТБО, °С	17,2	19,7	18–25

ДСА – давление в спускаемом аппарате; ДБО – давление в бытовом отсеке; РО<sub>2</sub> – парциальное давление кислорода; РСО<sub>2</sub> – парциальное давление углекислоты; РН<sub>2</sub>О – парциальное давление паров воды; ОВ % – относительная влажность воздуха; ТСА – температура в спускаемом аппарате в градусах Цельсия; ТБО – температура в бытовом отсеке в градусах Цельсия.

Таблица 2

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-06»  
на этапе расстыковки (27–28.02.18 г.)

Параметры	Минимально	Максимально	Допустимый диапазон
ДСА мм рт. ст.	743	793	450–970
ДБО мм рт. ст.	866	866	450–970
РО <sub>2</sub> мм рт. ст.	152	189	140–310
РСО <sub>2</sub> мм рт. ст.	2,3	4,1	<10
РН <sub>2</sub> О мм рт. ст.	10,0	12,1	<20
ОВ %	41	51	40–75
ТСА, °С	22,7	27,4	18–25
ТБО, °С	22,8	24,4	18–25

Замечаний на температурно-влажностный дискомфорт от экипажа ТПК не поступало.

**Замечания по работе СОЖ, СОГС и СТР**

Периодически отмечались нештатные отключения СКВ-1 («температура хладагона ниже нормы») и СКВ-2 (в связи со срабатыванием токовой защиты компрессорной установки); вновь включались в работу после перезапуска.

16.11.17 г. в течение дня периодически (4 раза) в системе АСУ появлялся сигнал «консервант некачественный». 18.11.17 г. экипаж выполнил РВР АСУ (замена трубопровода 5182-03, емкости с консервантом и ДКиВ (дозатор консерванта и воды). Работоспособность АСУ СМ была восстановлена. 21.11.17 г. заменен мочеприемник урины и фильтр-вставка АСУ.

27.12.17 г. зафиксировано срабатывание датчика дыма № 3 в МИМ1, срабатывание прекратилось автоматически. По докладу экипажа запаха гари и дыма в МИМ1 не обнаружено. Проведен анализ воздуха газоанализатором CSA-CP – показания в норме. Срабатывание сигнализации расценено специалистами как ложное.

Периодически (26.12.17 г.; 15, 17, 19 и 21.01.18 г.) фиксировались срабатывания датчиков дыма в ФГБ, загорался транспарант «SMOKE», срабатывание прекращалось автоматически. По докладам экипажа, запаха гари, дыма и других признаков возгорания обнаружено не было, проводился анализ воздуха газоанализатором CSA-CP в СМ и ФГБ – показания в норме, «нули». Срабатывание сигнализации расценено как ложное.

За время полета радиационная обстановка внутри станции в основном оставалась спокойной.

Накопленная поглощенная доза за полет у КЭ составила 5,98 сГр (5982 мрад), что не превысило допустимые значения доз, определенных согласно Flight Rules В 14.2.2-12 и Гост 25645.215-85.

Ежемесячно проводился дозиметрический контроль радиационной обстановки в РС МКС с использованием аппаратуры «Дозиметр «Пилле-МКС».

Все датчики находились в работоспособном состоянии. Измеренные значения мощности поглощенной дозы оставались в пределах, установленных полетными правилами Flight Rules В 14.2.2-12.

Во время выполнения ВКД № 44 РС и ВКД № 44-48 АС проводился контроль радиационной безопасности экипажа с использованием датчиков дозиметра «Пилле-МКС».

Замена карты памяти дозиметра «Пилле-МКС» выполнена 22.02.18 г.; укладка карты 31-016 возвращена на ТПК 734. Установлена карта памяти 30-016.

### ***Санитарно-гигиеническое состояние МКС***

Еженедельно экипаж проводил плановую уборку станции. При отборе пробы воздуха 19.10.17 г. и 18.01.18 г. пробоотборником ИПД-ННЗ в СМ аммиак не обнаружен.

После доставки (ТГК «Прогресс МС-07», октябрь 2017 г.) отсутствовавших на борту МКС пробоотборников ИПД-СО, с ноября 2017 года возобновлен ежемесячный контроль содержания монооксида углерода в атмосфере РС МКС. В пробах воздуха 13.11.17 г., 11.12.17 г., 18.01.18 г. монооксид углерода не обнаружен. 22.02.18 г. проба не отобрана в связи с докладом экипажа о негерметичности обоих насосов «Асигго».

25.10.17 г. ЦУП-Х сообщил, что во время монтажа спутников в модуле JEM произошла утечка 214 мл фреона-218. Проведен отбор воздуха в модуле JEM с использованием пробоотборников GSC и АК-1М на фреон. В РС МКС проведен контроль атмосферы с помощью анализатора фреона ФИТ 25 и 26.10.17 г. – фреон не обнаружен.

28.01.18 г. экипаж пожаловался на шум в районе панелей 249–250: «Звук добывает, особенно в правой каюте, там даже ночью слышно в наушниках». После анализа полученных записей специалистами определен источник шума – подшипник насоса панели 4СПН2.

03.02.18 г. проведено переключение панелей в КОБ2 (4СПМ2 на 4СПМ1), после чего экипаж отметил, что «стало тихо».

На протяжении всего полета санитарно-гигиеническую обстановку на станции оценивал в основном как комфортную. КЭ использовал наушники с активным шумоподавлением во время сна и периодически в течение дня.

Исследование акустической обстановки проводилось в модулях JLP, JPM, Columbus, Node2, US Lab, Node1, Node3, Airlock, ФГБ, МИМ2 и СМ РС МКС.

Акустические замеры проводились по общему уровню ( $L_a$ , дБА) и уровням звукового давления ( $L_p$ , дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими значениями частот 63–8000 Гц в контрольных точках (КТ) вдоль продольной оси указанных модулей.

Полученные результаты оценивались на соответствие ГОСТ Р 50804-95 и SSP 50094. Результаты анализа полученных данных показали, что в СМ РС МКС отмечено повышение уровней звука как на рабочих местах, так и в каютах, что требует использования индивидуальных средств защиты от шума.

Левая каюта СМ (БИ-1/КЭ) остается наиболее «шумной», уровни звука в которой превышают допустимые значения для периода сна на 6,5 дБА, что делает необходимым для БИ-1 использование индивидуальных средств защиты от шума во время сна.

Определение индивидуальной акустической нагрузки проводилось за дневной и ночной периоды времени впервые с использованием нового технического обеспечения для акустического монитора на МКС (АМ hardware), которое работало в режиме акустической дозиметрии.

У российских членов экипажа шумовая нагрузка:

- за дневной период превышает предельно допустимый уровень (ПДУ) на 4,3–10,8 дБА,
- за ночной период превышает ПДУ на 1,2–12,6 дБА.

По результатам статических измерений эквивалентных уровней звука за дневной и ночной периоды в СМ РС МКС в районе рабочего стола эквивалентный уровень звука за дневной период превышает ПДУ на 6,9 дБА, а за ночной период – на 4,1 дБА. В модулях АС МКС эквивалентные уровни звука за дневной и ночной периоды не превышали ПДУ.

Исследования по санитарно-микробиологическому состоянию МКС (по результатам МО-21 «Контроль микроэкоферы среды обитания» от 12.12.17 г.): обсемененность газовой среды плесневыми грибами поддерживалась в пределах нормативных показателей и соответствовала требованиям SSP 50260 MORD. Обсемененность газовой среды бактериями в одной зоне (ФГБ в районе панели 227) составляла – 2200 КОЕ в 1 м<sup>3</sup>, что превышало нормативный показатель, равный 1000 КОЕ/м<sup>3</sup> и не соответствовало требованиям SSP 50260 MORD.

По результатам МО-22 «Контроль санитарно-эпидемиологического состояния» от 12.12.17 г., содержание фрагментов плесневых грибов и бактерий на поверхностях интерьера и оборудования превышало нормативный показатель, регламентируемый SSP 50260 MORD, в двух зонах.

Была проведена обработка с помощью комплекта «Фунгистат» зон с повышенным содержанием микроорганизмов: СМ, БКС за панелью 218 и ФГБ, ворсовое покрытие панели 203.

### ***Питание и водопотребление***

В сеансах радиосвязи замечаний от экипажа на всем протяжении полета не поступало.

По данным частных медицинских конференций российского врача экипажа: на всем протяжении полета у БИ-1/КЭ аппетит хороший, водопотребление в норме.

Доставленные на ТК «Прогресс МС-07» свежие овощи и фрукты пришли в хорошем состоянии. БИ-1/КЭ отметил, что содержимое доставленных дополнительных наборов питания (ДНП) соответствует его пожеланиям и предпочтениям, высказанным на этапе формирования состава контейнеров.

09.01.18 г. отметил недостаток чая без сахара в рационах питания, т.к. не пьет чай с сахаром. При наличии возможности попросил заменить чай с сахаром на чай без сахара в планируемых поставках.

01.02.18 г. (перед ВКД): КЭ установил в скафандре «Орлан» емкость с питьевой водой.

03.02.18 г. (после ВКД) КЭ доложил, что пил воду во время ВКД (~1 л).

### ***Использование средств профилактики***

Профилактическое изделие «Браслет» БИ-1 не использовал.

Ознакомительную тренировку на БД-2 (1,5 часа) он провел 16.09.17 г., а 17.09.17 г. – инструктаж и разбор видео по тренажеру ARED и ознакомительную тренировку на ВБ-3М.

С 18.09.17 г. физические тренировки планировались по российской программе два раза в день общей продолжительностью 2,5 часа, на БД-2 (Т2) и ВБ-3М/ARED (с чередованием). В связи с повреждением полотна БД-2 с 30.11. по 21.12.17 г. тренировки планировались на Т2.

С 06.02.18 г. в соответствии с требованиями на заключительном этапе полета и рекомендациями специалистов ИМБП планировались двухразовые тренировки на бегущей дорожке (БД-2) с заменой через день одного занятия тренировкой на ARED и ОДНТ-тренировки (с 16.02.18 г.).

Примерка и подгонка изделия «Кентавр» 20.02.18 г. проведена без замечаний.

По ежедневным докладам ФТ выполнял в основном в полном объеме. На протяжении всего полета физические тренировки выполнял в соответствии с формой 24 и рекомендациям специалистов.

26.09.17 г. БИ-1 сообщил, что, закрывая панель велоэргометра, чем-то придавил ПУ – пульт управления силового нагружателя (НС-1), в результате экран на этом пульте с трещинами. (После доставки нового пульта выполнена его установка и тест 15.01.18 г.).

14.11.17 г. у БИ-1 на «Пингвине» порвалась расположенная на ноге штрипка, провел ремонт подручными средствами. Практически все время полета носил в течение дня «Пингвин».

23.11.17 г. во время проведения тестирования БД-2 у БИ-1 были замечания по работе системы притяга (по индикации величины нагрузки на панели управления БД-2), которые БИ-1 обсудил в приватной беседе со специалистами по физическим тренировкам.

29.11.17 г. экипаж доложил о нарушении целостности полотна бегущей дорожки БД-2. После анализа полученных с борта фотографий поврежденного полотна, специалистами ИМБП эксплуатация тренажера БД-2 для проведения физических тренировок была запрещена; рекомендовано наклеивание армированной клеящей ленты на место порыва (по центру) полотна по всей длине стыка. От американской стороны получено разрешение на использование российскими космонавтами бегущей дорожки Т2 до замены полотна БД-2. Для БИ-1 использование тренажера БД-2 было запрещено.

БИ-1 физические упражнения выполнял на Т2 в соответствии с планом. При беге на Т2 пользовался личным протоколом, который заключается в беге в активном режиме. Пассивный режим попробовал, бегать очень неудобно. Осевую нагрузку на Т2 выставлял немного больше, чем на БД-2, но субъективно нагрузка ощущалась одинаково.

03.01.18 г. экипаж доложил, что в процессе подготовки к выполнению физических упражнений на БД-2 пропало усилие в системе притяга, восстановить усилие не удалось. Экипажу было рекомендовано выполнить ФУ на ВБ-3М. Информация передана специалистам для анализа.

04.01.18 г. проведены ремонтно-восстановительные работы (РВР) БД-2 (натяжение шнура притяга) и последующий тест тренажера. По заключению специалистов БД-2 в рабочем состоянии.

Для подготовки к планируемой ВКД КЭ периодически выполнял pedalирование руками на ВБ-3М.

11.01.18 г. БИ-1 доложил о снижении усилия притяга БД-2, «если первоначально притяг с моим ТНК был 54 кг, то сейчас уже 50 кг, есть подозрение, что каретка может смещаться самостоятельно в сторону уменьшения притяга». После занятий на БД-2 КЭ произвел фотографирование положения каретки притяга и экрана монитора БД-2, всех вкладок в служебном режиме. Данные были переданы специалистам для анализа.

12.01.18 г. проведены работы по регулировке положения каретки притяга БД-2 и перезапуск ПО тренажера, после чего БД-2 работала штатно.

25.01.18 г. экипаж выполнил работу по контролю положения каретки тренажера БД-2 и сфотографировал положение каретки относительно выводного ролика, подняв шторку БД-2. Информация и фотографии переданы специалистам. 29.01.18 г. проведена регулировка положения каретки притяга БД-2 и перезапуск тренажера. По докладу БИ-1: «...каретка после тренировки также ушла, это видно по фотографии; ...первый бегал Антон, потом я выполнил свою, каретка ушла наполовину». Информация и фотографии переданы специалистам.

01.02.18 г. экипаж доложил, что «соскочили притяги с роликов», «большой проблемы нет с дорожкой, за исключением того, что уходит притяг; вернуть трос на место, заправить и вернуть притяг в исходное состояние мы сами можем сделать в субботу».

04.02.18 г. проведена натяжка амортизационного шнура системы притяга БД-2.

07.02.18 г. БИ-1 выполнил обновление программного обеспечения тренажера БД-2. В ходе тестирования тренажера КЭ отмечал увеличение силы притяга до 70–72 кг вместо выбранных 67 кг. Также на панели управления отмечалось появления восклицательного знака в желтом треугольнике в окне «Притяг» и в окне «подготовка ЧСС-монитора».



22.02.18 г. БИ-1 сообщил, что во время проведения примерки изделия «Кентавр» 20.02.18 г. у него все нормально, «а у партнеров по экипажу «Союза» гетры на ногах висят, пришлось распустить шнуровку и подгонять заново».

На всех этапах полета уровень физической тренированности БИ-1 оценивался как хороший.

## **Выводы**

Обеспечение безопасности на борту МКС тесно связано с организацией медицинского обеспечения космического полета, проведением санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий. Изучение и оценка потенциальных рисков, мониторинг среды обитания космонавтов позволили нивелировать неблагоприятные факторы космического полета и снизить их влияние на организм космонавтов.

Результаты медицинского контроля свидетельствовали об адекватных физиологических реакциях и достаточных функциональных резервах организма как в ходе полета, так и на завершающем его этапе.

ГМО ГОГУ контролировала планирование и реализацию медицинских операций.

Программа медицинского контроля, медицинских операций и научных медико-биологических исследований выполнена в запланированном объеме.

Психологический климат в экипаже на протяжении всего полета был позитивным.

В целом полет выполнен без медицинских проблем, влияющих на безопасность космического полета. Замечания и предложения экипажа приняты к реализации.

Уровень предполетной подготовки экипажа был достаточным и адекватным задачам полета.

Успешному завершению полета способствовали коллегиально-дружеские взаимоотношения участников полета, продуктивный деловой контакт со специалистами и операторами наземных служб и высокая ответственность космонавта (БИ-1/КЭ) и его партнеров за выполнение профессиональных задач.

УДК 629.78.007

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ КЭ «ЭКОН-М»  
КОСМОНАВТОМ А.А. МИСУРКИНЫМ  
В СОСТАВЕ ЭКИПАЖА МКС-53/54**

Г.Д. Орешкин, А.Н. Ядренцев, А.В. Севериненко

Канд. техн. наук Г.Д. Орешкин; А.Н. Ядренцев, А.В. Севериненко  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье представлены результаты выполнения программы космического эксперимента (КЭ) «Экон-М» космонавтом А.А. Мисуркиным. В составе экипажа МКС-53/54 проведен анализ работы научной и обеспечивающей аппаратуры, выданы предложения по использованию полученных результатов.

**Ключевые слова:** российский сегмент Международной космической станции, космический эксперимент, визуально-приборные наблюдения, научная и обеспечивающая аппаратура, экологическое обследование районов деятельности различных объектов.

**Results of Implementing the “Ekon-M” Space Experiment Program  
by A.A. Misurkin, a Member of the ISS Crew for Expedition 53/54.  
G.D. Oreshkin, A.N. Yadrentsev, A.V. Severinenko**

The paper presents the results of the “Ekon-M” Space Experiment Program carried out by A.A. Misurkin, a member of the ISS crew for Expedition 53/54, an analysis of the operation of scientific and auxiliary equipment and suggestions on the use of the data obtained.

**Keywords:** the ISS Russian Segment, space experiment, visual –instrumental observations, scientific and auxiliary equipment, environmental survey of activity areas of various objects.

КЭ «Получение информации для экологического обследования районов деятельности различных объектов с использованием РС МКС» (шифр «Экон-М») проводился российским космонавтом А.А. Мисуркиным в составе экипажа МКС-53/54 в соответствии с российской долгосрочной программой научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемой на РС МКС.

Целью данного эксперимента является экологическое обследование районов деятельности различных объектов на территории Российской Федерации и зарубежных государств посредством ведения космонавтами визуально-приборных наблюдений (ВПН) с помощью ручных оптических и иных (инфракрасных и т.д.) приборов в условиях космического полета с борта РС МКС.

КЭ «Экон-М» проводится на борту РС МКС с 2012 года и является продолжением КЭ «Экон».

Постановщик КЭ – ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина».

В ходе выполнения КЭ «Экон-М» осуществлялись ВПН и регистрация заданных объектов с помощью фото- и видеоаппаратуры с различными уровнями пространственного разрешения.

В процессе выполнения эксперимента решались следующие задачи:

– сбор оперативной информации о различных объектах в процессе ВПН с помощью ручных оптических приборов;

– пополнение базы данных фото- и видеоматериалов по экологическому обследованию районов деятельности различных объектов на территории РФ и зарубежных государств, распределенных по месту и времени;

– экспериментальная отработка методов комплексного наблюдения наземных, космических объектов и их регистрации с использованием фотографической и спектральной аппаратуры;

– получение видеoinформации о районах расположения объектов наблюдения для использования при подготовке космонавтов.

Объектами исследования является экологическое состояние атмосферы, почвы, акваторий рек, морей и океанов в районах портов, нефтяных терминалов, платформ морского бурения, промышленных предприятий, аэропортов, космодромов и объектов космической инфраструктуры, крупных городов мира, экологических бедствий и техногенных аварий и катастроф (аварии на АЭС, извержения вулканов, наводнения, пожары, аномальные явления в атмосфере и на поверхности Земли, в акватории Мирового океана и т.д.).

### **Реализация программы КЭ «Экон-М»**

Программой реализации научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых в период работы экипажа МКС-53/54, для космонавта было определено: в экспедиции МКС-53 – 25 сеансов наблюдения, в экспедиции МКС-54 – 25 сеансов, с временными затратами – 37 ч 30 мин.

В период наземной подготовки, а также перед стартом, космонавту доводился перечень первоочередных и наиболее значимых объектов наблюдения, проводился предварительный прогноз возможного наблюдения объектов, формировались задачи на выполнение КЭ.

Во время космического полета постановщиком КЭ на борт РС МКС было направлено 12 радиограмм, из них 7 – в период экспедиции МКС-53 и 4 – в период экспедиции МКС-54.

В период работы на борту РС МКС космонавт А.А. Мисуркин выполнил 54 сеанса наблюдений, общие временные затраты составили 40 ч 30 мин.

Количество фотоснимков, доставленных на жестком диске (в упаковке), составило 2094 файла (в форматах *\*jpg* и *\*nef*). Из полученных фотоснимков космонавт выбирал наиболее качественные и информативные и оперативно передавал их на Землю по каналам связи «ЦУП-М–ЦПК».

Оперативность передачи информации на Землю в среднем составляла более 2 суток, минимальная – около 12 ч.

Результаты эксперимента доставлены на Землю на жестком диске в упаковке «Экон-М» на корабле «Союз МС-06».

Для определения местоположения заданных объектов на борту РС МКС используется программа баллистико-навигационной полетной обстановки (БНПО) «Сигма», которая содержит набор географических карт различного масштаба и выдает в графическом и других видах информацию, необходимую экипажу для организации наблюдений (постоянное отображение на экране дисплея в реальном времени положения МКС, автоматическое определение на электронных картах названия региона, трассы текущего витка, зоны видимости ближайших НИПов, времени начала и конца очередного сеанса связи, светотеневой обстановки на орбите и т.д.). Программа «Сигма» позволяет выполнить оперативный расчет (прогноз) времени прохождения и условий видимости с борта МКС заданного района земной поверхности.

При реализации КЭ «Экон-М» космонавт А.А. Мисуркин за время своего полета работал совместно с российскими космонавтами С.Н. Рязанским (МКС-53) и А.Н. Шкаплеровым (МКС-54).

Помимо наблюдения и фоторегистрации объектов большое количество времени было затрачено на обработку фотоснимков и их передачу постановщику КЭ через ЦУП-М по каналам радиотехнической системы передачи информации (РСПИ).

Обработка фотоснимков проводилась в основном в личное время. Качество фотоснимков позволило получить необходимую информацию об объектах наблюдения.

### **Анализ работы научной и обеспечивающей аппаратуры**

Регистрация объектов наблюдения осуществлялась цифровой полноформатной зеркальной фотокамерой *Nikon D5* в комплекте с длиннофокусным объективом *AF-S Nikkor – 800 мм f/5.6* совместно с телеконвертером *Nikon TC800-1,25E*. Фотосъемка выполнялась в ручном режиме с установкой значений диафрагмы 5,6–10, выдержки 1/1250–1/8000 с и чувствительности (ISO) в пределах 200–2600 единиц. При каждой фотосъемке создавалось два файла с изображениями в форматах *\*jpg* объемом от 20 до 25 Мбайт и *\*nef* объемом от 40 до 45 Мбайт.

Замечаний космонавта к работе фотооборудования нет.

Обработка полученной информации осуществлялась с помощью бортового ноутбука *ThinkPad Lenovo T61p*, установленного на автоматизированном рабочем месте (АРМ) *RSE1* в служебном модуле «Заря».

В период своей работы космонавт отмечает низкую производительность ноутбука по сравнению с современными компьютерами подобного класса, что сказывается на увеличении трудозатрат космонавта.

С целью снижения временных затрат при выполнении КЭ «Экон-М» целесообразно иметь отдельный высокопроизводительный ноутбук.

В целом программное обеспечение позволяет решать поставленные задачи при выполнении эксперимента, однако, по результатам его выполнения, космонавт А.А. Мисуркин предложил для сокращения времени обработки полученной информации автоматизировать некоторые процедуры работы с программным обеспечением.

Космонавт отмечает, что при работе с программой БНПО «Сигма» наблюдались отдельные сбои («зависания») на ноутбуке *APM RSK1*, на *APM RSK2* программа работала устойчиво.

Полученная информация оперативно передавалась в ЦУП-М по каналу РСПИ, пропускная способность которой на участке «РС МКС–ЦУП-М» составляла до 100 Мбит/с.

РСПИ находится в рабочем состоянии, однако «скапливание» в канале больших объемов видео- и фотоматериалов по другим экспериментам и низкая производительность системы приводили к снижению оперативности их получения постановщиком КЭ.

Наземный цифровой канал связи «ЦУП–ЦПК» работают устойчиво. Замечаний нет.

Для проведения КЭ «Экон-М» на борт РС МКС с каждым транспортным пилотируемым кораблем «Союз» доставляется укладка с расходными материалами, в состав которой входит подключаемый через порт *USB HDD*-диск (объемом 1 Тбайт памяти) и два электронных носителя ключевой информации для работы со специализированным ПО. Также для работы данного ПО на *HDD*-диске размещена ОС *Windows 7*. Перед отправкой на борт РС МКС данные носители проходят процедуру проверки корректности работы ПО на летной версии ноутбука и верификационные испытания на предмет отсутствия вредоносных файлов. Результаты испытаний оформляются соответствующими актами о ПСИ и протоколами верификации, после чего выпускаются заключения о допуске на борт расходных материалов для КЭ «Экон-М».

Замечаний к составу укладки у космонавта нет.

Регистрация объектов наблюдения выполнялась через 6–9 иллюминаторы. Открытие 9-го иллюминатора требует определенных временных затрат. Научная аппаратура «СКПФ-У» (система координатной привязки фотоснимков с использованием ультразвуковых датчиков) КЭ «Визир», установленная на 9-м иллюминаторе, вызывает неудобство работы с фотокамерами с длиннофокусными объективами. Также поле зрения иллюминатора частично закрыто элементами размещенных на внешней поверхности станции конструкций.

Состояние иллюминаторов, по докладу космонавта, хорошее.

Обмен служебными данными между РС МКС и ЦУПом-М и информационная поддержка экипажа обеспечивалась с помощью ноутбука *RSS2*.

### **Результаты, полученные при проведении КЭ «Экон-М»**

В соответствии с полетным заданием космонавт А.А. Мисуркин осуществлял экологическое обследование районов деятельности различных объектов

на территории Российской Федерации и зарубежных государств. Данная задача заключалась в формировании и периодическом сборе информации о заданных объектах, используя технические возможности бортовой аппаратуры с учетом баллистико-навигационных обстановки, оптико-геометрических ограничений по условиям наблюдения и регистрации и метеорологических условий.

На фотоснимках, представленных ниже, приведены некоторые результаты работы космонавта А.А. Мисуркина по основным видам объектов наблюдения.

Пожары наблюдались во многих странах, расположенных в лесных и лесостепных зонах. В качестве примера на фотоснимках (рис. 1 и 2) представлены пожары на территории Канады и США. Лесные пожары представляют чрезвычайную опасность, поскольку к началу локализации они, как правило, успевают охватить большие площади.

Особенно страшны массовые пожары, которые возникают в условиях засушливой погоды, и их суммарная площадь составляет сотни тысяч гектаров. Большинство лесных пожаров спровоцировано деятельностью человека. Лесные и степные пожары в провинции Альберта (юг Канады) потребовали эвакуацию жителей ряда небольших городов, было закрыто около 10 автомобильных дорог. Часть территории провинции была затянута плотным едким дымом. Происходило стремительное распространение огня, чему способствовал сильный ветер, порывы которого достигали скорости до 100 км/ч.

На фотоснимке (рис. 2) зарегистрированы пожары западнее г. Алсаск (шт. Канзас, США), которые стали крупнейшими в этом регионе за последние 100 лет.

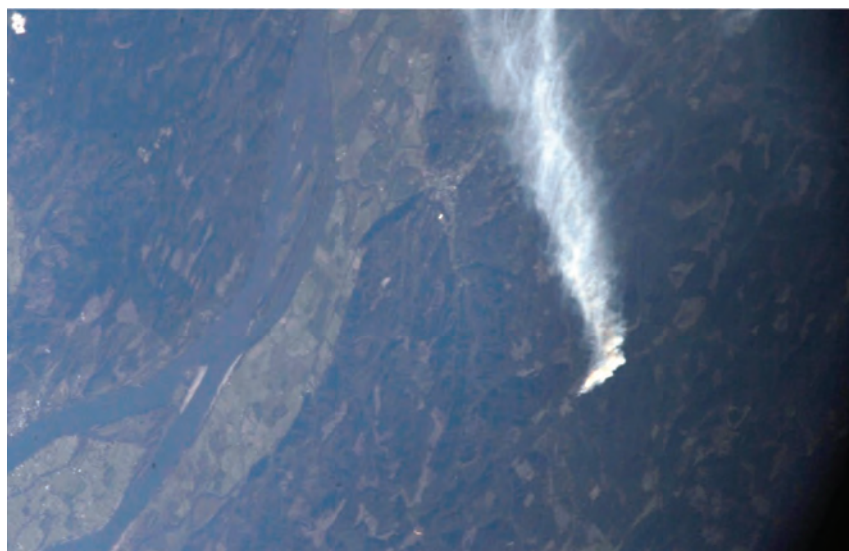


Рис. 1. Лесной пожар в провинции Альберта (Канада), 16.10.2017 г.



Рис. 2. Площадной пожар западнее г. Алсаск (шт. Канзас, США), 17.10.2017 г.

В Федеральном законе «Об охране окружающей среды» установлены специальные экологические требования к созданию и эксплуатации объектов энергетики (АЭС, ГЭС, ГРЭС и др.), которые относятся к источникам повышенной опасности. Одной из важных задач КЭ «Экон-М» является контроль состояния природной среды в местах нахождения перечисленных выше объектов, которые оказывают существенное влияние на ее экологическое состояние.

На фотоснимках (рис. 3 и 4), выполненных космонавтом А.А. Мисуркиным в осенне-зимний период, представлены Курская АЭС (одна из самых мощных атомных станций России, на которой проводится модернизация под энергоблоки поколения «3+»), и Волжская ГЭС (крупнейшая станция в европейской части России).

По данным Гидрометцентра России, в феврале 2018 года приток воды в водохранилища каскада Волжской ГЭС был больше нормы в среднем в два раза (подобная гидрологическая обстановка зафиксирована впервые).

Предварительный анализ фотоснимков свидетельствует о благоприятной экологической обстановке территорий, прилегающих к этим объектам.

Периодическому контролю подлежит крупнейший водоем Европы, но в то же время один из самых загрязненных в России – река Волга. Площадь Волжского бассейна составляет 8 % территории России (1 млн 360 тыс. км<sup>2</sup>).



Рис. 3. Курская АЭС, 21.10.2017 г.

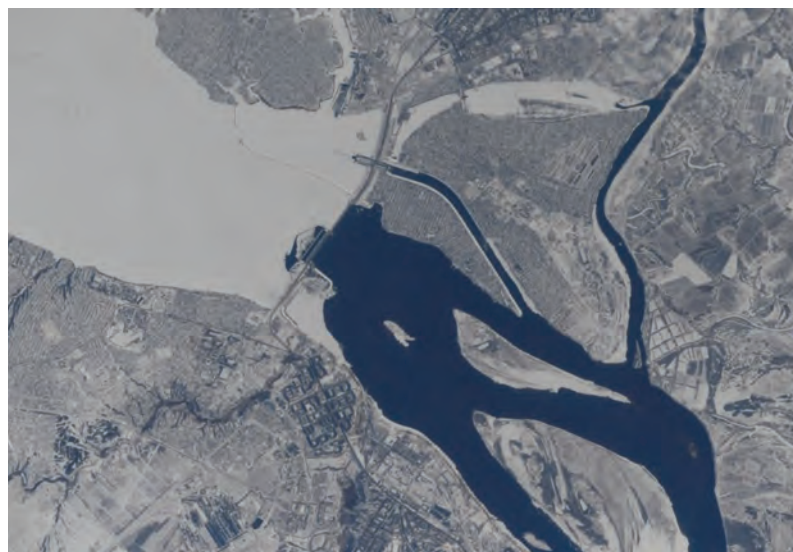


Рис. 4. Волжская ГЭС, 20.02.2018 г.

На рис. 5 представлен «сшитый» фотоснимок, выполненный в режиме «серийной съемки» и состоящий из 44 кадров. Такой метод позволяет получить площадные объекты с требуемым разрешением для проведения анализа состояния заданной территории. В данном случае, полученное и обработанное изображение дает возможность оценить состояние реки Волги и ее прибрежных территорий в районах Волгоградской и Астраханской областей.



Состояние экосистем Черного и Азовского морей за последние годы оценивается как неблагоприятное. В последние десятилетия в связи с интенсификацией химической, пищевой промышленности, сельскохозяйственной деятельностью, дампинга грунтов, добычей песка, транспортировкой нефти и газопродуктов, развитием инфраструктуры портов резко возросло антропогенное загрязнение шельфовой зоны Черного и Азовского морей биогенными элементами и ксенобиотиками.

Одним из объектов периодического контроля в данной акватории является Керченский пролив (рис. 6). На изображении, состоящем из 8 кадров, основным объектом является строящийся мост, соединяющий материк с полуостровом Крым. На нем распознаются основные мощности, используемые при строительстве моста.



Рис. 5. Река Волга, 12.10.2017 г.



Рис. 6. Строящийся мост через Керченский пролив, 10.10.2017 г.

Предварительный анализ фотоизображения показывает отсутствие значительных воздействий на экосистему. Ряд изменений имеет антропогенное происхождение, но не представляет существенную опасность.

Загрязнение прибрежных морских акваторий также происходит через речной и береговой стоки.

В качестве примера на фотоснимке (рис. 7) показано состояние морской прибрежной зоны г. Батуми. Река Чорух, впадая в Черное море, приносит с собой большое количество обломочного материала, как перемещаемого по дну, так и во взвешенном состоянии. Часть его уносится в море, значительная часть оседает в прибрежной зоне, образуя подводный конус выноса. Постепенно нарастая в сторону моря (в ширину и высоту), он начинает выступать на поверхности в виде выдающегося в море широкого конуса (дельты) с вершиной, обращенной к реке. В результате происходит постепенное обмеление прибрежной зоны.



Рис. 7. Прибрежная зона города и морского порта Батуми (Грузия), 16.02.2018 г.

В последние годы был принят ряд международных соглашений по охране Мирового океана от загрязнений. В них, в частности, строго установлено, что промывка танкеров и сброс отработанных судовых вод, в том числе льяльных вод, должны осуществляться не в открытое море, а в специальных портовых устройствах. Страны, подписавшие данное соглашение, несут юридическую и материальную ответственность за загрязнение вод океанов и морей. Несмотря на это, данные соглашения не всегда и не всеми выполняются.

На фотоснимке (рис. 8) зарегистрирован процесс промывки трюмов грузового транспорта и сброс технической жидкости в прибрежную зону города и морского порта Одессы (Украина).



Рис. 8. Прибрежная зона города и морского порта Одессы (Украина), 01.11.2017 г.

В целом, полученные результаты являются источником информации для оценки экологического и функционального состояния объектов и необходимы для контроля и прогноза состояния природной среды, определения источников загрязнения, регулирования процессов использования природных ресурсов и т.д.

## Выводы

1. Предварительная обработка и экспресс-анализ результатов, полученных при проведении КЭ «Экон-М» российским космонавтом А.А. Мисуркиным в составе экипажа МКС-53/54, свидетельствуют о выполнении программы КЭ «Экон-М».

За время работы космонавт в соответствии с поставленными задачами проводил экологическое обследование районов деятельности различных объектов на территории Российской Федерации и зарубежных государств.

Было проведено 54 сеанса наблюдения, получено 2094 фотоснимка (1047 в формате *\*jpg* и 1047 в формате *\*nef*) и затрачено 40 ч 30 мин.

Из полученных фотоснимков космонавт выбирал наиболее качественные и информативные и оперативно передавал их на Землю по каналам связи.

Оперативность передачи информации на Землю в среднем составляла более 2 суток, минимальная – около 12 ч.

Результаты эксперимента доставлены на Землю на жестком диске в упаковке «Экон-М» на корабле «Союз МС-06».

Качество фотоснимков удовлетворяет заказчиков, постановщика и участников КЭ «Экон-М».

2. Анализ работы используемой при выполнении КЭ «Экон-М» научной и обеспечивающей аппаратуры, которая в целом позволяла решать поставленные задачи, показал, что для более эффективной и качественной работы необходимо:

- ускорить работу по дооснащению РС МКС высокопроизводительным компьютером российской сборки для обработки информации по КЭ «Экон-М» (ответственный – ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»);
- рекомендовать провести мероприятия по улучшению качества работоспособности (резервирования) РСПИ с целью обеспечения оперативности передачи полученной информации по каналу связи (ответственный – ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»);
- проводить обновление состава цифровых фотокамер не реже одного раза в год (ответственный – ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва»).

3. Постановщику КЭ «Экон-М» совместно с заинтересованными организациями необходимо постоянно корректировать список наиболее приоритетных объектов наблюдения. Список объектов наблюдения целесообразно формировать для каждой экспедиции МКС в зависимости от экологического состояния территорий Российской Федерации, а также зарубежных государств. При этом необходимо учитывать время года.

4. Для оценки динамики различных процессов целесообразно осуществлять периодическую съемку в разное время года одной и той же территории, объекта и целых регионов.

Система регулярных наблюдений объектов (периодичность наблюдения) и их регистрация позволяет не только фиксировать процессы в реальном масштабе времени, но и прогнозировать динамику их развития.

5. Полученные результаты могут быть использованы:

- при решении задач мониторинга природных явлений, влияния антропогенных процессов на окружающую природную среду, оценки масштаба катастрофических явлений и т.д. в интересах проведения контроля, прогноза, оценки последствий и принятия решений;
- для формирования различных информационных продуктов по объектам наблюдения для служб экологической безопасности;
- для отработки требований к специальным космическим комплексам, создаваемым в интересах различных министерств и ведомств России и требующим активного участия экипажа при их эксплуатации;
- для пополнения базы данных исследуемых объектов наблюдения в рамках КЭ «Экон-М» на территории РФ и зарубежных государств.

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 537.5

## ЛАБОРАТОРИЯ «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-3 ПЛЮС» НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ – УСПЕШНЫЙ ПРОЕКТ ПО ФИЗИКЕ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ

В.Е. Фортов, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев, С.А. Храпак,  
В.И. Молотков, В.Н. Наумкин, Д.И. Жуховицкий, А.Г. Храпак,  
Х.М. Томас, М. Швабе

Докт. физ.-мат. наук, профессор, академик РАН В.Е. Фортов;  
докт. физ.-мат. наук, профессор, академик РАН О.Ф. Петров;  
канд. физ.-мат. наук А.Д. Усачев; канд. физ.-мат. наук А.М. Липаев;  
канд. физ.-мат. наук С.А. Храпак; канд. тех. наук В.И. Молотков;  
канд. физ.-мат. наук В.Н. Наумкин; докт. физ.-мат. наук Д.И. Жуховицкий;  
докт. физ.-мат. наук А.Г. Храпак (ФГБУН ОИВТ РАН)

Докт. философии Х.М. Томас; докт. философии М. Швабе (Институт  
физики материалов в космосе Германского космического агентства)

В статье приводятся сведения о результатах успешной реализации совместного российско-германского проекта по исследованию физики сильно неидеальной комплексной (пылевой) плазмы в условиях микрогравитации. Комплексная (пылевая) плазма представляет собой низкотемпературную плазму, содержащую твердые частицы микронного размера. Эти микрочастицы приобретают большой заряд и становятся доминирующим компонентом в плазме. Благодаря возможности наблюдения за поведением отдельных пылевых частиц и исследования системы многих частиц на кинетическом уровне пылевая плазма в настоящее время активно используется при изучении явлений неидеальности в классическом конденсированном веществе. Для выполнения экспериментов с большими (более миллиона микрочастиц) изотропными трехмерными пылевыми системами необходимо устранить сильное влияние гравитации на заряженные пылевые частицы, что возможно при исследовании этих систем на борту Международной космической станции. С помощью уникальной лаборатории ПК-3 Плюс, работавшей на российском сегменте МКС с 2006 по 2013 гг., получен огромный объем научной информации о процессах в комплексной (пылевой) плазме. Выполнены эксперименты по исследованию фазового перехода плазменный

кристалл–плазменная жидкость при варьировании ряда параметров, рекристаллизации плазменно-пылевой системы, особенностей процессов в бинарных пылевых системах, электрореологической плазмы, флуктуаций положений микрочастиц в узлах плазменного кристалла. Выполнены эксперименты по изучению коллективного движения пылевых частиц, взаимодействия комплексной плазмы с крупной сильно заряженной макрочастицей, особенностей плазменно-пылевых неустойчивостей. До настоящего времени опубликовано более 60 статей по результатам экспериментов на ПК-3 Плюс в ведущих реферируемых научных журналах, тем не менее анализ и обработка полученного массива данных продолжается.

**Ключевые слова:** сильнонеидеальная комплексная (пылевая) плазма, микрогравитация, фазовый переход, плазменный кристалл, плазменная жидкость, сканирование.

**“Plasma Crystal-3 Plus” Laboratory at the Russian Segment of the International Space Station is a Successful Project on the Complex Plasma Physics. V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitsky, A.G. Khrapak, H.M. Thomas, M. Schwabe**

The paper contains information on the results of the successful realization of the joint Russian–German project of studies in the field of physics of the strongly-coupled complex (dusty) plasma under microgravity conditions. Complex (dusty) plasma is low temperature plasma containing solid particles of micron size. These particles acquire a high charge and become the dominating component in the plasma. Owing to a possibility of observing a behavior of separate dust particles and studying a system of many particles at the kinetic level, the dusty plasma is now actively used to investigate the phenomena of nonideality in the classical condensed matter. To perform experiments with large (more than a million of microparticles) isotropic three-dimensional dusty systems it is necessary to eliminate a strong influence of gravity on the charged dust particles what is possible during studies aboard the International Space Station. With the help of the unique PK-3 Plus laboratory which operated at the ISS Russian Segment from 2006 through 2013 the great volume of scientific information on processes in the complex (dusty) plasma has been obtained. Experimental studies of the “plasma crystal–plasma liquid” phase transition at varying a number of parameters, recrystallization of the dusty-plasma system, peculiarities of processes in the binary dusty systems, electrorheological plasma, fluctuations of the position of microparticles in the plasma crystal lattice points were carried out. Experimental studies of collective motion of dust particles, interaction of the complex plasma with a large highly charged macroparticle, and the features of dusty plasma instabilities were conducted. More than 60 papers on the results of experiments on the PK-3 Plus have already been published in the leading refereed scientific journals, nevertheless analysis and processing of the obtained data array are still in progress.

**Keywords:** strongly nonideal complex (dusty) plasma, microgravity, phase transition, plasma crystal, plasma liquid, scanning.

В статье сообщается о результатах завершеного цикла экспериментальных исследований сильнонеидеальной пылевой плазмы, выполненных на уникальной экспериментальной установке «Плазменный кристалл-3 Плюс» (ПК-3 Плюс), созданной в соответствии с программой научных исследований Роскосмоса. Экспериментальная установка была размещена на борту российского сегмента Международной космической станции и работала в период с января 2006 года по июнь 2013 года.

«Пылевая» или «комплексная» плазма состоит из слабо ионизированного газа и заряженных микрочастиц. Пыль и пылевая плазма широко распространены в космосе – они присутствуют в кольцах планет, хвостах комет, межпланетных и межзвездных облаках, мезосфере, грозовых тучах, они находятся в непосредственной близости от искусственных спутников и космических станций и т.д.

В комплексной плазме можно изменять силу электростатического взаимодействия между заряженными пылевыми микрочастицами, которую принято характеризовать безразмерным параметром  $\Gamma$  – отношением средней энергии парного кулоновского взаимодействия к тепловой энергии частиц (так называемым «параметром неидеальности»). Величина  $\Gamma$ , которая пропорциональна квадрату заряда микрочастицы  $Q^2$ , может варьироваться в очень широких пределах и достигать гигантских значений. Заряд линейно возрастает с увеличением размера частиц и может быть очень большим (например,  $Q \sim 3 \cdot 10^3$  электронных зарядов на частице радиусом 1 мкм). В комплексной плазме возможно формирование упорядоченных структур микрочастиц – плазменных кристаллов. Парным взаимодействием между частицами можно управлять путем подбора внешних условий. Эти уникальные особенности отличают пылевую плазму от «обычных» видов плазмы, где заряды ионов малы, потенциалы взаимодействия являются фиксированными, а параметр  $\Gamma$  едва достигает единицы.

Благодаря большой массе микрочастиц и небольшой вязкости нейтрального газа, характерные времена релаксации в пылевой компоненте (секунды) существенно превышают соответствующие времена в обычных веществах, но оказываются существенно меньшими времен релаксации в коллоидах. Это позволяет исследовать физические процессы, протекающие в пылевой плазме на кинетическом уровне, т.е. исследуя поведение отдельных микрочастиц в реальном времени. Свойства пылевой плазмы значительно разнообразнее свойств обычной многокомпонентной плазмы электронов и ионов различного сорта. Присутствие пылевой компоненты существенно образом сказывается на коллективных процессах в плазме. Пыль может не только модифицировать, но зачастую и определять спектр колебаний, влиять на эффекты затухания и неустойчивости. Пылевые частицы обычно могут наблюдаться невооруженным глазом или с помощью простейшей оптической техники, что позволяет существенно упростить методы диагностики параметров пылевых частиц и окружающей плазмы. Это также дает

принципиальную возможность проводить измерения с прямым определением функции распределения частиц по координатам и импульсам, позволяя тем самым детально исследовать фазовые переходы, критические явления и процессы переноса в пылевой плазме на кинетическом уровне.

В лабораторных условиях на Земле исследуются в основном двумерные плазменно-пылевые системы и кластеры.

Большое значение имеют эксперименты в условиях микрогравитации, т.к. микрочастицы в  $10^{12}$  раз тяжелее атомов. Это означает, что ряд прецизионных измерений в больших трехмерных плазменно-пылевых системах, содержащих более миллиона пылевых частиц, может быть выполнен только в условиях невесомости, где отсутствует влияние гравитации [1, 2].

На борту Международной космической станции выполнялись эксперименты с помощью уникальной установки ПК-3 Плюс по следующим направлениям: упорядоченные структуры в трехмерной пылевой плазме в слабом электрическом поле; поиск фазовых переходов кристалл–жидкость–газ в трехмерной изотропной плазменно-пылевой системе; структурные фазовые переходы в трехмерной пылевой плазме при внешних воздействиях; линейные и нелинейные волны в трехмерной пылевой плазме, в том числе ударные волны; коллективное движение пылевых частиц; низкочастотные плазменно-пылевые неустойчивости; особенности процессов в бинарных плазменно-пылевых системах.

### **Установка «Плазменный кристалл-3 Плюс» (ПК-3 Плюс)**

Схематичное изображение газоразрядной камеры для работы в условиях микрогравитации (установка ПК-3 Плюс) показано на рис. 1, детальное описание установки имеется в [3, 4]. Вакуумная камера состоит из стеклянной кюветы, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда с квадратным сечением. Верхним и нижним фланцами являются металлические пластины. Они включают в себя электроды, электрические выводы и вакуумные соединения. Электроды окружены заземленными охранными кольцами. 6 диспенсеров были смонтированы в нижнем и верхнем кольцах. Диспенсеры заполнялись монодисперсными частицами различного диаметра и металлическими сферами диаметром 1 мкм для улучшения инъекции микрочастиц. При встряхивании диспенсеров микрочастицы инжестировались в плазму разряда. Хорошо сбалансированная система электродов обеспечивает симметричное высокочастотное (ВЧ) поле, генерирующее однородную плазму с практически идентичными приэлектродными слоями.

Оптическое детектирование отдельных частиц осуществляется с помощью плоских лазерных лучей, перпендикулярных поверхности электродов, а также видеокамер. Видеокамеры и лазеры устанавливаются на горизонтальной передвижной платформе, обеспечивая возможность глубокого сканирования трехмерного облака частиц.



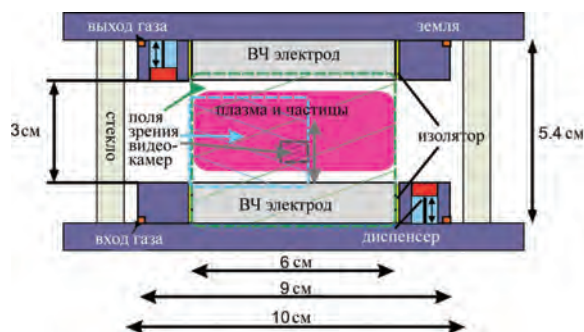


Рис. 1. Эскиз газоразрядной камеры установки ПК-3 Плюс, предназначенной для экспериментов в условиях микрогравитации на борту МКС

Эксперименты выполнялись космонавтами в соответствии с программой экспериментов, бортовой документацией, радиogramмами с Земли и переговорами с постановщиками, находившимися в Центре управления полетами (ЦУП), во время сеансов радиосвязи. Часть экспериментов контролировалась с Земли в режиме реального времени, когда был возможен сброс видеoinформации в ЦУП через бортовую ТВС и наземные измерительные пункты.

Первая серия экспериментов, выполненных на борту МКС В.И. Токаревым с использованием новой аппаратуры «Плазменный кристалл-3 Плюс» (рис. 2), показала работоспособность оборудования и перспективность дальнейших экспериментов по исследованию физики сильнонеидеальной пылевой плазмы. Выполненные базовые эксперименты с частицами диаметром 3,4 и 6,8 мкм в аргоне и неоне подтвердили возможность получения больших (свыше миллиона частиц) плазменно-пылевых систем с полным заполнением межэлектродного пространства. Отметим, что наблюдаемые структуры стабильны, конвективное движение пылевых частиц как на оси разряда, так и на периферии отсутствует. Рис. 3 демонстрирует пример такой плазменно-пылевой системы.

Это подтверждает возможность получения центрального плазменно-пылевого образования и проведения исследования различных явлений в пылевой плазме.



Рис. 2. Космонавт В.И. Токарев при выполнении первой серии экспериментов ПК-3 Плюс в январе 2006 года

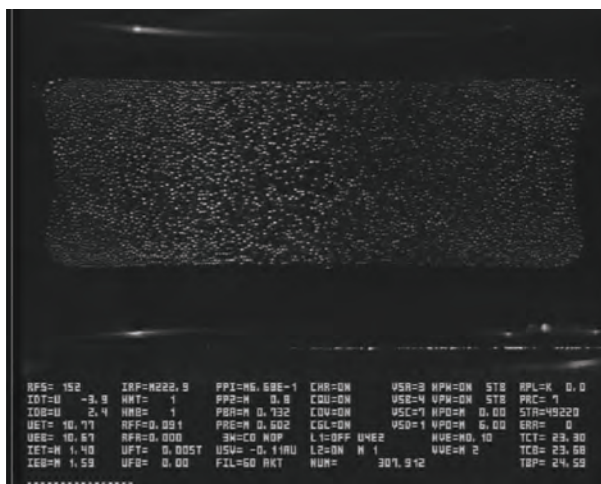


Рис. 3. Видеоизображение плазменно-пылевой структуры с монодисперсными частицами диаметром 3,4 мкм, полученное камерой общего вида. Давление аргона 60 Па

### Исследование фазового перехода плазменный кристалл–плазменная жидкость

В этом разделе приведем примеры выполненных исследований по одному из важнейших направлений экспериментов по изучению фазового перехода кристалл–жидкость в большой трехмерной плазменно-пылевой системе в условиях микрогравитации. Изменение фазового состояния комплексной плазмы производилось различными способами. В первых экспериментах рассматривалось поведение системы при варьировании давления нейтрального газа аргона. В последующих сериях экспериментов исследовалось изменение структурных свойств плазменно-пылевой системы при изменении заряда пылевых частиц, происходивших при обжати пылевой подсистемы из частиц малого диаметра пылевыми частицами большого диаметра. Исследовался также фазовый переход кристалл–жидкость при изменении концентрации плазменной компоненты.

Следует отметить, что при подготовке космонавтов для работы с аппаратурой ПК-3 Плюс постановщики экспериментов (русские и немецкие специалисты) знакомили будущих исполнителей экспериментов на орбите с планируемыми исследованиями и их особенностями. Все космонавты, выполнявшие эксперименты на ПК-3 Плюс, работали с хорошим знанием аппаратуры и пониманием проводимых исследований, что приводило в итоге к успеху.

Эксперименты выполнялись в аргоне при малой величине ВЧ-мощности, составлявшей примерно 0,5 Вт. Выполнены две серии экспериментов, в которых использовались частицы двух размеров: монодисперсные частицы

из двуокиси кремния диаметром 1,55 мкм и монодисперсные частицы из меламин-формальдегида диаметром 2,55 мкм [5].

Эксперименты выполнялись в следующей последовательности. Частицы инжектировались в межэлектродное пространство и формировали стабильное плазменно-пылевое образование при начальном давлении 15 Па. Далее открывался клапан к вакуумному насосу, что приводило к слабому снижению давления газа в плазменной камере. Затем клапан закрывался и давление газа медленно возрастало из-за поступления аргона в камеру. Отметим, что поток нейтрального газа практически не оказывал влияния на пылевые частицы. В процессе изменения давления газа, период которого составлял примерно 6 минут, выполнялось наблюдение плазменно-пылевой структуры. При этом давление изменялось от 15 Па до наименьшего достигнувшегося давления 11 Па и далее до давления 21 Па.

Для получения трехмерных координат положения пылевых частиц проводилось сканирование пылевой структуры. Выполнено 30 сканирований. Сканирование выполнялось путем одновременного движения лазера и камер в направлении, перпендикулярном полю зрения, со скоростью 0,6 мм/с. Время сканирования составляло 8 с при глубине сканирования 4,8 мм. Интервал времени между последовательными сканированиями составлял 4 с. Положения пылевых частиц идентифицировались в процессе томографической реконструкции 3-мерных картин, полученных с помощью камеры высокого разрешения, регистрировавшей область площадью 8 x 6 мм<sup>2</sup> над центром.

Рассмотрим глобальную реакцию пылевой компоненты на изменение давления. Пример пылевой структуры, регистрируемой камерой общего вида и камерой высокого разрешения, приведен на рис. 4 (а). Рис. 4 (б) демонстрирует изменение толщины пылевого образования в вертикальном направлении в зависимости от времени (номера скана) для обеих систем из малых и больших пылевых частиц. Видно, что положение верхней границы строго коррелирует с давлением  $p$ . При понижении давления верхняя граница движется вниз. Это имеет простое физическое объяснение. Пылевые частицы не могут проникнуть в область сильного электрического поля слоя пространственного заряда, формируемого около верхнего электрода. Положение верхней границы пылевого образования, таким образом, определяется положением границы слоя пространственного заряда. Толщина слоя пространственного заряда примерно пропорциональна длине электронного дебаевского радиуса  $\lambda_{De}$ . Этот параметр подчиняется следующей зависимости:

$$\lambda_{De} \sim n_e^{-1/2} \sim p^{-1/2},$$

где  $n_e$  – концентрация электронов.

Отсюда следует, что при понижении давления  $p$  частицы отталкиваются дальше от электрода, что находится в полном согласии с экспериментальными наблюдениями. Положение нижней границы связано с наличием

области, свободной от частиц (войд) в центральной части разряда. Смещение нижней границы относительно мало. Как результат, толщина пылевого образования обнаруживает заметное уменьшение при снижении давления. Таким образом, пылевая компонента испытывает сжатие при снижении давления. Результирующие зависимости межчастичного расстояния от давления для обеих систем из малых и больших частиц показаны на рис. 4 (в). Межчастичное расстояние  $\Delta$  строго коррелирует с давлением  $p$ .

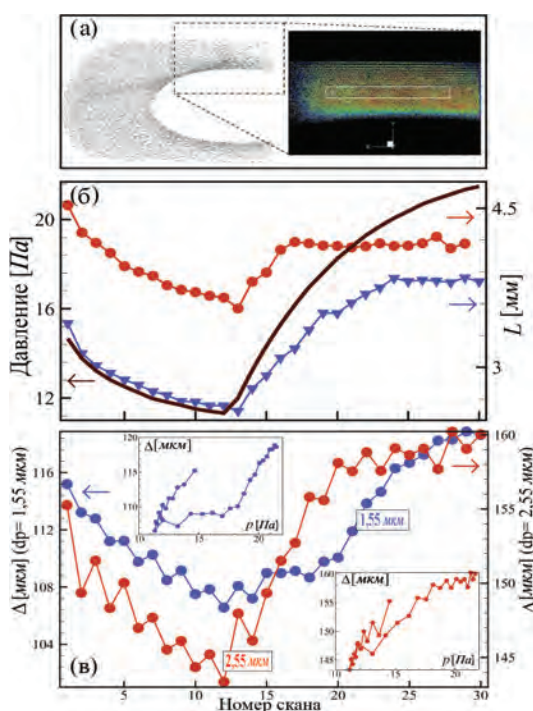


Рис. 4. (а) Видеоизображение пылевого облака (негативное изображение, полученное камерой общего вида (слева) и соответствующее поле зрения камеры высокого разрешения (справа)). Прямоугольником выделена часть структуры, использованная для детального структурного анализа.

(б) Толщина пылевой структуры в вертикальном направлении в зависимости от номера скана. Синие треугольники, соединенные линиями, соответствуют пылевой системе из малых частиц (1,55 мкм). Линии с красными кружочками соответствуют системе из больших частиц (2,55 мкм). Соответствующие значения давления показаны коричневой сплошной кривой (зависимость давления от номера скана практически идентична в обоих случаях).

(в) Среднее межчастичное расстояние  $\Delta$  (в части структуры, выделенной для анализа) в зависимости от номера скана для двух экспериментальных серий. Синий цвет соответствует системе из малых частиц. Красный цвет соответствует системе больших частиц. Вставки показывают зависимость межчастичного расстояния от давления, демонстрирующую наличие некоторого гистерезиса, особо заметного для случая малых частиц

Для оценки состояния фаз жидкость–кристалл используются различные критерии. Используем феноменологический критерий для кристаллизации и плавления, известный как критерий Равеше-Монтен-Стриитта [5]. Применяемые в литературе критерии основываются обычно на свойствах только одной из существующих фаз и предсказывают квази-универсальные значения определенных структурных или динамических параметров при фазовом переходе. Критерий Равеше-Монтен-Стриитта основан на свойствах радиальной функции распределения  $g(r)$  в жидкой фазе. Согласно этому критерию отношение значений  $g(r)$ , соответствующих первому ненулевому минимуму и первому максимуму  $R$

$$R = g(r_{min})/g(r_{max}),$$

постоянно вблизи кристаллизации и равно  $R \approx 0,2$ . Этот критерий достаточно хорошо описывает кристаллизацию для Леннард-Джоунса жидкости, но не является универсальным. Рис. 5 показывает рассчитанные по данным экспериментов значения критерия (индикатора) кристаллизации  $R$  для различных моментов времени (различных сканов). Применение граничного условия  $R \approx 0,2$  показывает, что система из маленьких частиц плавится при возрастании давления нейтрального газа (вторая половина исследовательского диапазона). В то же время видно, что плазменно-пылевая система из больших частиц остается в кристаллическом состоянии.

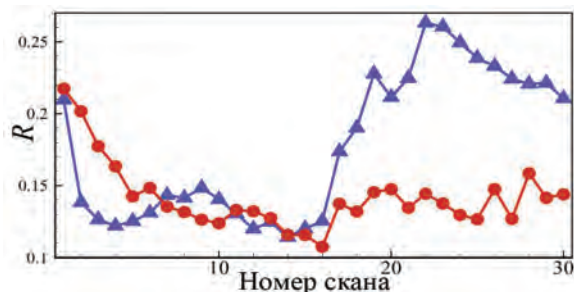


Рис 5. Индикатор кристаллизации и плавления для пылевой плазмы, состоящей из малых (синие треугольники) и больших (красные кружочки) частиц — коэффициент Равеше-Монтен-Стриитта

Наблюдаемое в эксперименте фазовое изменение в системе малых частиц следует отнести к изменению электрического взаимодействия между частицами. Варьирование давления газа приводит к изменению различных параметров пылевой плазмы и изменяет силу взаимодействия. При достижении некоторого порогового значения параметра взаимодействия происходит кристаллизация. Выполним оценки соответствующих параметров плазмы. Для оценок используем результаты расчетов с помощью программы SIGLO-2D [3].

В рассматриваемом диапазоне давлений газа и высокочастотного напряжения концентрация плазмы линейно зависит от давления  $p$  и описывается зависимостью  $n_0 \approx (1,2 + 0,11p) \cdot 10^8$ , где  $n_0$  в  $см^{-3}$  и  $p$  в  $Па$ . Температура электронов практически не зависит от давления и составляет  $T_e \approx 3,8$  эВ. Ионы и нейтралы находятся при комнатной температуре  $T_{i,n} \approx 0,03$  эВ.

При выполнении оценок предполагалось, что внутри пылевого облака температура электронов остается неизменной, в то время как концентрации электронов и ионов изменяются при сохранении квазинейтральности  $n_e + |Q/e|n_p \approx n_i$ , где  $Q$  – заряд частицы.

Боле того, предполагаем, что  $n_e$  остается близкой к значению концентрации электронов в плазме без частиц, а концентрация ионов возрастает в соответствии с изменениями пылевой компоненты. Используя эти предположения, можно рассчитать зависимость заряда пылевой частицы от давления (и межчастичного расстояния), применив определенную модель для потока электронов и ионов на поверхность частицы и при условии баланса этих потоков.

Экранирование пылевых частиц в плазменно-пылевой системе, в которой температура электронов значительно превосходит температуру ионов, определяется ионной компонентой, и эффективная длина экранирования  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{1 + n_i/n_e}$ , где  $\lambda_0 = \sqrt{T_i/4\pi e^2 n_e}$  – ионный дебаевский радиус.

Результирующие зависимости заряда пылевой частицы и длины экранирования приведены на рис. 6.

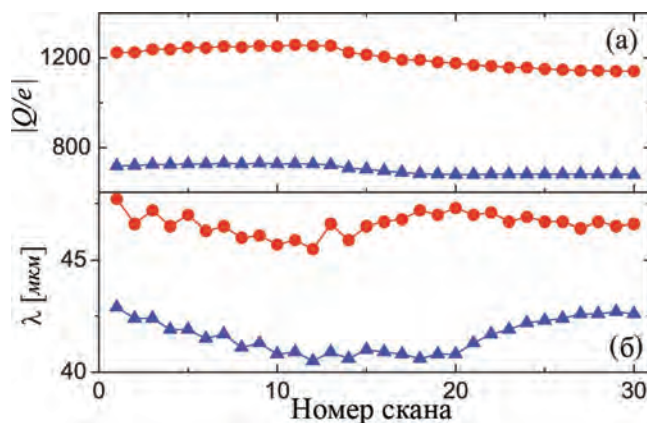


Рис. 6. Расчетные значения заряда пылевых частиц  $|Q/e|$  (а) и эффективная длина экранирования  $\lambda$  (б) в зависимости от номера скана. Красные кружки соответствуют системе из больших частиц. Синие треугольники соответствуют системе из малых частиц

Потенциал электрического взаимодействия между сильнозаряженными частицами обычно принимается в виде взаимодействия Дебая-Хюккеля (Юкавы):

$$U(r) = (Q^2 / r) \exp(-r / \lambda),$$

где  $r$  – межчастичное расстояние.

Используя измеренные в эксперименте значения межчастичного расстояния и рассчитанные значения заряда  $Q$  и длины экранирования  $\lambda$ , оценим изменения в энергии взаимодействия между ближайшими частицами  $U(\Delta)$ . Результаты оценок приведены на рис. 7. Энергия взаимодействия, как функция давления, максимальна при наименьшем значении давления  $p \approx 11$  Па для обеих исследованных плазменно-пылевых систем. Таким образом, увеличение давления нейтрального газа приводит к снижению энергии взаимодействия между пылевыми частицами, а снижение давления газа вызывает рост взаимодействия. Как отмечалось, главным фактором, ответственным за такое поведение, является сжатие плазменно-пылевой системы при снижении давления газа и, напротив, расширение системы при повышении давления.

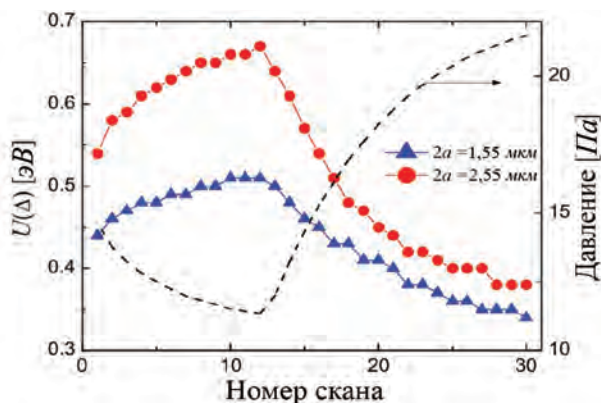


Рис. 7. Расчетная энергия межчастичного взаимодействия  $U(\Delta)$  для каждого скана. Синие треугольники соответствуют пылевой плазме с малыми частицами. Красные кружки соответствуют системе с большими частицами. Штриховая кривая показывает изменение давления нейтрального газа в процессе эксперимента. Следует отметить, что энергия взаимодействия пылевых частиц более чем на порядок величины превосходит температуру газа (комнатная температура) ( $T_n \approx 0,03$  эВ). Это свидетельствует о том, что обе плазменно-пылевые системы находятся в состоянии сильной неидеальности

Серия экспериментов по исследованию изменения структурных свойств плазменно-пылевой системы при изменении заряда пылевых частиц выполнялась при постоянном давлении аргона 10 Па [6]. Первоначальная система образовывалась при инъекции монодисперсных частиц из двуокиси кремния  $\text{SiO}_2$  диаметром 1,55 микрон (рис. 8 (а)). Затем выполнялись инъекции монодисперсных частиц из меламин-формальдегида диаметром 14,9 микрон. Смешивания частиц различного диаметра не происходит. Частицы малого диаметра формируют внутреннее облако. Частицы большого диаметра фор-

мируют внешнее облако, которое обжимает внутреннее пылевое образование, как видно из рис. 8 (б). Частицы большого диаметра могут дополнительно инжектироваться, что ведет к росту степени обжатия первоначального пылевого облака из частиц малого диаметра.

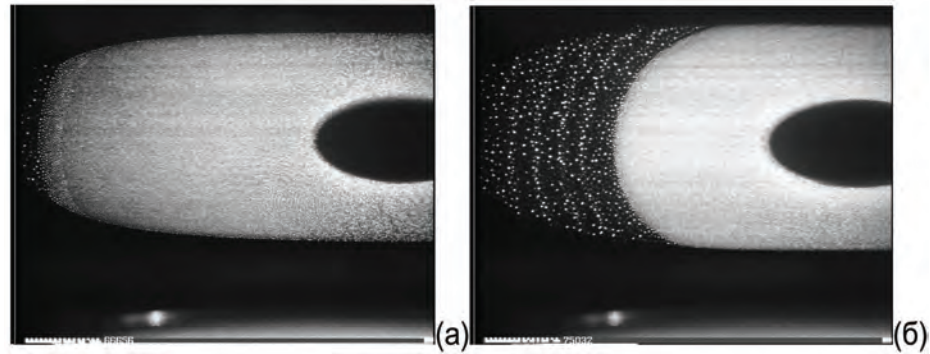


Рис. 8. Видеоизображения плазменно-пылевых систем:  
(а) из частиц диаметром 1,55 микрон,  
(б) после дополнительной инъекции частиц диаметром 14,9 микрон

Рис. 9 демонстрирует изменение парной корреляционной функции для начальной плазменно-пылевой системы из частиц малого диаметра и для сжатой системы при добавлении частиц большого диаметра, когда возрастает степень обжатия системы из малых частиц. В таблице 1 представлены некоторые расчетные параметры для пылевой подсистемы из частиц диаметром 1,55 микрон: межчастичное расстояние  $\Delta$ , полученное из парной корреляционной функции, концентрация пылевой компоненты  $n_p$ , определенная из обработки видеоизображений камеры высокого разрешения, заряд пылевой частицы  $Q$ , рассчитанный по модели ограниченного орбитального движения с использованием экспериментальных параметров плазмы.

Для анализа состояния плазменно-пылевой системы используем критерий Равеше-Монтен-Стриитта  $R$ . Из данных таблицы 1 видно, что при обжатии системы из частиц диаметра 1,55 микрон происходит уменьшение межчастичного расстояния и заряда пылевой частицы, а критерий  $R$  возрастает от малого значения (0,04), указывающего на высокую степень упорядоченности пылевой подсистемы (плазменный кристалл), до большого значения (0,21), что указывает на плавление плазменного кристалла.

Таблица 1

Параметры пылевой подсистемы в эксперименте по сжатию

$\Delta, \mu\text{м}$	$n_p, \text{см}^{-3} \cdot 10^5$	$Q$	$R$
125	5,10	2000	0,04
90	12,0	807	0,21



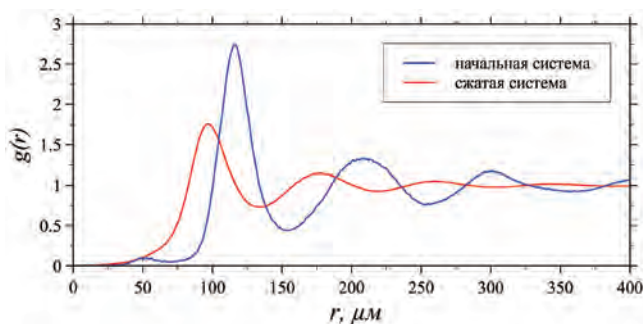


Рис. 9. Парные корреляционные функции для пылевых систем, представленных на рис. 8

Таким образом, выполненные эксперименты демонстрируют фазовый переход кристалл–жидкость вследствие падения абсолютной величины заряда пылевых частиц при возрастании их концентрации. Этот эффект, названный «зарядовым каннибализмом», был рассмотрен теоретически участниками проекта «Плазменный кристалл» в работе [7].

Был выполнен ряд экспериментов для изучения особенностей фазового перехода плазменный кристалл–плазменная жидкость в 3-мерной плазменно–пылевой системе при варьировании напряжения на электродах плазменной камеры. Изменение межэлектродного напряжения ведет к изменению концентрации плазменной компоненты и одного из важнейших параметров, определяющих поведение плазменно–пылевой системы, а именно, длины экранирования  $\lambda$ . В экспериментах использовались монодисперсные частицы  $\text{SiO}_2$  диаметром 1,55 микрон. Эксперименты выполнялись следующим образом: высокочастотный разряд генерировался при заданных давлении аргона и межэлектродном напряжении, и происходило формирование структуры пылевых частиц. Рис. 10 демонстрирует видеоизображения плазменно–пылевой системы, полученные камерой высокого разрешения при давлении аргона 20 Па и различных значениях межэлектродного напряжения. Ясно видно снижение степени упорядоченности пылевой подсистемы при уменьшении напряжения на электродах, т.е. при уменьшении концентрации ионов. Видеоизображения плазменно–пылевой системы при давлении аргона 40 Па (рис. 10) показывают, что в этом случае степень упорядоченности системы изменяется в направлении, противоположном предыдущему случаю.

Для интерпретации полученных результатов определим параметры наблюдаемых систем. Рис. 11 (а, б) демонстрирует парные корреляционные функции, определенные по результатам сканирования каждой из пылевых подсистем. Для анализа состояния системы используем, как и ранее, критерий  $R$ . Рис. 12 демонстрирует зависимость критерия  $R$  от межэлектродного напряжения  $U_{\text{эфф}}$ , т.е. от концентрации плазменной компоненты. Видно, что упорядоченность системы при двух различных значениях аргона изменяется

прямо противоположным образом: при  $20 \text{ Па}$  упорядоченность системы снижается при уменьшении  $U_{\text{эфф}}$  (или  $n_i$ ) – система плавится, а при  $40 \text{ Па}$  наблюдается кристаллизация системы при уменьшении  $U_{\text{эфф}}$ .

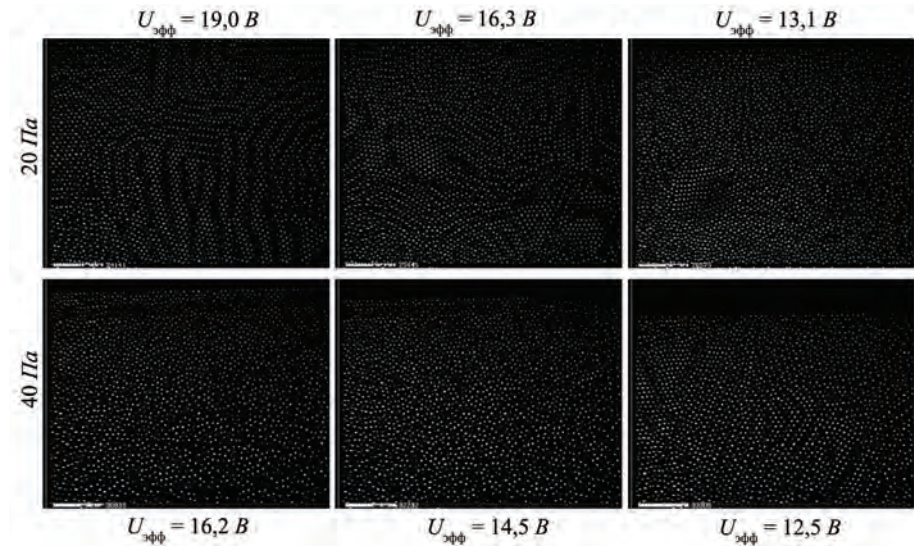


Рис. 10. Видеоизображения плазменно-пылевой системы, полученные камерой высокого разрешения, при давлениях аргона 20 и 40 Па при различных  $U_{\text{эфф}}$

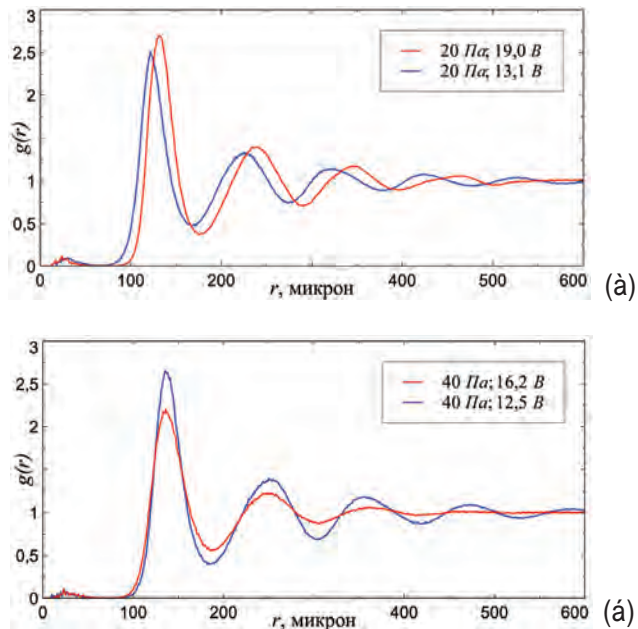
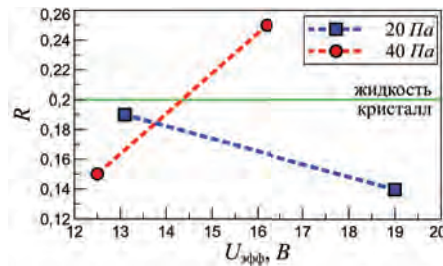


Рис. 11. Парные корреляционные функции пылевой системы при различных условиях

Рис. 12. Зависимость критерия  $R$  от межэлектродного напряжения  $U_{эфф}$ 

Для оценки концентрации плазменной компоненты (в первую очередь, ионов  $n_i$ ) используем результаты расчетов по модели SIGLO-2D [3]. Параметры плазмы рассчитывались без учета влияния пылевых частиц. Полученные концентрации  $n_i$  приведены в таблице 2. В таблице даны также значения длины экранирования  $\lambda$  и отношение длины экранирования к средней длине свободного пробега  $\lambda/l_i$ . Кроме того, в таблицах приведены значения межчастичного расстояния  $\Delta$ , параметра экранировки  $k$ , где  $k = \Delta/\lambda$ , и экспоненциального множителя  $e^k$  в параметре неидеальности  $\Gamma$  ( $\Gamma = (Q^2/T_p \Delta) e^k$ , где  $Q$  – заряд микрочастицы,  $T_p$  – кинетическая температура пылевых частиц. Как видно из таблиц,  $e^k$  возрастает при росте концентрации ионов. Это верно для обоих значений давления аргона. Следовательно, различный характер изменения упорядоченности пылевой подсистемы определяется, по-видимому, различием в изменении заряда пылевых частиц от концентрации  $n_i$ . Из теоретических исследований [1] известно, что заряд пылевой частицы – функция параметра  $\lambda/l_i$ . В диапазоне малых значений этого параметра заряд частицы падает при росте  $\lambda/l_i$ . Значения этого параметра для давления 20 Па соответствуют указанному диапазону. Поскольку параметр неидеальности  $\Gamma$  зависит от  $Q^2$ , снижение заряда микрочастиц при 20 Па, по-видимому, превалирует над ростом множителя  $e^k$ , и происходит снижение упорядоченности пылевой подсистемы при уменьшении  $U_{эфф}$  (и  $n_i$ ). С возрастанием давления аргона параметр  $\lambda/l_i$  также возрастает. При заметном росте этого параметра [1] зависимость заряда пылевой частицы от  $\lambda/l_i$  сдвигается в область минимального изменения  $Q$ . В этом случае следует ожидать, что главный вклад в изменение  $\Gamma$  обусловлен изменением множителя  $e^k$ . Вследствие значительного роста этого множителя при снижении  $U_{эфф}$  (в два раза) наблюдается рост упорядоченности пылевой подсистемы, а именно ее кристаллизация (рис. 12).

Таблица 2

Параметры пылевой подсистемы в эксперименте по варьированию напряжения

$P$ (Па)	$U_{эфф}$	$n_i$ (см <sup>-3</sup> )	$\lambda$ (μм)	$\Delta$ (μм)	$k$	$e^k$	$Q$ (е)	$U$ (эВ)
20	19,0	$8 \cdot 10^8$	43	131	3,05	0,047	$1,6 \cdot 10^3$	1,34
20	13,1	$5 \cdot 10^8$	54	122	2,26	0,1	$8,8 \cdot 10^2$	0,96
40	16,2	$9 \cdot 10^8$	40	136	3,4	0,033	$1,9 \cdot 10^3$	1,28
40	12,5	$6,5 \cdot 10^8$	47,5	136	2,86	0,057	$1,4 \cdot 10^3$	1,19

### Взаимодействие комплексной плазмы с макрочастицей

Целью завершающего эксперимента ПК-3 Плюс было исследование взаимодействия сильнозаряженных макрочастиц с пылевой плазмой, образованной монодисперсными микрочастицами. Выполнявший эксперимент космонавт П.В. Виноградов (рис. 13) с силой встряхивал контейнер ПК-3 Плюс, и стальные сферические макрочастицы диаметром 1 мм, находившиеся внутри диспенсера, разбивали его сетку, которая в обычных экспериментах позволяет проводить инъекцию микрочастиц, и входили в плазму разряда с микрочастицами. В результате впервые наблюдалось взаимодействие сильнозаряженных макрочастиц (заряд до  $1,8 \cdot 10^6$  электронов) с пылевой плазмой, сформированной микрочастицами, имевшимися в плазменной камере. Подобный эксперимент возможен только в условиях микрогравитации, поскольку в земных условиях макрочастицы немедленно упадут на нижний электрод.



Рис. 13. Космонавт П.В. Виноградов при выполнении заключительной серии экспериментов ПК-3 Плюс в 2013 году

На рис. 14 приведены видеоизображения, демонстрирующие примеры различного взаимодействия макрочастиц с пылевой плазмой. Рис. 14 (а) демонстрирует свободные от микрочастиц (чисто плазменные) полости вокруг сферической макрочастицы. Макрочастица имеет большой отрицательный заряд и отталкивает также отрицательно заряженные микрочастицы. Размер полости вокруг сферы дает возможность получить данные о балансе сил, действующих на микрочастицы на границе полости. Рис. 14 (б) демонстрирует макрочастицу, движущуюся к границе войдя с микрочастицами диаметром 1,55 микрон, и видно приближение этих микрочастиц к макрочастице. Такое «притяжение» заряженных отрицательно частиц обусловлено силой ионного увлечения, т.е. воздействием сильного потока ионов аргона в направлении макрочастицы.

Рис. 14 (в, г) дают примеры взаимодействия сильнозаряженной сферической стальной макрочастицы с пылевой плазмой при входе макрочастицы

в зону войда, рис. 14 (в), и при воздействии на граничную область войда, рис. 14 (г). При определенных условиях воздействие макрочастицы на пылевую подсистему приводило к возбуждению пылевых акустических волн [8].

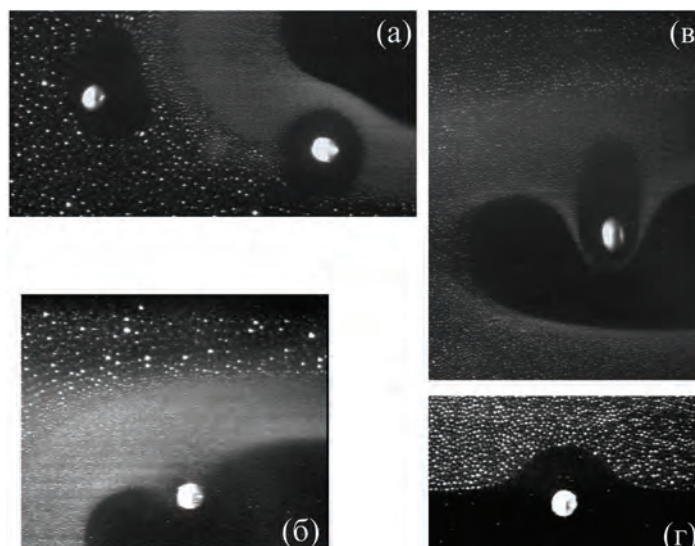


Рис. 14. Видеоизображения, демонстрирующие примеры различного взаимодействия сферической макрочастицы диаметром 1 мм с пылевой плазмой

## Выводы

В настоящее время продолжается анализ и обработка огромного массива данных, полученных в результате выполнения на установке ПК-3 Плюс 21 экспериментальной серии.

В качестве одного из примеров отметим работу [9], в которой результаты экспериментов использованы для изучения флуктуаций положений микрочастиц в узлах плазменного кристалла. Амплитуда флуктуаций возрастает при увеличении диаметра микрочастиц и давления аргона. Обнаружена изотропность этих флуктуаций. Определена кинетическая температура микрочастиц, которая лежит в диапазоне от 1 до 4 эВ, что на два порядка превышает температуру нейтрального газа. Это указывает на аномальный кинетический нагрев, что является, по-видимому, результатом больших флуктуаций заряда в плазменном кристалле.

Выполняется также анализ экспериментов по рекристаллизации плазменно-пылевой системы. Рекристаллизация наблюдалась после разрушения (плавления) плазменного кристалла при наложении дополнительного низкочастотного электрического поля. Обнаружены фронты кристаллизации [10].

Научный интерес представляют результаты экспериментов с бинарной комплексной плазмой, в частности, прохождение пылевой волны через интерфейс между системами, образованными микрочастицами различных диаметров [11].

Отметим, что до настоящего времени опубликовано более 60 статей по результатам экспериментов на ПК-3 Плюс. Статьи опубликованы в ведущих реферируемых российских и иностранных журналах с высоким индексом цитируемости. Среди результатов: исследование нового состояния пылевой плазмы – электрореологической плазмы, когда происходит переход от изотропной плазменно-пылевой жидкости к анизотропному состоянию [12]; исследование взаимопроникновения частиц малого размера в плазменно-пылевую систему, образованную микрочастицами большого диаметра, что представляет собой неравновесный переход и представляет интерес для различных областей физики [13, 14]; детальный анализ низкочастотной плазменно-пылевой неустойчивости, показавший, что условия развития неустойчивости зависят от соотношения локальной скорости ионизации, заряда частиц и концентрации частиц [15]; показано, что наблюдаемое в экспериментах коллективное движение пылевых частиц может быть описано в рамках гидродинамического приближения как невязкое обтекание крупной пылевой частицы «жидкостью» пылевых частиц [16]; выполнено детальное исследование распределения концентрации пылевой компоненты в 3-мерном пространстве, на основе которого определены концентрации ионов и электронов [17].

Успешная работа лаборатории ПК-3 Плюс на российском сегменте МКС стала возможной благодаря совместной работе исследователей ОИВТ РАН и Института внеземной физики Общества М. Планка (Германия), специалистов РКК «Энергия», Центра управления полетами, Центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина, германской промышленной фирмы «Кайзер-Треде», поддержке Роскосмоса и Германского космического агентства (DLR) и безупречной работе космонавтов и астронавтов: В.И. Токарева, П.В. Виноградова (выполнившего 2 серии экспериментов), Т. Райтера (2 серии экспериментов), М.В. Тюрина, Ф.Н. Юрчихина, Ю.И. Маленченко (3 серии экспериментов), С.А. Волкова (3 серии экспериментов), Ю.В. Лончакова, Г.И. Падалки (2 серии экспериментов), О.В. Котова, А.А. Скворцова, А.Ю. Калери, О.Д. Кононенко, Р.Ю. Романенко.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос / под ред. В.Е. Фортова, Г. Морфилла. – М.: Физматлит, 2012. – 443 с.
- [2] Введение в физику пылевой и комплексной плазмы / А.В. Ивлев, С.А. Храпак, В.И. Молотков, А.Г. Храпак. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2017. – 124 с.
- [3] Complex plasma laboratory PK-3 plus on the international space station / H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov et al. // *New Journal of Physics*. – 2008. – Vol. 10, – P. 033036.
- [4] Плазменно-пылевые кристаллы и жидкости в экспериментах на Международной космической станции / В.Е. Фортов, О.Ф. Петров, В.И. Молотков и др. // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2011. – № 1(1). – С. 65–77.

- [5] Freezing and Melting of 3D Complex Plasma Structures under Microgravity Conditions Driven by Neutral Gas Pressure Manipulation / S.A. Khrapak, B.A. Klumov, P. Huber et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2011. – Vol. 106. – № 20. – P. 205001.
- [6] Experiments on phase transitions in three-dimensional dusty plasma under microgravity conditions / V.I. Molotkov, V.N. Naumkin, A.M. Lipaev et al. // *INTERNATIONAL CONFERENCE - THE PHYSICS OF LOW TEMPERATURE PLASMA (PLTP-2017): Journal of Physics Conference Series*. – 2017. – Vol. 927. – P. UNSP 012037.
- [7] Khrapak S.A. Multiple phase transitions associated with charge cannibalism effect in complex (dusty) plasmas / S.A. Khrapak, H.M. Thomas, G.E. Morfill // *EPL*. – 2010. – Vol. 91. – № 2. – P. 25001.
- [8] Observation of metallic sphere-complex plasma interactions in microgravity / M. Schwabe, S. Zhdanov, T. Hagl et al. // *NEW JOURNAL OF PHYSICS*. – 2017. – Vol. 19. – P. 103019.
- [9] Dust coupling parameter of radio-frequency-discharge complex plasma under microgravity conditions / D.I. Zhukhovitskii, V.N. Naumkin, A.I. Khusnulgatin et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2017. – Vol. 96. – № 4. – P. 043204.
- [10] Latest results on complex plasmas with the PK-3 Plus laboratory on board the International Space Station / M. Schwabe, C.R. Du, P. Huber et al. // *Micrograv. Sci. Technol.* – 2018. – published online.
- [11] Density waves at the interface of a binary complex plasma / L. Yang, M. Schwabe, S. Zhdanov et al. // *EPL*. – 2017. – Vol. 117, – P. 25001.
- [12] First observation of electrorheological plasmas / A.V. Ivlev, G.E. Morfill, H.M. Thomas et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2008. – Vol. 100. – № 9. – P. 095003.
- [13] Dynamics of Lane Formation in Driven Binary Complex Plasmas / K.R. Suetterlin, A. Wysocki, A.V. Ivlev et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2009. – Vol. 102. – № 8. – P. 085003.
- [14] Interpenetration of two clouds of microparticles in complex plasma under microgravity conditions / V.I. Molotkov, A.M. Lipaev, V.N. Naumkin et al. // *DUSTY/COMPLEX PLASMAS: BASIC AND INTERDISCIPLINARY RESEARCH: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF DUSTY PLASMAS : AIP Conference Proceedings*. – 2011. – Vol. 1397.
- [15] Comprehensive experimental study of heartbeat oscillations observed under microgravity conditions in the PK-3 Plus laboratory on board the International Space Station / R.J. Heidemann, L. Couedel, S.K. Zhdanov et al. // *PHYSICS OF PLASMAS*. – 2011. – Vol. 18. – № 5. – P. 053701.
- [16] Nonviscous motion of a slow particle in a dust crystal under microgravity conditions / D.I. Zhukhovitskii, V.E. Fortov, V.I. Molotkov et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2012. – Vol. 86. – № 1, 2. – P. 016401.
- [17] Density distribution of a dust cloud in three-dimensional complex plasmas / V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitskii, V.I. Molotkov et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2016. – Vol. 94. – № 3. – P. 033204.

## REFERENCES

- [1] Complex and dusty plasmas. From the library to space / edited by V.E. Fortov, G. Morfill. – Moscow: Fizmatlit, 2012. – 443 p.
- [2] Introduction to the physics of complex/dusty plasmas / A.V. Ivlev, S.A. Khrapak, V.I. Molotkov, A.G. Khrapak. – Dolgoprudny: “Intelekt” Publishing House, 2017. – 124 p.

- [3] Complex plasma laboratory PK-3 plus on the international space station / H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov et al. // *New Journal of Physics*. – 2008. – Vol. 10, – P. 033036.
- [4] Dusty Plasma Crystals And Liquids In Experiments On The International Space Station / V.E. Fortov, O.F. Petrov, V.I. Molotkov and others. // *Manned Space Flights*. – 2011. – № 1(1). – pp. 65–77.
- [5] Freezing and Melting of 3D Complex Plasma Structures under Microgravity Conditions Driven by Neutral Gas Pressure Manipulation / S.A. Khrapak, B.A. Klumov, P. Huber et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2011. – Vol. 106. – № 20. – P. 205001.
- [6] Experiments on phase transitions in three-dimensional dusty plasma under microgravity conditions / V.I. Molotkov, V.N. Naumkin, A.M. Lipaev et al. // *INTERNATIONAL CONFERENCE - THE PHYSICS OF LOW TEMPERATURE PLASMA (PLTP-2017)* : Journal of Physics Conference Series. – 2017. – Vol. 927. – P. UNSP 012037.
- [7] Khrapak S.A. Multiple phase transitions associated with charge cannibalism effect in complex (dusty) plasmas / S.A. Khrapak, H.M. Thomas, G.E. Morfill // *EPL*. – 2010. – Vol. 91. – № 2. – P. 25001.
- [8] Observation of metallic sphere-complex plasma interactions in microgravity / M. Schwabe, S. Zhdanov, T. Hagl et al. // *NEW JOURNAL OF PHYSICS*. – 2017. – Vol. 19. – P. 103019.
- [9] Dust coupling parameter of radio-frequency-discharge complex plasma under microgravity conditions / D.I. Zhukhovitskii, V.N. Naumkin, A.I. Khusnulgatin et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2017. – Vol. 96. – № 4. – P. 043204.
- [10] Latest results on complex plasmas with the PK-3 Plus laboratory on board the International Space Station / M. Schwabe, C.R. Du, P. Huber et al. // *Micrograv. Sci. Technol.* – 2018. – published online.
- [11] Density waves at the interface of a binary complex plasma / L. Yang, M. Schwabe, S. Zhdanov et al. // *EPL*. – 2017. – Vol. 117, – P. 25001.
- [12] First observation of electrorheological plasmas / A.V. Ivlev, G.E. Morfill, H.M. Thomas et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2008. – Vol. 100. – № 9. – P. 095003.
- [13] Dynamics of Lane Formation in Driven Binary Complex Plasmas / K.R. Suetterlin, A. Wysocki, A.V. Ivlev et al. // *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. – 2009. – Vol. 102. – № 8. – P. 085003.
- [14] Interpenetration of two clouds of microparticles in complex plasma under microgravity conditions / V.I. Molotkov, A.M. Lipaev, V.N. Naumkin et al. // *DUSTY/COMPLEX PLASMAS: BASIC AND INTERDISCIPLINARY RESEARCH: SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PHYSICS OF DUSTY PLASMAS* : AIP Conference Proceedings. – 2011. – Vol. 1397.
- [15] Comprehensive experimental study of heartbeat oscillations observed under microgravity conditions in the PK-3 Plus laboratory on board the International Space Station / R.J. Heidemann, L. Couedel, S.K. Zhdanov et al. // *PHYSICS OF PLASMAS*. – 2011. – Vol. 18. – № 5. – P. 053701.
- [16] Nonviscous motion of a slow particle in a dust crystal under microgravity conditions / D.I. Zhukhovitskii, V.E. Fortov, V.I. Molotkov et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2012. – Vol. 86. – № 1, 2. – P. 016401.
- [17] Density distribution of a dust cloud in three-dimensional complex plasmas / V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitskii, V.I. Molotkov et al. // *PHYSICAL REVIEW E*. – 2016. – Vol. 94. – № 3. – P. 033204.



УДК 629.78.072

## **ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ**

**В.Е. Шукшунов, В.В. Янюшкин, М.М. Харламов,  
В.П. Хрипунов, Б.А. Наумов, С.Н. Ковригин**

Докт. техн. наук, профессор В.Е. Шукшунов; канд. техн. наук В.В. Янюшкин (Центр тренажеростроения и подготовки персонала)  
М.М. Харламов; канд. техн. наук, доцент В.П. Хрипунов;  
докт. техн. наук, доцент Б.А. Наумов; канд. техн. наук, доцент С.Н. Ковригин (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются подходы к созданию интегрированного тренажерного комплекса в ЦПК имени Ю.А. Гагарина на базе современных технических и программных средств. Описан подход к созданию единого информационного пространства на основе распределенной среды моделирования. Приводятся основные технические и концептуальные решения, а также предложения для разработки программно-аппаратной инфраструктуры на основе современных технологий, в том числе с применением централизованных расчетов в центре обработки данных. Кратко описаны результаты выполненной работы по тестированию существующей ИТ-инфраструктуры ЦПК имени Ю.А. Гагарина в интересах реализации интегрированного тренажерного комплекса и основные требования к аппаратной части.

**Ключевые слова:** тренажерный комплекс, комплекс тренажеров, технологии виртуализации ресурсов, технические средства подготовки космонавтов, интеграция.

### **Basics of the Analysis and Designing of IT-Infrastructure for the Integrated Simulator Complex of Cosmonaut Training.**

**V.E. Shukshunov, V.V. Yanushkin, M.M. Kharlamov,  
V.P. Khripunov, B.A. Naumov, S.N. Kovrigin**

The paper considers approaches to the creation of an integrated simulator complex at the Gagarin CTC on the basis of modern hardware and software. An approach to the development of a single information space on the basis of the TRIO distributed modeling environment is discussed. Key technical and conceptual solutions as well as proposals on designing the software/hardware infrastructure on the basis of modern technologies including with the use of centralized calculations at the data processing center are given. The results of the performed testing the existing IT-infrastructure at the GCTC in the interests of implementing an integrated simulator complex and main requirements for hardware are briefly described.

**Keywords:** simulator complex, simulator facility, resources virtualization technology, technical facilities for cosmonaut training, integration.

Одной из основных мировых тенденций в тренажеростроении является переход к системам интегрированных тренажерных комплексов и комплексов тренажеров. При этом под тренажерным комплексом понимается набор тренажеров, обладающих набором средств индивидуального (жестко связаны с одним конкретным тренажером) и коллективного пользования (можно унифицировать и использовать в разных тренажерах). Под комплексом тренажеров понимается набор взаимодействующих для решения общей задачи отдельных тренажеров.

Одна из основных технических задач, возникающих в процессе разработки современных интегрированных тренажерных комплексов и комплексов тренажеров [1–3], – это обеспечение взаимодействия программных компонентов составных частей и объединение их в единое информационное пространство.

Основным преимуществом использования интегрированных решений является возможность объединения независимо разработанных автономных тренажеров с использованием системы распределенного моделирования в совокупность интегрированных тренажерных комплексов и комплексов тренажеров с новыми возможностями для повышения качества подготовки специалистов, более эффективного использования имеющихся ресурсов и снижения затрат на создание и эксплуатацию составных частей. Необходимым условием объединения является наличие компьютерной сети между ними, а также наличие согласованных протоколов обмена информацией.

Большое значение в настоящее время при проектировании современных распределенных информационных систем придается центрам обработки данных (ЦОД), решающим широкий круг задач, объединяя разнородные ресурсы, задачи и множество пользователей.

### **Создание единого информационного пространства**

Со стороны аппаратной части создание единого информационного пространства достигается использованием локальной вычислительной сети, объединяющей вычислительные ресурсы комплекса тренажеров и представляющей собой универсальную среду передачи данных. Программно создание единого информационного пространства достигается внедрением и использованием систем распределенного моделирования.

В этой связи большую популярность за рубежом получила специализированная технология распределенного моделирования HLA (High Level Architecture). Однако, несмотря на появление отечественной реализации этого стандарта [11], в космическом тренажеростроении она широкого распространения пока не получила, а организации-разработчики программного обеспечения тренажерных систем пользуются своими разработками, уже ставшими стандартными в той или иной области. К таким разработкам относится тренажерная распределенная исполнительная оболочка (ТРИО) разработки ООО «Центр тренажеростроения и подготовки персонала» [4, 8].

Система распределенного моделирования ТРИО состоит из двух частей: системы моделирования, представляющей собой программную реализацию моделей узлов, и вычислительной системы, на которой осуществляется моделирование. ТРИО разделено на две части: среду разработки и среду исполнения. Среда разработки предназначена для автоматизированной разработки программного обеспечения системы моделирования тренажера. ТРИО объединяет в единую систему программные объекты, которые делятся на модели и форматы. Структура программного обеспечения нескольких узлов вычислительной системы при использовании технологии ТРИО показана на рисунке 1.

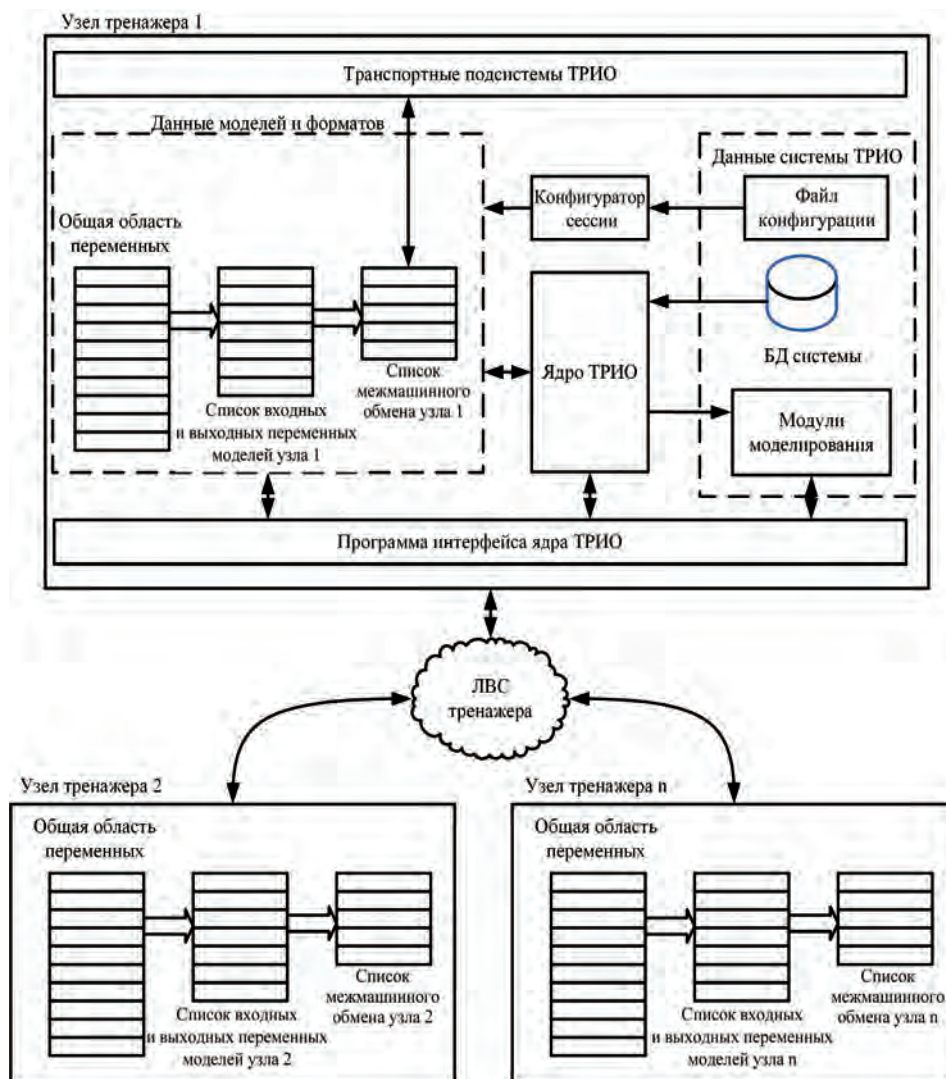


Рис. 1. Структура системы ТРИО

Технические средства подготовки космонавтов (ТСПК) на платформе ТРИО уже более десяти лет успешно функционируют и динамично развиваются на базе ЦПК имени Ю.А. Гагарина. В состав этих ТСПК входят как специализированные, так и комплексные тренажеры, из которых самым большим и сложным по своей структуре является тренажерный комплекс РС МКС. Технологическое программное обеспечение ТРИО позволяет в короткие сроки осуществлять разработку и доработку прикладного программного обеспечения тренажеров при появлении нового оборудования или новых модулей РС МКС. Средства конфигурирования обеспечивают работу тренажеров в различных режимах и составах, определяемых потребностями разных видов тренировок. Ядро ТРИО является универсальным, что дает возможность оперативной реконфигурации узлов вычислительной системы (ВС) тренажера [5] в случае необходимости (например, в случае аппаратного сбоя на узле ВС).

Ядро ТРИО поддерживает взаимодействие с нестандартными абонентами вычислительной системы – сторонним программным обеспечением, реализованным на основе собственных сред исполнения, посредством сетевого обмена с использованием протокола нестандартного абонента. При этом ТРИО не требуется никакой дополнительной информации об архитектуре стороннего специального программного обеспечения (ПО). Возможность взаимодействия со сторонним закрытым ПО способно существенно расширить функциональность и область применения тренажеров на базе ТРИО.

В части анализа системы ТРИО в рамках тренажерного комплекса РС МКС можно сделать следующие выводы:

- тренажеры, построенные на платформе ТРИО, в настоящее время эффективно решают задачи предполетной подготовки космонавтов;
- тренажеры оперативно дорабатываются специалистами, как только возникает такая потребность;
- при получении исходных данных, тренажеры новых модулей МКС разрабатываются в короткие сроки, задолго до вывода модуля на орбиту, обеспечивая предполетную подготовку космонавтов с использованием моделей нового оборудования и систем;
- средствами ТРИО тренажеры и тренажерные комплексы гибко и оперативно конфигурируются под меняющиеся потребности;
- ТРИО предоставляет возможности взаимодействия со сторонним ПО, что позволяет интегрировать в существующий тренажер сторонние разработки при возникновении такой необходимости.

Система ТРИО выполняет все предъявляемые к современным распределенным системам моделирования в интегрированных тренажерных комплексах требования, при этом вполне может применяться для решения задач дальнейшей информационной интеграции ТСПК.

## **Интеграция и комплексирование технических средств подготовки космонавтов**

Интеграция и комплексирование в современной практике идет по пути использования стандартных средств ЛВС, а также нескольких ЛВС, каждая из которых имеет свое назначение по типу передаваемых данных, или набора специализированных ЛВС, которые различаются не только по типу передаваемых данных, но и по своим задачам. Поэтому одной из актуальных задач в настоящее время является анализ существующих ИТ-инфраструктур сетевых каналов обмена данными для оценки их характеристик при использовании в интегрированных комплексах.

В рамках выполнения совместных с ЦПК имени Ю.А. Гагарина работ ООО «Центр тренажеростроения и подготовки персонала» в 2015 году выполнил работы по тестированию существующей в ЦПК ИТ-инфраструктуры. Она, в частности, используется в настоящее время для реализации задач автоматизированной системы информационного обеспечения подготовки космонавтов (АСИОПК). Целью тестирования являлось оценивание возможности использования существующих каналов ЛВС, волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и средств доступа АСИОПК в интересах реализации интегрированных тренажерных комплексов и комплексов тренажеров. Для тестирования использовались две альтернативные и основные в настоящее время платформы виртуализации – Citrix и VMware [9].

Во время работы комплекса виртуальных машин каждого из выбранных элементов ТСПК средствами мониторинга системы виртуализации фиксировалась нагрузка на выделенные для данных виртуальных машин ресурсы. Анализ отдельных графиков производительности виртуальных машин показал, что объем фактически используемой оперативной памяти составил до 4 Гб в среде виртуализации Citrix и VMware. Виртуальным машинам было выделено по 4 виртуальных центральных процессора (ЦП), при этом утилизация ЦП тренажером составила от 30 % до 70 %. Анализ графиков загрузки графических адаптеров показал, что используется до 500 Мб графической памяти. Загрузка графического ядра в среде виртуализации VMware составляет от 30 % до 50 %. В среднем нагрузка составила 33 % в пересчете на одно ядро. В среде виртуализации Citrix потребление видеопамати оказалось на таком же уровне, однако нагрузка на видеопроцессор – ниже, в среднем 27 %. Загрузка графического ядра в среде виртуализации Citrix составляет от 35 % до 40 %.

Используемые в данных системах виртуализации протоколы доступа к рабочим столам существенно различаются. Для VMware различия в зафиксированных значениях в зависимости от помещений составили до 43 % или 17 Мбит/с. Средняя скорость передачи данных – 121 Мбит/с. Результаты измерений для среды VMware отличаются своим значительным разбросом,

утилизация интерфейсов коммутатора составила от 3 % до 80 %. Для Citrix различия в зафиксированных значениях составили до 21 % или 1,8 Мбум/с. Средняя скорость передачи данных – 32 Мбум/с.

При тестировании также оценивался субъективный комфорт при работе с трехмерными приложениями. На рисунке 2 приведена средняя оценка качественных параметров по всем точкам тестирования для двух платформ виртуализации. Виртуализация в среде Citrix продемонстрировала более высокую плавность отображения графики, однако при значительном количестве изменяющихся объектов возникали существенные задержки, рывки изображения. Изображение почти всегда имеет эффект квантования на краях объектов. VMWare обеспечивает более высокое качество изображения, плавность отрисовки не зависит от количества объектов. Однако при работе имеют место сильные рывки изображения первые 1–2 минуты работы, затем отображение становится более плавным, но не настолько, как в системе Citrix.



Рис. 2. Средняя оценка качественных параметров

Проведенная работа по тестированию ИТ-инфраструктуры показала принципиальную возможность ее использования с применением указанных платформ для создания виртуальных машин ТСПК.

По результатам проведенного тестирования основные рассматриваемые параметры, критично отражающиеся на работе ПО тренажеров и функционально-моделирующих стендов (ФМС), разделяются на две группы:

1. Качество и вносимые задержки сетевого обмена (при фиксированном такте моделирования) между отдельными ПЭВМ (виртуальными машинами) из состава ТСПК.

2. Скорость смены и качество отображения картинки (в том числе – генерируемой 3D-графики) на средствах просмотра оператора (мониторах и т.д.).

### Структуры организации сетевого обмена и отображения информации в интегрированном тренажерном комплексе

Рассмотрим структуру организации сетевого обмена при использовании стандартных ПЭВМ и – как альтернативы – сервера с виртуализацией ресурсов. При организации обмена в первом варианте используется набор физических коммутаторов, посредством которых осуществляется обмен между отдельными ПЭВМ (рис. 3).

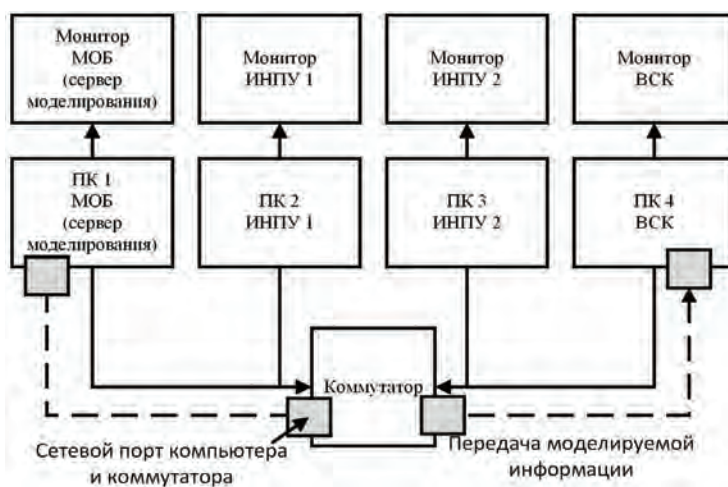


Рис. 3. Структура организации сетевого обмена при использовании стандартных ПЭВМ на обобщенном примере

При использовании сервера с виртуализацией создается набор виртуальных машин, имитирующих реальные ПК с аналогичными характеристиками, которые также обмениваются информацией между собой посредством виртуального коммутатора, созданного средствами системы виртуализации (рис. 4).

В этом случае сетевой обмен между созданными в рамках одного сервера виртуальными машинами не выходит за рамки физического оборудования сервера. Ограничением, вносимым данной архитектурой в работу программного комплекса, могут быть накладные расходы системы виртуализации на поддержку внутренней структуры комплекса в рамках сервера или нескольких серверов.

При этом возникает другая задача – передача данных виртуальных рабочих столов, рассчитанных и сформированных виртуальными машинами на средства отображения через сетевые каналы передачи данных. Это, как правило, коммутационное оборудование и локальные вычислительные сети, обеспечивающие по специальному протоколу доставку информации до потребителей.

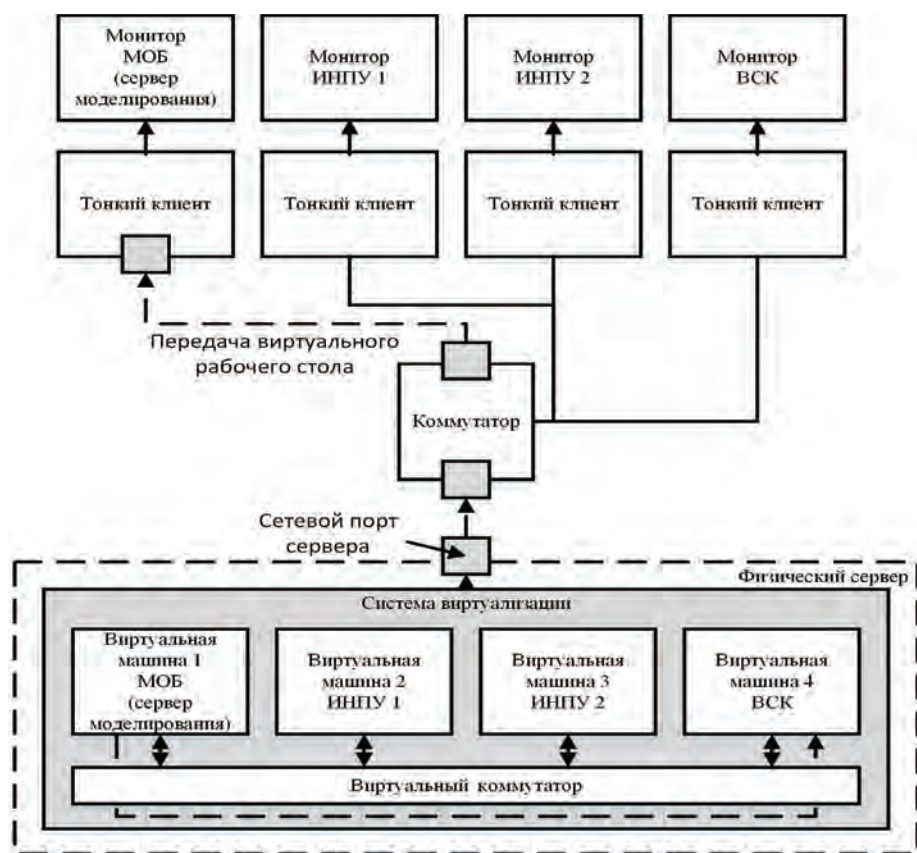


Рис. 4. Структура организации сетевого обмена при использовании сервера с виртуализацией на обобщенном примере

Для большинства потребителей меняется сама структура организации доставки информации на мониторы и другие средства просмотра. При организации отображения информации при использовании стандартных персональных компьютеров в состав системного блока входят видеоадаптер, центральный процессор, оперативная память и т.д., при этом для каждого отдельного ПК, как правило, назначается одна вычислительная или графическая задача по генерации изображения, а средство отображения подключено непосредственно к выходу видеоадаптера (рис. 5).

Исходя из этого, повышенные частоты генерации кадров, передачи данных на средства отображения непосредственно с видеоадаптера не накладывают никаких дополнительных ограничений на качество и скорость изменения 3D-изображения на мониторах пользователя.

В структуре организации отображения информации при использовании сервера с виртуализацией данные операции (вывода изображения на мониторы или другие средства) распадаются на более сложные этапы (рис. 6).





Рис. 5. Структура организации отображения информации при использовании стандартных персональных компьютеров



Рис. 6. Структура организации отображения информации при использовании сервера с виртуализацией

Рассчитанные изображения картинки с использованием выделенных ресурсов центральных процессоров и виртуальных графических процессоров должны быть подвержены кодированию и преобразованию специальными алгоритмами, которые оптимально сжимают поток всей информации для последующей передачи через сетевые устройства и каналы передачи данных. На стороне потребителя происходит декодирование полученной информации и выдача ее на средства отображения. Как минимум эти три этапа могут вносить свои особенности и специфику в корректность работы специального ПО. Это прежде всего связано в ряде случаев с уменьшением количества получаемых потребителем кадров в секунду и общим снижением скорости реакции при работе с 3D-графикой и перемещением.

### **Контуры моделирования в интегрированном тренажерном комплексе**

На рисунке 7 выделены контуры моделирования и фрагмент информационного контура, при этом контур моделирования в данном случае может разделяться на две составляющие части: внутренний контур моделирования в рамках единой вычислительной системы и внешний контур моделирования в рамках множества потребителей информации, средств управления и получения внешних для моделирования воздействий.

Для каждого контура обмена информацией должны быть определены требования по функционированию и ограничения:

1) контур моделирования (внутренний – тренажерный) – распределяются имеющиеся ресурсы для создания набора виртуальных машин со специальным ПО, при этом каждый программный компонент описывается набором требований для своего функционирования. Здесь должна быть решена задача оптимального распределения ресурсов между виртуальными машинами. Для эффективной работы всего множества приложений и пользователей необходимо выделять и перераспределять некоторые имеющиеся ресурсы, чтобы решить все текущие задачи с необходимым уровнем качества, минимизацией задержек моделирования, соблюдением такта моделирования и т.д. Ограничениями данной задачи будут условия функционирования специального ПО в режимах систем псевдореального времени;

2) контур моделирования (внешний – доставки визуальных форматов отображения информации) для отображения информации – обосновывается необходимость создания или выбора каналов передачи информации с учетом их загрузки для множества удаленных потребителей информации. Решается задача объединения единой вычислительной системы и множества каналов связи между удаленными абонентами, в данном случае могут рассматриваться как гарантированные надежные каналы, так и ненадежные каналы. Здесь следует учесть все современные протоколы обмена ведущих систем виртуализации, требования к каналам обмена, которые они предъявляют. Ограничения данной задачи будут определяться степенью реакции пользователя при работе с предоставляемой информацией (от просмотра текстовых документов до интенсивной работы с 3D-графикой);

3) контур моделирования (внешний – обмена с внешними устройствами) для обмена сигналами от оборудования, средств сопряжения, приема команд по управлению – решается задача, аналогичная задаче 1, но с учетом влияния каналов передачи данных для получения необходимого качества моделирования;

4) работа информационного контура представляет собой комбинированную задачу выделения необходимых ресурсов для хранения и обработки различных типов информации, а также доступа к этой информации, при этом не учитываются жесткие ограничения реального времени при моделировании.

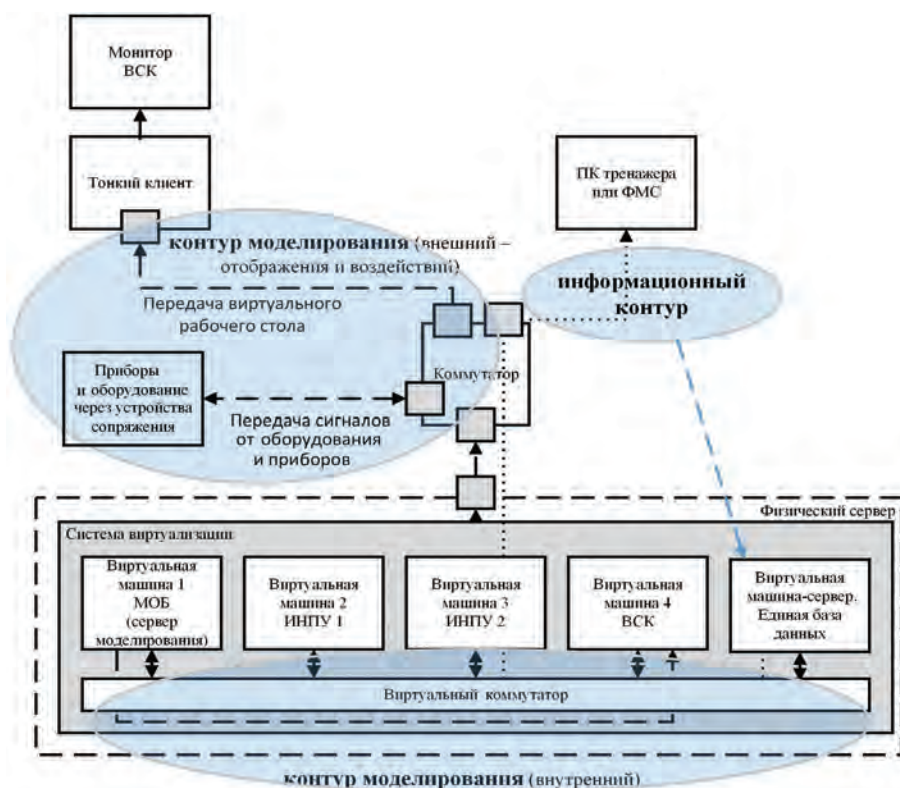


Рис. 7. Контуры обмена информацией на основе обобщенного примера

Для выполнения указанных требований и ограничений необходимо:

- 1) провести формализацию каждой из рассматриваемых проблем, представив описание единой вычислительной системы, удаленных абонентов (потребителей информации), каналов передачи данных, систем моделирования, отображения информации, действующих приборов и устройств;
- 2) выполнить постановку задачи поиска оптимальной конфигурации каждого из рассматриваемых контуров в интегрированном тренажерном комплексе;
- 3) создать описание моделей работы каждого из рассматриваемых контуров в интегрированном тренажерном комплексе с учетом специфики входящих в состав тренажеров и множества ограничений;
- 4) предложить методы и стратегии поиска оптимальной конфигурации каждого из рассматриваемых контуров в интегрированном тренажерном комплексе на основе сформированных моделей;
- 5) провести экспериментальные исследования эффективности полученных алгоритмов, методов и адекватности разработанных моделей.

Таким образом, в основе создания интегрированного тренажерного комплекса лежит понятие консолидации и виртуализации аппаратных ресур-

сов и обеспечение информационного взаимодействия программного обеспечения тренажеров [7, 10]. При создании ИТ-инфраструктуры интегрированного тренажерного комплекса должно быть предусмотрено решение следующих задач:

- создание и выделение виртуальных серверов для решения задач моделирования и обеспечения функционирования вспомогательных систем из общего набора ресурсов с заданными операционными системами, оперативной памятью и процессорным временем для размещения на них систем моделирования, систем управления базами данных, интегрирующего программного обеспечения тренажеров и ФМС;

- создание и выделение виртуальных серверов с поддержкой графического ускорения для решения задач визуализации и работы с трехмерной графикой из общего набора ресурсов с заданными операционными системами, оперативной и графической памятью и процессорным временем для размещения на них систем 3D-моделирования, выполнения сложных графических расчетов в реальном времени;

- обработка взаимодействия наборов виртуальных серверов с удаленными клиентами посредством проводных и беспроводных ЛВС АСИОПК, а также набора персональных компьютеров и мобильных клиентов для получения и отображения форматов управления, данных 3D-моделирования и другой вспомогательной информации;

- отработка систем управления структурой созданных вычислительных и графических сетевых сервисов, в том числе резервирования, обеспечения надежности, антивирусной защиты, оперативного контроля и мониторинга производимых локальными и удаленными клиентами операций.

В соответствии с перечисленными задачами основными требованиями, предъявляемыми к составным частям центра обработки данных (ЦОД) из состава ИТ-инфраструктуры закрытого контура, являются:

- 1) предоставление возможности эффективного взаимодействия проектируемых сетевых сервисов для организации работы специализированного программного обеспечения тренажеров, систем виртуальной реальности и вспомогательных систем;

- 2) предоставление возможности гибкого масштабирования информационной системы при наращивании ресурсов и изменении конфигурации системы;

- 3) обеспечение отказоустойчивости на уровне выхода из строя любого сервера, коммутационного узла, канала связи;

- 4) обеспечение отказоустойчивости на уровне выхода из строя одного накопителя данных в любом узле системы;

- 5) наличие надежной системы резервного копирования информационных баз данных и виртуальных серверов;

- 6) обеспечение оборудования ЦОД электричеством в течение 15–20 минут после отключения общего электроснабжения;

7) для индивидуальных пользователей или групп пользователей должна быть возможность установки различных уровней доступа при работе с приложениями и ресурсами;

8) стенды и развертываемые тренажеры должны быть разбиты на соответствующие сетевые сегменты, возможно, виртуальные частные сети;

9) в серверном сегменте кроме самих серверов допускается нахождение только компьютеров администрирования и контроля, если таковые будут предусмотрены проектом закрытого контура;

10) должна быть обеспечена защита локальной сети (а также виртуальных машин и сетей) от внешних сетевых угроз Internet, а также внутренних угроз открытого контура как организационными, так и программными мерами.

Для реализации требований 1–2 система должна быть оснащена набором высокопроизводительных серверов, поддерживающих технологии виртуализации, а также соответствующим сетевым оборудованием. Для реализации требований 3–5 система должна быть оснащена возможностями построения RAID-массивов для резервного хранения информации, а также общим сетевым хранилищем. Дополнительным решением может являться введение дублирующих элементов сетевого оборудования и соответствующими программными средствами. Для реализации требования 6 система должна быть оснащена источниками бесперебойного питания. Для реализации требований 7–8 система должна поддерживать виртуализацию ресурсов, а также создания виртуальных частных сетей на уровне серверов и активного сетевого оборудования. Для реализации требования 9 система должна быть оснащена рабочим местом администрирования, контроля комплекса, а также необходимым программным обеспечением, управляемым с данного рабочего места. Для реализации требования 10 система должна включать антивирусную защиту, средства ограничения доступа в глобальные сети и внутренние процедуры восстановления работоспособности, а также административные меры контроля доступа в помещения.

### **Предложения по совершенствованию тренажно-стендовой базы ЦПК имени Ю.А. Гагарина**

На первых этапах предлагается концепция включения существующих учебных и тренажерных средств подготовки космонавтов в единое информационное пространство, объединив их посредством использования распределенной сетевой среды в единый информационно-интегрированный комплекс [6, 7].

Разработка подходов к решению проблемы подключения существующих ТСПК к ресурсам вновь создаваемой информационно-моделирующей среды имеет большое практическое значение, поскольку при этом тренировки на них не должны останавливаться, а существующее прикладное и специализированное ПО не должно перерабатываться. Одним из вариантов инте-

грации для уже эксплуатируемых ТСПК является использование «шлюзов» (рис. 8) – программ-адаптеров, которые обеспечивают вхождение ранее созданных тренажеров в единое информационное пространство.



Рис. 8. Использование шлюзов для организации контура моделирования

Шлюзы объединяют информационные каналы каждого из ТСПК: один канал связи обеспечивает информационный интерфейс с тренажером (стендом), а второй – с ресурсами распределенной информационно-моделирующей среды [10].

Для комплексного решения задач развития учебно-тренажерной базы ЦПК имени Ю.А. Гагарина необходимо использование современных технологий, охватывающих области от подходов к организации серверных систем и центров обработки данных до обеспечения мобильного и защищенного сетевого доступа:

- создание современного центра обработки данных, который сможет обеспечить работу как с корпоративными ресурсами, так и с интегрированным комплексом учебных и тренажерных средств, обеспечивая их непрерывное и эффективное использование;
- применение технологий виртуализации, которые позволят распределять консолидированные в ЦОД аппаратные ресурсы для обеспечения функционирования компонент тренажерной и учебной баз;
- переход с клиент-серверной на сервис-ориентированную архитектуру в разработке и развитии программного обеспечения тренажеров и систем обучения с применением облачных технологий в рамках организации, что позволит обеспечить всех пользователей набором универсальных интерфейсов с необходимой функциональностью;
- обеспечение мобильного доступа и возможности запуска сервисов и корпоративных приложений на персональных планшетах и мобильных компьютерах.

Используя уже имеющиеся подсистемы и возможности существующей в ЦПК имени Ю.А. Гагарина ИТ-инфраструктуры, можно уже сейчас начинать создавать отдельные элементы интегрированного тренажерного комплекса. Уже готовым для включения в него элементом может стать, например, созданный в 2017 году комплекс автоматизированных средств управления процессом подготовки спецконтингента (КАСУППС). Одной из задач, решаемых при использовании КАСУППС, является информационное обеспечение работы экзаменационной комиссии на тренажерах РС МКС, что подразумевает создание программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего получение, хранение, систематизацию, доступ и трансляцию информационных потоков данных во время проведения всех видов зачетных и экзаменационных тренировок (рис. 9).

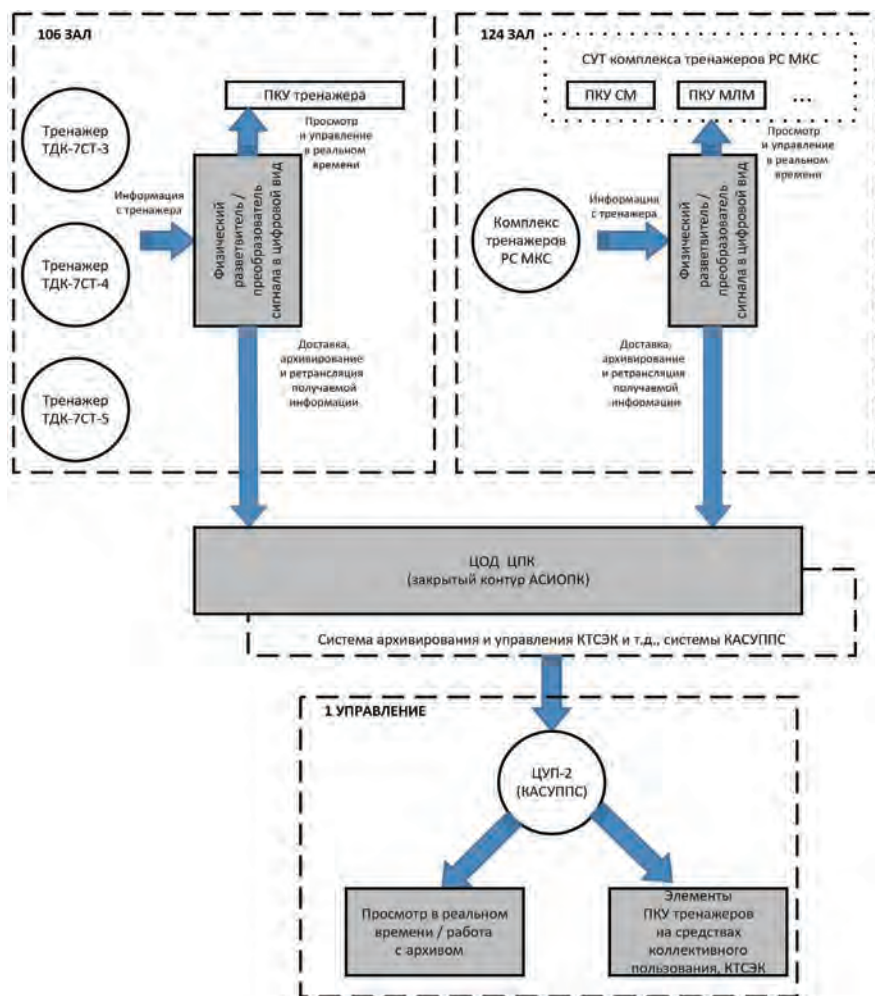


Рис. 9. Схема предлагаемого решения по созданию комплекса технических средств экзаменационной комиссии (КТСЭЖ)

Поэтапное создание интегрированного тренажерного комплекса может проводиться без остановки процессов подготовки космонавтов и другой деятельности в ЦПК имени Ю.А. Гагарина.

Для расширения возможностей эксплуатируемых ТСПК, унификации их составных частей, а также с учетом перспективы создания тренажерной базы на космодроме «Восточный», тренажерного комплекса для пилотируемого транспортного корабля нового поколения «Федерация» и лунной программы ставится вопрос о формировании распределенной информационно-моделирующей среды, обеспечивающей эффективное и комплексное решение задач подготовки на ТСПК. Такой подход позволит создать в ЦПК имени Ю.А. Гагарина интегрированный тренажерный комплекс на основе современных технических и программных решений для обеспечения нового уровня качества подготовки космонавтов, повышения эффективности использования и эксплуатации ТСПК, в том числе снижения стоимости их создания, модернизации и эксплуатации.

## **Выводы**

1. В концепции разработки единого интегрированного тренажерного комплекса заложена возможность его развития без изменения принципиальных основ, без радикального перепроектирования при включении в его состав новых тренажеров, ФМС, учебно-методических средств с минимальными затратами ресурсов. Концепция создания такого комплекса пригодна к реализации, что подтверждено проведенным в ЦПК имени Ю.А. Гагарина тестированием ее основных принципиальных технических решений.

2. Принципы создания, применяемые программные и технические средства обеспечивают переход в создании тренажеров, ФМС и других технических средств подготовки и обучения космонавтов к унификации элементов построения программно-технических средств, что гарантирует сокращение времени на разработку, проектирование, создание и модернизацию новых тренажеров, тренажерных комплексов и технических средств обучения.

3. Использование ЦОД с применением технологий виртуализации в качестве аппаратной основы в интегрированном тренажерном комплексе повышает эффективность использования аппаратных, в том числе графических ресурсов, надежность функционирования комплекса в целом и входящих в него специализированных и комплексных тренажеров, а также других ТСПК.

4. Система распределенного моделирования ТРИО широко используется в космическом тренажеростроении и удовлетворяет всем предъявляемым к подобным системам требованиям. Система является актуальной в настоящее время, а также может успешно применяться для перспективных ТСПК, в том числе при создании интегрированных комплексов ТСПК, обеспечивая сопряжение существующих ТСПК с помощью собственного интерфейса и набора шлюзов.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Наумов Б.А. Космические тренажеры. – ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок Московской области, 2013. – 214 с.
- [2] Наумов Б.А., Хрипунов В.П. Основные подходы к созданию и эксплуатации комплекса технических средств подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. – 2014. – № 2 (11) – С. 30–34.
- [3] Наумов Б.А., Хрипунов В.П., Путилин Д.В. Тренажерные комплексы. Достоинства и недостатки создания и эксплуатации // Пилотируемые полеты в космос. – № 2(23). – 2017. – С. 29–36.
- [4] Безруков Г.В., Фоменко В.В. Программная оболочка ТРИО в тренажерах МКС // Материалы научно-технического семинара «Технические средства и технологии для построения тренажеров». – Звездный городок, 1998. – Вып. 3. – С. 73–77.
- [5] Лункин К.С., Виноградов Ю.А., Саев В.Н. Опыт создания и эксплуатации вычислительных систем космических тренажеров // Пилотируемые полеты в космос. – № 2(15). – 2015. – С. 102–111.
- [6] Лончаков Ю.В., Наумов Б.А., Хрипунов В.П. Основные положения по созданию в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина интегрированного комплекса технических средств подготовки космонавтов // Пилотируемые полеты в космос. – № 4(13). – 2014. – С. 25–39.
- [7] Шукшунов В.Е., Янюшкин В.В. Учебно-тренажерно-моделирующие комплексы нового поколения для подготовки космонавтов. – М.: Машиностроение, 2015. – 112 с.
- [8] Шукшунов В.Е., Циблиев В.В., Потоцкий С.И. Тренажерные комплексы и тренажеры. Технологии разработки и опыт эксплуатации. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
- [9] Ковригин С.Н., Янюшкин В.В. Основы анализа IT-инфраструктуры открытого контура автоматизированной системы информационного обеспечения подготовки космонавтов для создания интегрированного тренажерного комплекса // Программные продукты и системы. – № 4. – 2015. – С. 16–21.
- [10] Шукшунов В.Е., Янюшкин В.В. Концептуальные основы разработки и создания учебно-тренажерно-моделирующего комплекса нового поколения // Программные продукты и системы. – № 4. – 2015. – С. 5–15.
- [11] High-Level Architecture, официальный сайт АО «НПО РусБИТех»: <http://rusbitech.ru/press/news/news-company/high-level-architecture>.

## REFERENCES

- [1] Naumov B.A. Space Simulators. – FSBO Gagarin Research&Test CTC, Star City, Moscow region, 2013. – 214 p.
- [2] Naumov B.A., Khripunov V.P. Basic Approaches to the Creation and Operation of the Technical Facilities for Cosmonaut Training // Manned Space Flights. – 2014. – № 2 (11) – pp. 30–34.
- [3] Naumov B.A., Khripunov V.P. Putilin D.V. Simulator Complexes. Virtues and Shortcomings of the Development and Operation // Manned Space Flights. – № 2(23). – 2017. – pp. 29–36.
- [4] Bezrukov G.V., Fomenko V.V. TRIO Software in ISS Simulators // Proceedings of the Scientific and Technical Seminar “Technical Facilities and Technologies for Construction of Simulators”. – Star City, 1998. – Issue. 3. – pp. 73–77.

- [5] Lunkin K.S., Vinogradov Yu.A., Saev V.N. Experience in Designing and Operating the Computer Systems of Space Simulators // Manned Space Flights. – № 2(15). – 2015. – pp. 102–111.
- [6] Lonchakov Yu.V., Naumov B.A., Khripunov V.P. General Provisions for the Creation of an Integrated Technical Facilities Complex for Cosmonaut Training at Gagarin CTC // Manned Space Flights. – № 4(13). – 2014. – pp. 25–39.
- [7] Shukshunov V.E., Yanyushkin V.V. Advanced Simulator Complexes for Cosmonaut Training. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2015. – 112 p.
- [8] Shukshunov V.E., Tsibliev V.V., Pototskiy S.I. Simulators and Simulator Complexes. Technology Development and Operational Experience. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. – 384 p.
- [9] Kovrigin S.N., Yanyushkin V.V. The analysis of an IT infrastructure of the Astronaut Training Open Automation System to Create an Integrated Simulation Complex // Programmnye Produkty I Sistemy (Software&Systems). – № 4. – 2015. – pp. 16–21.
- [10] Shukshunov V.E., Yanyushkin V.V. Conceptual Framework for Development of the Next-generation Educational Training and Simulation complex (etsc) // Programmnye Produkty I Sistemy (Software&Systems). – № 4. – 2015. – pp. 5–15.
- [11] High-Level Architecture, The official website of JSC “Rusbitech”:  
<http://rusbitech.ru/press/news/news-company/high-level-architecture>.

УДК 621.865.8

## **РОБОТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ**

А.А. Богданов, И.М. Кутлубаев, А.Ф. Пермяков

А.А. Богданов; докт. техн. наук И.М. Кутлубаев; А.Ф. Пермяков  
(АО «НПО «Андроидная техника»)

Обоснована целесообразность использования антропоморфной структуры при создании робота космического исполнения. Предложена классификация роботов космического назначения в зависимости от внешних условий функционирования. Отражены основные особенности построения каждого типа робота. Представлены цели и задачи выполняемого проекта «Испытатель», в ходе которого будет осуществлен орбитальный полет с антропоморфным роботом «FEDOR». Специальная подготовка действующего робота «FEDOR» позволит провести исследования его функционирования в условиях воздействия факторов орбитального полета: вибрации, ударных нагрузок, невесомости.

**Ключевые слова:** антропоморфный робот, «FEDOR», «Испытатель», типы роботов космического назначения, захват, базовые составляющие, космическая станция, космический эксперимент, орбитальный полет, летные испытания.

### **Robot of Space Application as a Component of Scientific Hardware. A.A. Bogdanov, I.M. Kutlubaev, A.F. Permyakov**

The reasonability of usage of anthropomorphic structure in designing of a robot of space application is proved. The classification of robots of space application depending on external conditions of functioning is proposed. The main features of construction of each type of a robot are indicated. The purposes and tasks of “Isпытatel” manageable project within the framework of which an orbital flight with “FEDOR” anthropomorphic robot will be accomplished are presented. Special preparation of “FEDOR” robot will make it possible to perform research of its functioning under the impact of orbital flight factors, such as vibration, suddenly-applied load, zero-gravity.

**Keywords:** anthropomorphic robot, “FEDOR”, “Isпытatel”, types of robots of space application, robot hand, basic components, space station, space experiment, orbital flight, flight tests.

Необходимость и возможность создания роботов, способных осуществлять совместные с космонавтами действия на борту пилотируемых космических аппаратов (КА), приобретают особую актуальность. Загруженность космонавтов неуклонно растет, увеличиваются физическая и психологическая нагрузки [1]. При этом часть полетных операций может выполняться без их непосредственного участия – антропоморфной робототехнической системой

космического назначения (АРТС). Ее применение позволит повысить эффективность решения задач в экстремальных условиях космоса, снизить затраты на выполнение исследовательских программ и эксплуатацию оборудования. Без применения АРТС невозможно решить задачи исследования и использования космических тел: планет, их спутников, астероидов и комет. Длительность космических экспедиций, экстремальные условия исключают возможность выполнения их космонавтами, но реализуемы АРТС.

Вместе с тем решение вопроса создания по сути нового типа научной аппаратуры не имеет в нашей стране четкой программы реализации и носит, в основном, концептуальный характер [2].

В США активно выполняются работы, направленные на создание антропоморфных роботов космического назначения. В сентябре 2010 года на американский сегмент МКС доставлен антропоморфный робот «Robonaut», предназначенный для отработки технологических операций. В настоящее время нет подробной информации о выполнении им сложных действий [3]. Однако ведутся постоянные исследования функционирования его составляющих в условиях орбитального полета. На их основе созданы последующие модели: R2, R5. В рамках проекта Haptics-2 осуществлен эксперимент по управлению оператором, находящимся на борту МКС, роботизированными компонентами на Земле с силовой обратной связью [4]. Признано, что антропоморфный робот отвечает требованиям перспективности систем космического назначения. Созданная серия антропоморфных роботов «Robonaut» является инструментом для отработки новых технических решений на основе проводимых экспериментальных исследований.

Необходимость использования антропоморфных роботов на космических станциях и напланетных комплексах признается многими исследователями [5, 6]. Непосредственно разработкой технических решений заняты специалисты European Space Agency (ESA), National Aeronautics and Space Admini (NASA), German Aerospace Center (DLR). ESA совместно с NASA, в рамках проектов «Multi-Purpose End-To-End Robotic Operation Network» (METERON) и «Human Exploration Telerobotics» (HET), разрабатывают антропоморфный робот с прямым управлением оператором [7]. Аналогичный проект выполняется DLR. Антропоморфный робот Rollin' Justin имитирует действия, необходимые для выполнения работ в условиях Марса [8].

АРТС представляет собой технический объект, предназначенный для работы на всех этапах полета. Это определяет необходимость проведения масштабных исследований, направленных на получение знаний о его свойствах и возможностях в различных условиях. Аппаратура АРТС обеспечивает регистрацию базовых параметров: скорости, точности позиционирования, развиваемых и воспринимаемых усилий. В сочетании с активными действиями исполнительной системы она позволяет получать новые знания о функциональных возможностях отдельных систем и робота в целом.

АРТС, на данном этапе, является научной аппаратурой, обеспечивающей формирование условий проведения экспериментов и регистрацию их результатов.

Принятые на долгосрочную перспективу государственные нормативные акты в области космической деятельности определяют создание отечественного варианта АРТС. Настоящий этап предполагает выполнение работ исследовательского характера. В связи с этим следует определить первоочередные задачи и подходы к их решению, обеспечивающие ускорение темпов создания АРТС. При этом следует учитывать, что дальнейшее развитие космонавтики предполагает создание и эксплуатацию напланетных баз и межпланетных комплексов. Структура и состав таких комплексов, в первую очередь комплексов по добыче и переработке редких полезных ископаемых, будут определяться на основе принципиально новых подходов и технологий. Вместе с тем в любом варианте сохранится необходимость выполнения монтажных и ремонтных работ, внешнего инспектирования. Для их выполнения будут привлекаться как человеческие ресурсы, так и интеллектуальные роботы. В связи с этим следует рассматривать вопросы создания АРТС в более широком аспекте, как системы, способной функционировать в открытом космосе.

Варианты исполнения АРТС определяются внешними условиями, в которых выполняются работы, и их характером. При этом первый фактор имеет преобладающее значение. Можно выделить три группы внешних условий и соответственно следует создавать роботы трех типов для функционирования: внутри космической станции, вне станции, на напланетном комплексе.

### **Перспективы использования АРТС**

Изначально вся инфраструктура пилотируемых космических и напланетных станций ориентирована на ее использование человеком. Данное обстоятельство определяет требования к построению исполнительного комплекса АРТС – возможность выполнения действий, совпадающих по маневренности и моторике с аналогичными показателями человека. Данным требованиям в полной мере удовлетворяет антропоморфная схема построения исполнительного комплекса [9]. При этом условия выполняемых работ и возможные объекты взаимодействия определяют особенности в построении каждого из трех типов АРТС.

Робот первого типа (АРТС-I) предназначен для работы внутри орбитальной станции: при отсутствии экипажа, разгерметизации отсека, в качестве помощника (ассистента) космонавта. К числу основных задач, выполняемых АРТС-I, следует отнести осуществление контрольно-инспекционных действий и работ, не требующих значительных усилий: переключение тумблеров, соединение штекерных разъемов, открытие/закрытие замков и т.п. Для обеспечения таких действий робот должен иметь захваты, реализующие

мелкую моторику, быть оснащен модулем, обеспечивающим его фиксацию на конструктивных элементах космической станции (КС).

Действия в качестве помощника предполагает также создание роботом благоприятной психоэмоциональной атмосферы. При разработке АРТС-I следует сделать акцент на внешнем облике и реализации функций партнера космонавта. Целесообразно иметь систему, позволяющую оценивать настроение космонавта, и выбор действий, способствующих его изменению.

Второй тип роботов (АРТС-II) предназначен для выполнения работ, осуществляемых космонавтами вне КС: перемещение объектов массой до 40 кг на расстояние до 9 м [1], использование ручного инструмента, взаимодействие с внешней инфраструктурой КС. Аналогично АРТС-I робот должен выполнять функции помощника космонавта при его внекорабельной деятельности.

АРТС-II оснащается модулем фиксации на поручнях КС и дополнительно модулем стационарной фиксации на пунктах постоянного базирования. В частности, такими пунктами должны быть оснащены космические манипуляторы. В этом случае функциональные возможности АРТС-II существенно расширяются за счет выполнения действий по сборке и стыковке группировок космических модулей, установке и обслуживанию внешнего оборудования станции. Особо следует обратить внимание на реализацию возможности захватывать и перемещать объекты, находящиеся в неуправляемом полете, – «космический мусор».

АРТС-II должен иметь захваты, обладающие преимущественно силовыми возможностями. Целесообразно оснащение манипуляторов специализированными инструментальными составляющими, устанавливаемыми параллельно захвату. Наличие магазина из нескольких таких составляющих позволит более эффективно выполнять работы по ремонту и обслуживанию. При совпадении кинематических схем роботов первого и второго типа, АРТС-II отличает установка более мощных приводов по всем степеням подвижности. При этом можно использовать захваты с меньшим числом степеней подвижности и углами относительного поворота, что позволит, при тех же габаритах манипулятора, использовать приводы большей мощности.

АРТС типа I и II взаимодействуют с фиксированным составом инфраструктуры КС. Отсутствие самостоятельных глобальных перемещений исключает необходимость в модулях, реализующих опорное движение.

Робот третьего типа (АРТС-III) по структуре и функциональным возможностям близок к АРТС-II. Принципиальным отличием является замена модуля фиксации на модуль, обеспечивающий движение по неорганизованной поверхности. В первом приближении это предполагает оснащение АРТС-III традиционными педипуляторами. Особый интерес представляет вариант, сочетающий опорное шаговое движение и движение на колесных компонентах. Прототипом может служить решение, использованное в работе DRC-Hubo (Team KAIST, Корея), победителе DARPA Robotics Challenge 2015 [10].

Во всех типах АРТС должна применяться единая структурная схема исполнительного комплекса, схема построения систем передачи движения и номенклатурная база комплектующих. Это позволяет вести исследования на одном типе АРТС с последующим использованием результатов при создании остальных типов.

Создание нового технического объекта предполагает выполнение экспериментальных исследований. Системы, реализуемые в АРТС, являются одновременно функциональной составляющей и аппаратурой, позволяющей получать новые знания. В отличие от рядовой аппаратуры, основные системы обеспечивают активное изменение факторов проведения экспериментов. В сочетании с возможностями регистрации базовых параметров это позволяет получить уникальную информацию, необходимую для создания и совершенствования как отдельных систем робота, так и всего комплекса.

### **Общие положения по организации работ по созданию АРТС**

АРТС во многих аспектах близок по структуре и технической реализации к уже эксплуатируемым роботам. Имеющийся опыт их построения является фундаментальной основой для построения АРТС. Вместе с тем значительная часть его составляющих не имеет прямых аналогов, в связи с чем следует определиться со стратегий и основными этапами их создания.

На сегодняшний день в РФ реальная оценка возможностей АРТС основывается на анализе работы SAR 401. Следует отметить, что этот робот создавался в рамках инициативного проекта АО «НПО «Андроидная техника» при взаимодействии с профильными специалистами космической отрасли. Его разработка была первым шагом, продемонстрировавшим реализуемость базовых подходов к построению антропоморфного робота и наличие коллектива, способного развивать данное направление. Назрела необходимость подойти к проблеме создания АРТС на более фундаментальной основе.

В качестве успешной организации решения схожего по сложности круга задач следует использовать опыт Фонда перспективных исследований (ФПИ) при создании антропоморфного робота (АР) «FEDOR». Разработка и реализация новых базовых технологий позволила получить АР, вошедшего в десятку лучших мировых образцов в своем классе.

В основе организации работ над проектом была использована структурная схема, представленная на рисунке 1.

В части использования результатов проекта следует отметить послепроектное сопровождение со стороны ФПИ и АО «НПО «Андроидная техника» работ, развивающих результаты по перспективным направлениям. Интеллектуальные результаты проекта были переданы образовательным учреждениям для совершенствования и разработки новых программных продуктов. Последующая оценка полученных результатов, в рамках олимпиадной системы, обеспечит разработку новых программных средств.



Рис.1. Структурная схема взаимодействия организаций при выполнении проекта «Спасатель»

Аналогичный подход к общей организации работ целесообразно использовать и при создании АРТС. Следует определить головного исполнителя, отвечающего за весь комплекс работ. При этом сложность и многогранность вопросов, сопряженных с разработкой АРТС, предполагают создание научного консорциума, включающего ряд соисполнителей. В качестве основы определения границ ответственности между соисполнителями следует использовать функциональное разделение выполняемых АРТС действий.

Функционирование АРТС основывается на реализации трех базовых составляющих: восприятие, анализ, действия (рис. 2). Каждая из составляющих является вершиной иерархической системы, формируемой из блоков нижних уровней. В отдельную составляющую следует вынести работы по интеграции АРТС в системы КС.

Соисполнитель должен обеспечить выполнение работ в пределах базовой составляющей. При этом в его компетенцию могут входить несколько самостоятельных блоков, относящихся к разным составляющим АРТС. При таком разделении соисполнитель отвечает за всю совокупность работ верхнего уровня. Выбор соисполнителей должен осуществляться головным исполнителем. Основными критериями выбора следует принять: реализованные проекты, относящиеся к планируемой части базовых составляющих, наличие интеллектуального задела, концепцию достижения положений технического задания. Назначение одного базового исполнителя при создании АРТС не отменяет конкурентного начала, но позволяет иметь одну организацию, в полной мере отвечающую за конечный результат.



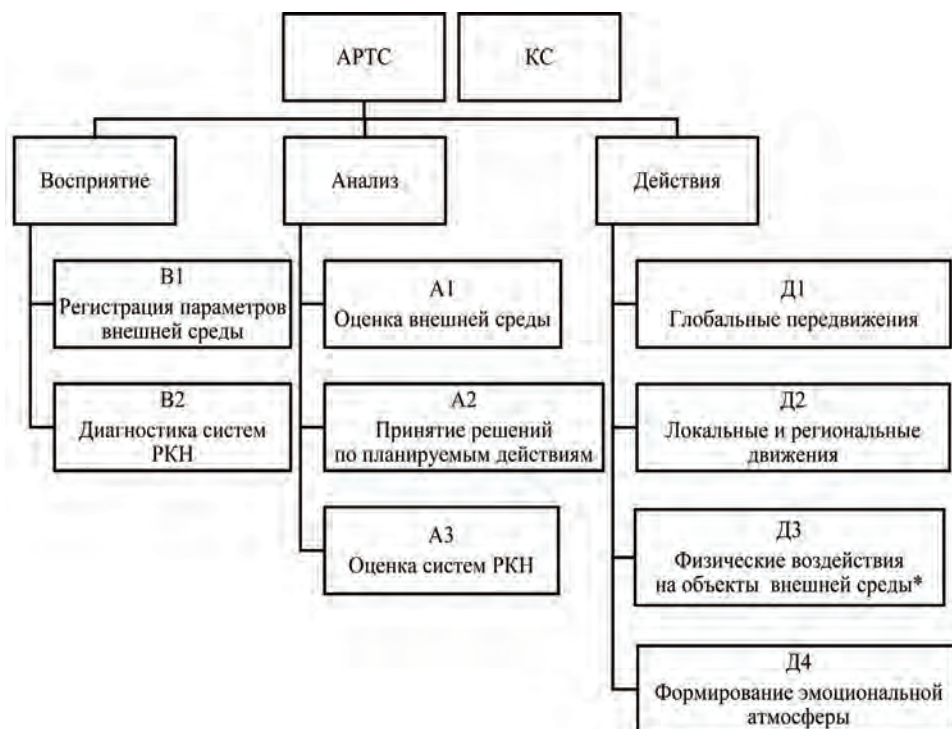


Рис. 2. Иерархическая структура базовых составляющих АРТС

В настоящее время АО «НПО «Андроида техника» выполняет самостоятельную часть опытно-конструкторской работы (СЧ ОКР) «Испытатель». Выполнение космического эксперимента (КЭ) в рамках этой работы является фундаментальной основой для разработки АРТС-I.

### Цели и задачи проекта «Испытатель»

Целью выполнения СЧ ОКР «Испытатель» является разработка технологии создания и экспериментальные исследования АРТС при его интеграции в пилотируемые космические аппараты.

В ходе КЭ будут решены задачи:

- проверка адекватности, уточнения и верификация аналитической модели АРТС как единого комплекса, действующей в условиях невесомости и ограниченном пространстве;
- моделирования и отработки операций с пульта космонавтов и пульта ОВК (особо важные команды) без выдачи реальных управляющих воздействий;
- регистрации нагрузок действующих на пилота на активном участке полета (получение информации о нагрузках на экипаж);

- моделирования типовых действий членов экипажа на всех этапах полета: прием и передача голосовых сообщений, работа со средствами ручного управления;
- сбора и передачи в ЦУП телеметрической информации о работоспособности АРТС и действующих на нее нагрузках;
- обработки голосового канала связи через аппаратуру бортовой радиотехнической системы и системы пеленга;
- обработки средств обеспечения теплового режима пилотируемого транспортного корабля (имитация тепловыделения экипажа);
- дополнительного видеоконтроля объема командного отсека с помощью видеоаппаратуры.

Проведение космического эксперимента обеспечит получение новых знаний о комплексном влиянии факторов космического полета на функционирование систем АРТС:

- стойкости и надежности датчиков и аппаратуры систем технического зрения, силомоментной обратной связи, копирующего управления;
- реализуемости движений звеньев манипуляторов и захватов, необходимых для выполнения полетных операций;
- регистрации тепловыделения АРТС в зависимости от выполняемых операций на различных стадиях полета.

Кроме того, кинематическое подобие АРТС и человека позволит выполнить точную оценку нагрузок, действующих на космонавта на активном участке полета в штатном положении и при движении частей тела.

Выполнение КЭ основывается на разработке и апробации новых методик:

- планирования функциональных действий АРТС, связанных с внутрикорабельной деятельностью;
- супервизорного дистанционного управления АРТС с Земли.

Разработку и исследование возможностей АРТС-I планируется выполнить в два этапа. В соответствии с первым из них выполняется оценка функционирования АРТС-I в условиях орбитального полета. Наиболее сложным этапом является его доставка на борт КС. АРТС-I имеет модульную конструкцию, однако сложность работ по сборке и наладке предполагает, по крайней мере, на данном этапе, доставку его на КС в виде единого комплекса. Приоритетной задачей СЧ ОКР «Испытатель» является оценка сохраняемости функциональных возможностей АР при воздействии факторов космического полета: перегрузки, вибрации, невесомость.

В настоящее время не принята базовая концепция построения АРТС- I. В частности, не определена структурная схема исполнительного комплекса. Вместе с тем все функционирующие и разрабатываемые космические роботы имеют схожую схему построения, включающую: базовый блок, два манипулятора с семью степенями подвижности, блок контроля и управления, блок стыковки с внешними объектами, держатели для инструмента. Различия проявляются в выборе структурной схемы каждой из составляющих.

АР «FEDOR» в максимальной степени способен выполнять присущие человеку действия с объектами внешней среды. Техническая готовность АР «FEDOR» позволяет с минимальными затратами приступить к научным исследованиям в рамках СЧ ОКР «Испытатель». Вместе с тем, необходимо осуществить его адаптацию к условиям функционирования на борту КС. Следует уточнить требования к значениям кинематических и силовых характеристик исполнительской системы, обеспечивающих безусловное выполнение полетных операций. Специфика удаленного управления роботом, наличие задержек времени и возможного искажения управляющих сигналов определяет необходимость усовершенствования технологии комбинированной системы управления.

Аппаратное оснащение АР «FEDOR» обеспечивает регистрацию собственных и внешних параметров при выполнении активных действий исполнительской системы. Это позволяет определять влияние совокупности факторов на его функционирование.

АР «FEDOR» создавался для работы в условиях Земли, поэтому следует выполнить специальную подготовку, позволяющую функционировать в условиях орбитального полета: обеспечить усиленное крепление в сборочных единицах, использовать космические смазки, оснастить системой регистрации собственного тепловыделения.

Геометрические (рис. 3) и массовые параметры (табл. 1) АР «FEDOR» близки к аналогичным характеристикам космонавта в скафандре, что обеспечивают его размещение в штатном кресле «Чегет» (рис. 4).

*Таблица 1*

Массы модулей АР «FEDOR»

№ п/п	Наименование	Масса, кг
1	Головной модуль	8,7
2	Манипулятор	18,7
3	Корпусный модуль	49,0
4	Опорный модуль	15,2
5	Общая масса	125,5

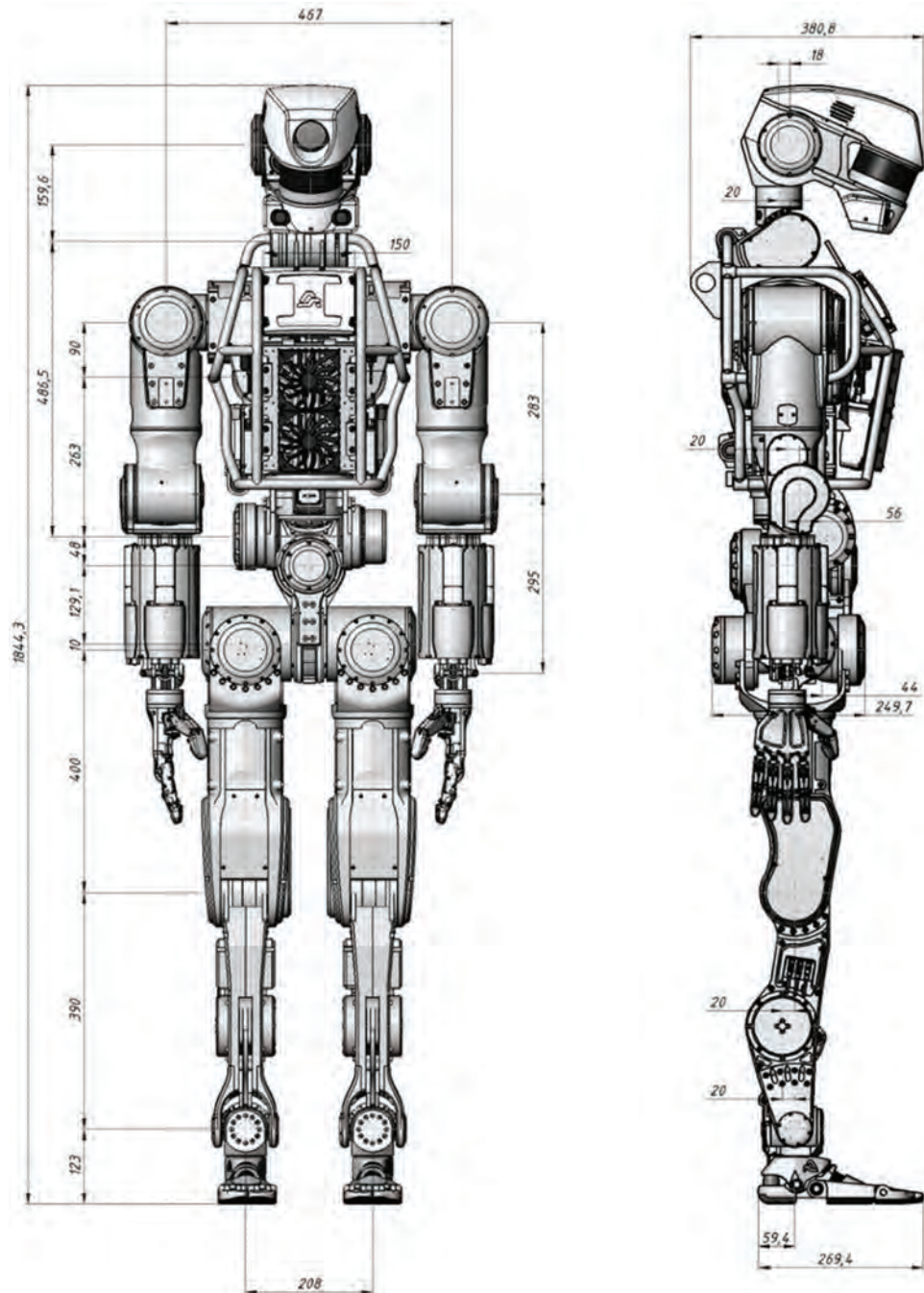


Рис. 3. Общий вид АР «FEDOR» в положении стоя

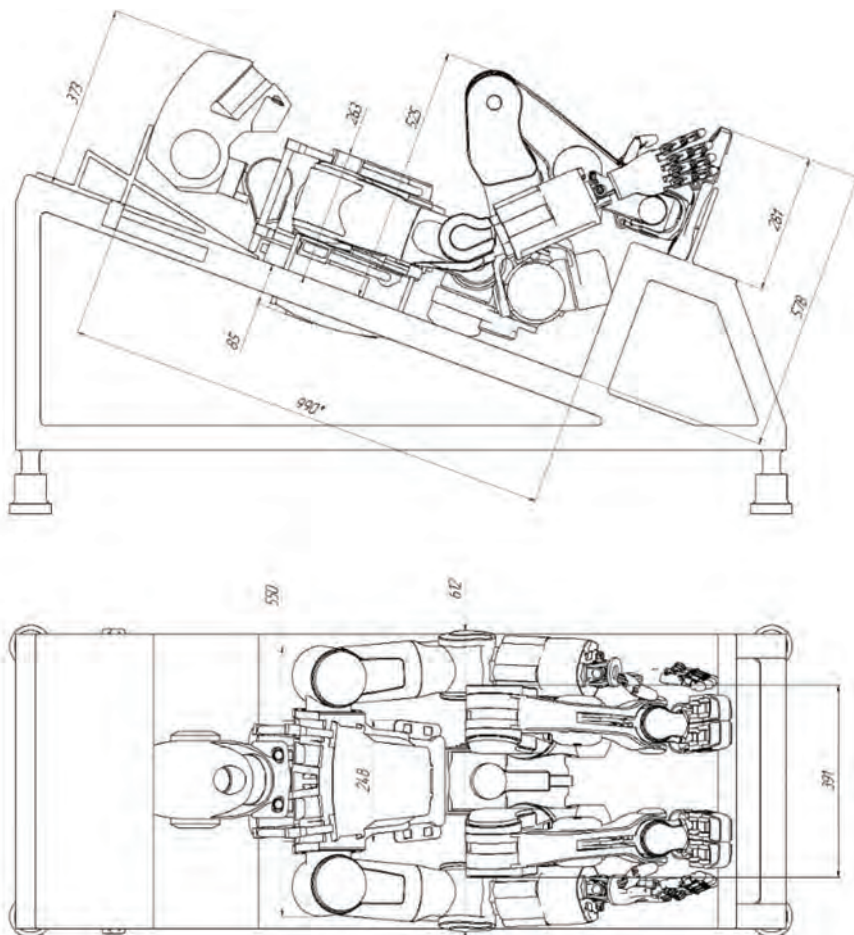


Рис. 4. Размещение АР «FEDOR» в штатном кресле «Чегет»

### Ожидаемые результаты КЭ

В ходе выполнения КЭ будут уточнены требования к оборудованию и системам:

- управления манипуляторами и захватами;
- к конструктивным элементам робота, обеспечивающих использование штатного кресла экипажа типа «Чегет»;
- исследованы режимы собственного тепловыделения АРТС на различных стадиях полета с учетом решаемых функциональных задач;
- оценена стойкость систем АРТС к внешним воздействующим факторам при нахождении в кресле члена экипажа.

Результаты КЭ будут использованы на предприятиях космической отрасли при создании робототехнических систем космического назначения, роботов специального назначения.

Усовершенствованный на основе КЭ вариант АР «FEDOR» предполагается использовать и на втором этапе исследований АРТС-I, включающем доставку и размещение его торсового варианта внутри герметичного отсека российского сегмента МКС. По мнению ведущих специалистов, при интеграции новых модулей в состав РС МКС будут выполняться в значительном объеме работы по монтажу поручней, прокладке силовых кабелей, подключению аппаратуры [1]. В связи с этим на втором этапе исследований планируется выполнение роботом операций, близких к перечисленным действиям. Кроме того, на этом этапе будут отрабатываться возможности АР по взаимодействию с космонавтами.

СЧ ОКР «Испытатель» является начальным этапом фундаментальных исследований, направленных на создание РКН (робота космического назначения). Вместе с тем следует определиться с рациональной стратегией выполнения дальнейших работ в этом направлении. Необходимо интенсифицировать работы по созданию отечественных автономных роботизированных комплексов, способных заменять и/или дублировать действия человека.

В частности, следует актуализировать проект «Теледроид», в рамках которого следует выполнить исследования второго типа роботов – АРТС-II. Основная задача при этом – исследование функционирования в условиях длительного пребывания вне КС. Предполагается оценка воздействия факторов космического пространства на работу систем АРТС-II.

Результаты, полученные в ходе проведения выполняемых и планируемых проектов, позволят перевести АРТС из стадии научной аппаратуры к действующему оборудованию КС.

## **Выводы**

1. Предложено классифицировать РКН в зависимости от особенностей внешней среды.
2. АРТС, как научная аппаратура, сочетает свойства, обеспечивающие формирование условий проведения экспериментов и одновременно их регистрацию. Это обеспечит получение новых знаний о ее функциональных возможностях на различных этапах полета.
3. Представлены цели и задачи проведения исследований в рамках СЧ ОКР «Испытатель».
4. Реальная возможность оценки функциональных свойств АРТС первого типа может быть реализована с использованием АР «FEDOR».
5. С целью интенсификации работ по созданию отечественного робототехнического комплекса космического назначения необходимо выполнить подготовку ТЗ для проведения исследований функционирования АР «FEDOR» внутри КС, актуализировать работы по созданию АРТС второго типа в рамках ОКР «Теледроид».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анализ основных результатов внекорабельной деятельности экипажей МКС / Крючков Б.И., Алтунин А.А., Долгов П.П., Ярополов В.И., Усов В.М., Иродов Е.Ю., Верба Д.И., Коренной В.С. // Пилотируемые полеты в космос. – 2017. – № 1 (22). – С. 56–67.
- [2] Сорокин В.Г. Вариант состава и структурной схемы базового блока автономного антропоморфного робота космического исполнения // Пилотируемые полеты в космос. – 2017. – № 1(22). – С. 68–64.
- [3] Julia Badger, Dustin Gooding, Kody Ensley, Kimberly Hambuchen, Allison Thackston. A Case Study on Robonaut 2 // ROS in Space. The Complete Reference (Volume 1). P. 343-373. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9>.
- [4] A Schiele, T Kruger, S Kimmer, M Aiple, J Rebelo, J Smisek, E den Exter, E Mattheson, A Henandez, and F van der Hulst. Haptics-2 – A System for Bilateral Control Experiments from Space to Ground Via Geosynchronous Satellites. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pages 892–897. IEEE, 2016.
- [5] Bamfaste S. Development of a Software Layer for the Integration of Robotic Elements into the METERON Infrastructure using Robotic Services, Master Thesis, Luleå University of Technology, 2016.
- [6] Mishkin A., Lee Y., Korth D., Blanc T. Le. Human - Robotic Missions to the Moon and Mars: Operations Design Implications. IEEE Aerospace Conference, 2007.
- [7] Bualat M., Carey W., Fong T., et al. Preparing for Crew-Control of Surface Robots from Orbit . IAA Space Exploration Conference, 2014. Lastly accessed 09.07.2015. URL: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/iaa14-bualat-et-al.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/iaa14-bualat-et-al.pdf).
- [8] Birkenkamp P., Leidner D., Lii N.Y. Ubiquitous User Interface Design for Space Robotic Operation / 14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA).
- [9] Обоснование выбора структурной схемы роботов космического исполнения / Жиденко И.Г., Кутлубаев И.М., Богданов А.А., Сычков В.Б. // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1. – № 17. – С. 278–280.
- [10] A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot / M. Zucker, S. Joo, M. X. Grey, C. Rasmussen, E. Huang, M. Stilman, A. Bobick Journal of Field Robotics, vol. 32, No. 3, 2015, pp. 336–351.

## REFERENCES

- [1] Main Results of EVA performed by the ISS Crews / Krychkov B.I., Altunin A.A., Dolgov P.P., Yaroplov V.I., Usov V.M., Irodov E.Yu., Verba D.I., Korennoy V.S. // Manned Space Flights. – 2017. – No 1 (22). – pp. 56–67.
- [2] Sorokin V.G. An Option of the Configuration and Structural Scheme of the Base Unit of the Stand-Alone Humanoid Space Robot // Manned Space Flights. – 2017. – No 1 (22). – pp. 68–64.
- [3] Julia Badger, Dustin Gooding, Kody Ensley, Kimberly Hambuchen, Allison Thackston. A Case Study on Robonaut 2 // ROS in Space. The Complete Reference (Volume 1). P. 343-373. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9>.
- [4] A Schiele, T Kruger, S Kimmer, M Aiple, J Rebelo, J Smisek, E den Exter, E Mattheson, A Henandez, and F van der Hulst. Haptics-2 – A System for Bilateral Control Experiments from Space to Ground Via Geosynchronous Satellites. In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pages 892–897. IEEE, 2016.

- [5] Bamfaste S. Development of a Software Layer for the Integration of Robotic Elements into the METERON Infrastructure using Robotic Services, Master Thesis, Luleå University of Technology, 2016.
- [6] Mishkin A., Lee Y., Korth D., Blanc T. Le. Human - Robotic Missions to the Moon and Mars: Operations Design Implications. IEEE Aerospace Conference, 2007.
- [7] Bualat M., Carey W., Fong T., et al. Preparing for Crew-Control of Surface Robots from Orbit . IAA Space Exploration Conference, 2014. Lastly accessed 09.07.2015. URL: [http://www.ri.cmu.edu/pub\\_files/iaa14-bualat-et-al.pdf](http://www.ri.cmu.edu/pub_files/iaa14-bualat-et-al.pdf).
- [8] Birkenkamp P., Leidner D., Lii N.Y. Ubiquitous User Interface Design for Space Robotic Operation / 14th Symposium on Advanced Space Technologies in Robotics and Automation (ASTRA).
- [9] Basis of Structural Scheme Selection of Space Application Robots / Zhidenko I.G., Kutlubaev I.M., Bogdanov A.A., Sychkov V.B. // Reshetnev Readings – Vol. 1. – No 17. – pp. 278–280.
- [10] A General-purpose System for Teleoperation of the DRC-HUBO Humanoid Robot / M. Zucker, S. Joo, M. X. Grey, C. Rasmussen, E. Huang, M. Stilman, A. Bobick Journal of Field Robotics, vol. 32, No. 3, 2015, pp. 336–351.



## ОБЗОРЫ

## OVERVIEWS

УДК 629.78:004:62(091)

### **ВИРТУАЛЬНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ПКК В ИНТЕРЕСАХ ИСТОРИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СОХРАНЕНИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТАХ**

Ю.М. Батурин, Б.И. Крючков, А.В. Леонов

Член-корр. РАН, докт. юр. наук, профессор Ю.М. Батурин (ИИЕТ РАН)  
Докт. техн. наук Б.И. Крючков (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)   
Докт. техн. наук А.В. Леонов (ИИЕТ РАН)

Статья посвящена оцениванию возможностей создания виртуальных 3D-моделей уникальных пилотируемых космических комплексов в реальных условиях космического полета в интересах их историко-технических и историко-научных исследований, а также популяризации пилотируемой космонавтики. Анализируется опыт использования трехмерной графики в пилотируемой космонавтике, используемый аппаратный состав и методические приемы. Рассматривается имеющийся и потенциальный состав различного инструментария, необходимого для осуществления 3D-моделирования крупномасштабных пилотируемых космических объектов в космосе на основе опыта создания трехмерных графических моделей крупномасштабных научно-технических объектов на Земле. Сформулированы основные предложения по сканированию Международной космической станции в рамках космического эксперимента для создания ее виртуальной 3D-модели.

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, пилотируемый космический комплекс, космонавт, астронавт, экипаж, трехмерная графика, съемка в космосе, история науки и техники, лазерное сканирование, виртуальное моделирование, фотограмметрические методы, 3D-модели лунной базы.

### **Virtual 3D-Simulation of Real Manned Space Complexes in the Interests of Historical and Technical Studies and Saving Scientific and Technical Information About Objects. Yu.M. Baturin, B.I. Kryuchkov, A.V. Leonov**

The paper evaluates the feasibility of creating 3D-models of unique manned space complexes in real conditions of a space flight for carrying out historical-technical and historical-scientific studies and also for popularizing manned space exploration. The experience in applying three-dimensional graphics in manned space exploration as well as the content of hardware used and methodical techniques are analyzed. Available and potentially feasible content of instruments required for

implementing 3D-simulation of large-scale manned objects in space on the basis of the experience in creating three-dimensional graphic models of large-scale scientific and technical objects on the earth are considered. Main proposals for scanning the International Space Station within the space experiment framework for creating its virtual 3D-model are put forward.

**Keywords:** 3D-simulation, manned space complex, cosmonaut, astronaut, crew, 3D-graphics, filming in space, history of science and technology, laser scanning, virtual simulation, photogrammetric methods, 3D-models of a lunar base.

Каждый пилотируемый космический комплекс (ПКК) является своего рода уникальным научно-техническим объектом. В большей степени качествами уникальности обладают крупномасштабные ПКК, такие как многомодульные национальные орбитальные космические станции типа «Салют», «Алмаз», «Мир». Каждая из них существовала практически в единственном экземпляре, а если и были модификации, то они всегда имели столь значимые конструктивно-технологические отличия, что уникальность каждой также не вызывала сомнений. Любой из крупномасштабных ПКК является детищем государства, создавшего его, и, в определенном смысле, символизирует уровень научно-технического и технологического развития целой страны. В создании ПКК участвуют сотни научных и производственных коллективов, десятки тысяч людей. Иногда процессы их разработки (с учетом помодульного введения в строй) занимают не один десяток лет. Сроки эксплуатации могут достигать 15–20 лет и более.

Беспрецедентным по своей значимости – как научно-технической, так и общечеловеческой, стало создание и использование Международной космической станции (МКС). МКС характеризует не только очередной этап развития мировой пилотируемой космонавтики, но в значительной мере и уровень научно-технологического развития всего человечества в конце XX – начале XXI века. Реальную сборку МКС, состоящую из модулей и узлов различных стран (РФ, США, Япония, страны-участницы ЕКА, Канада), можно наблюдать только в космосе. Причем на различных этапах своего развития она имела разный состав.

По окончании эксплуатации ПКК они разрушаются (ликвидируются) при сведении с орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ) и сгорании в плотных слоях атмосферы с падением оставшихся элементов в океан. Во многих случаях при этом безвозвратно утрачивается информация о них, необходимая для будущих историко-технических и историко-научных исследований, а также для популяризации пилотируемой космонавтики.

ПКК можно отнести к историческим техническим объектам, являющимся частью мирового культурного наследия [1, 7]. Сохранение полноценной информации о них является важной проблемой, решение которой, однако, возможно уже в настоящее время.

Необходимость сохранения информации о национальных и мировых научных и технологических достижениях признается не только научным сообществом [1, 8, 10, 11], но и официальными государственными органами. В частности, Министерство культуры РФ в 2014 году выпустило специальные технические рекомендации по созданию виртуальных музеев [13].

### **Об использовании методов трехмерной графики в пилотируемой космонавтике**

Виртуальное моделирование становится неотъемлемой частью процессов создания и использования новой космической техники. Яркими примерами применения 3D-моделей стало использование виртуальных изображений в процессе создания космической техники, при подготовке экипажей и сопровождении выходов космонавтов в открытый космос в ходе выполнения пилотируемых миссий на орбитальных космических станциях [15, 19]. Виртуальные тренажеры используются как при наземных тренировках экипажей, так и при поддержании космонавтами навыков выполнения сложных операций во время осуществления длительных экспедиций. Новая сфера применения трехмерной графики в пилотируемой космонавтике – использование 3D-моделей при создании робототехнических комплексов, в том числе антропоморфного типа, напланетных обитаемых баз, моделировании деятельности космонавтов на поверхности Луны и Марса [12, 15].

В интересах популяризации космонавтики в настоящее время довольно широко используются габаритные 3D-модели пилотируемых космических объектов. Они позволяют ознакомиться с устройством различных, в том числе и крупномасштабных ПКК, а также их основными конструктивно-компоновочными характеристиками. В частности, известны подобные модели ПКА «Восток», орбитального комплекса «Мир», МКС [4, 5, 6]. По сути, они представляют собой схематические объемные изображения либо отдельных, либо многомодульных (в сборке) конструкций этих космических объектов, выполненных в соответствии с их реальной компоновкой. Габаритные изображения ПКК состояются из отдельных геометрических фигур (цилиндры, шары, параллелепипеды, призмы, эллипсоиды и т. д.) соответствующих размеров и форм. Их взаимное расположение, пропорции и контуры позволяют получить общие представления о реальном космическом объекте.

Одним из преимуществ таких 3D-моделей является возможность их вращения на экране компьютера в любом направлении, что способствует лучшему пониманию структуры ПКК. Кроме того, специальные программы позволяют наблюдать последовательность сборки (строительства) таких объектов. Это особенно важно для многомодульных ПКК, например, «Мира», МКС. В то же время следует отметить, что «рисованные модели» не пригодны для научно-исторических исследований и решения задач сохранения научно-технического наследия и достижений человечества. При популяриза-

ции пилотируемой космонавтики они также имеют ограниченные возможности. Габаритные 3D-модели пилотируемых космических комплексов следует рассматривать лишь как первичную трехмерную информацию о ПКК.

### **Краткая оценка состояния работ по виртуальному 3D-моделированию крупномасштабных научно-технических объектов**

Применение виртуальных 3D-моделей для изучения и популяризации крупномасштабных научно-технических объектов находится в начальной стадии как в России, так и в мире в целом. Это связано с высокой сложностью и трудоемкостью создания 3D-моделей таких объектов. Для создания точных и детальных 3D-моделей крупномасштабных объектов, обеспечивающих высокую метрическую точность и фотореалистичность, зачастую необходимо применение целого комплекса современных технологий (лазерного сканирования, фотограмметрии, фотосъемки с расширенным динамическим диапазоном), автоматическое и ручное 3D-моделирование с использованием специального программного обеспечения. Для обеспечения возможности интерактивной визуализации крупномасштабных 3D-моделей необходимо, как правило, сочетать в рамках одной модели элементы разного уровня детализации, вручную оптимизировать их геометрию и текстуры.

Одним из первых примеров полноценной 3D-модели крупного технического объекта, созданной на основе результатов лазерного сканирования, стала модель самолета братьев Райт, представленная в 2013 году на сайте Смитсоновского института (проект Smithsonian X3D). Впоследствии там же были представлены и другие 3D-модели технических объектов, например, модель посадочного модуля Apollo 11 [1].

В России в 2013 году была создана точная и детальная 3D-модель Шаболовской радиобашни [8]. Лазерное сканирование позволило установить, что указанная в исторической документации высота башни более чем на 1 м отличается в меньшую сторону от реальной высоты, а детальный анализ конструкции с использованием 3D-модели позволил найти целый ряд отличий фактической конструкции от исторической документации. Аналогичные работы с использованием лазерного сканирования были впоследствии проведены на крейсере «Аврора», электроподстанции «Абакан-районная» [1].

Анализ выполненных проектов показывает, что виртуальное 3D-моделирование и 3D-реконструкция крупномасштабных технических объектов является не только современным способом их популяризации, но и эффективным методом исследования их структуры (конструкции), в том числе в ее историческом развитии. Это связано с рядом причин. Прежде всего, современные 3D-технологии позволяют сохранить намного больший объем метрической информации об объекте, чем традиционные обмеры. Эта информация затем может быть детально исследована на этапе камеральной об-

работки, что особенно актуально при исследовании труднодоступных объектов. 3D-моделирование позволяет виртуально реконструировать утраченные элементы, проверить пространственные гипотезы об устройстве объекта. Виртуальные модели крупных технических объектов могут быть совмещены с виртуальной моделью их окружения, что позволяет эффективно исследовать их взаимосвязи (например, движение ППК по орбите вокруг Земли). 3D-модель может быть использована как основа для научной визуализации, в частности, для совмещения и визуализации разнородных данных об объекте в едином виртуальном пространстве и их комплексного анализа [8].

### **Видеосъемка крупномасштабного ППК при облете транспортным пилотируемым кораблем как шаг к решению задачи его виртуального 3D-моделирования**

Рассмотрим несколько примеров выполнения космонавтами конкретных работ по съемкам больших космических объектов. На их основе могут быть выработаны рекомендации, полезные для решения в перспективе задач 3D-моделирования крупномасштабных ППК.

Видеосъемка (фотографирование) крупномасштабного ППК в ходе его облета космонавтами на транспортном пилотируемом корабле не является принципиально новой задачей. Подобные работы неоднократно выполнялись в ходе полетов орбитальных космических станций (ОКС) «Салют-6», «Салют-7», комплекса «Мир», МКС. Как правило, такие съемки совмещались с выполнением динамических режимов, связанных либо с плановой перестыковкой транспортного корабля с одного стыковочного узла на другой, либо с его отстыковкой перед спуском на Землю.

Впервые перестыковку в космосе и фотографирование станции «Салют-6» выполнили В. Коваленок и А. Иванченков на корабле «Союз-29» в сентябре 1978 года.

В 1983 году впервые в практике советской космонавтики на орбите ИСЗ был создан уникальный комплекс, состоящий из орбитальной станции, транспортного корабля снабжения (ТКС) и транспортного пилотируемого корабля (ТПК) типа «Союз Т». Его облеты при перестыковках с одного отсека на другой (например, с АО на ПхО) и съемку экипажи также выполняли неоднократно.

Одной из самых удачных съемок орбитального комплекса «Мир» можно считать видеосъемку С. Крикалёва в октябре 1991 года, выполненную при облете станции на корабле «Союз ТМ-13». Съемка была проведена при перестыковке транспортного корабля с отсека ПхО на стыковочный узел модуля «Квант». Кроме общих видов комплекса, состоящего из нескольких модулей, в отснятый сюжет были включены крупные виды его отдельных элементов – стыковочных узлов, солнечных батарей, антенн и др. Большой

интерес вызвала съемка собранной космонавтами уникальной стержневой фермы «Софора» длиной 14,5 м и поперечным сечением 0,5 x 0,5 м. В то же время специалисты Центра управления полетами (ЦУП) отметили, что для детального анализа операций по установке «Софоры» только этой видеосъемки недостаточно. Потребовалась дополнительная фотосъемка экипажем наиболее важных элементов собранной конструкции.

Приведем несколько примеров съемок МКС, выполненных экипажами (таблица 1).

Таблица 1

Примеры фото- и видеосъемок МКС

№ п/п	Дата	Транспортный корабль	Расстояние до МКС, м	Длительность съемки, ч	Примечание
1	Август, 2005 г.	«Дискавери» (STS-114)	120	1,5	При облете МКС после расстыковки
2	Июль, 2006 г.	«Дискавери» (STS-121)	120	~1,5	При облете МКС после расстыковки
3	Май, 2010 г.	«Атлантис» (STS-132)	200	1,3	При облете МКС перед стыковкой
4	Май, 2011 г.	«Индевор» (STS-134)	180, 120	более 1	При облете МКС после расстыковки
5	Март, 2011 г.	«Дискавери» (STS-133)	Более 120	0,9	При облете МКС после расстыковки
6	Май, 2011 г.	«Союз ТМА-20»	200	0,5	В режиме зависания ТПК после расстыковки

Полный облет МКС на корабле «Союз ТМА-20» после окончания экспедиции МКС-26/27 перед спуском на Землю планировался в 2011 году с целью съемки уникальной сборки объектов, входящих в тот момент в состав МКС. В период с февраля по март были заняты все стыковочные узлы МКС, на которых находились: ТПК «Союз ТМА-20»; ТПК «Союз ТМА-01М»; транспортный грузовой корабль (ТГК) «Прогресс М-09М»; ATV2 «Иоганн Кеплер»; НТВ2 «Конотори»; ОК шаттл «Дискавери» (STS-133). Однако из соображений безопасности облет МКС был отменен.

Отстыковка российского транспортного корабля от модуля «Рассвет» была выполнена 24 мая 2011 года. Команда на открытие крюков ТПК по указанию ЦУПа выдана экипажем в 00:32:00. После раскрытия крюков и срабатывания толкателей экипаж перешел на ручное управление, через три минуты выдал импульс 1 м/с на отвод, после чего выполнил зависание корабля на дальности 200 метров. Далее во время разворота и стабилизации МКС была проведена ее фото- и видеосъемка. На съемку потребовалось около 30 минут. Корабль пилотировал его командир Д. Кондратьев, фото- и видеосъемку выполнял через иллюминатор БО бортинженер астронавт ЕКА П. Неспольи. В 01:15:00 был выдан импульс на двигателях ДПО-Б1 на 20 с на отвод «Союза».

Обобщая приведенные примеры, а также учитывая результаты других подобных экспериментов и динамических операций, сформулируем некоторые методические выводы и рекомендации:

- облет и съемка больших космических комплексов на орбите ИСЗ экипажами транспортных пилотируемых кораблей различного типа являются штатными операциями, выполнение которых подготовленными космонавтами не вызывает затруднений;

- осуществление облетов крупномасштабных объектов типа «Мир», МКС должно производиться только при гарантированном обеспечении безопасности космонавтов и полном исключении возможности повреждения космических комплексов;

- соблюдение безопасного расстояния от одного объекта до другого является необходимым условием проведения облета и съемки ПКК; как следует из опыта облетов МКС, минимальная величина безопасного расстояния составляет около 120 м;

- для облетов обычно используются двигатели орбитального маневрирования транспортных кораблей (для шаттлов – двигатели типа OMS, для «Союзов» – ДПО);

- пилотирование корабля при облете осуществляет его командир, фото- и видеосъемку – другой член экипажа, например, на ТПК «Союз» – бортинженер;

- съемку ПКК целесообразно заранее включать в программу полета, в противном случае нарушаются заведомо отработанные экипажем циклограммы выполнения динамических режимов, например, таких как расстыковка и др., что может привести к возникновению нештатных ситуаций;

- съемка МКС экипажами шаттлов проводилась многократно, причем корабль выполнял 1–2 полных облета станции; съемка из ТПК типа «Союз» проводилась только из режима зависания в районе МКС или в ходе перестыковок ТПК с одного узла на другой. Полные облеты МКС на кораблях «Союз» до настоящего времени ни разу не выполнялись;

- детальная съемка отдельных узлов, приборов и элементов, расположенных на внешней поверхности МКС, выполняется экипажами станции во время выходов в открытый космос; основные проблемы, возникающие при этом, связаны с недостаточной освещенностью (ожидание выхода на освещенную часть орбиты может занимать более 20 минут) и затратами времени на выбор необходимого ракурса съемок.

Таким образом, при наличии соответствующего оснащения, подготовленного экипажа и обеспечении необходимой безопасности работ, съемки крупномасштабных космических объектов на орбите Земли с использованием транспортных пилотируемых кораблей в интересах создания 3D-моделей вполне осуществимы.

## Опыт 3D-видеосъемок, выполненных экипажами ПКА

*«Для рядового человека единственный способ  
прикоснуться к космосу –  
отправить туда камеры IMAX»*

*Астронавт Майкл Коллинз*

Первые «космические» 3D-видеосъемки были сделаны на Земле в 1982 году при запуске многоразового корабля «Спейс шаттл» «Колумбия». Для их осуществления использовалась технология IMAX 3D. По результатам отснятого материала был сделан документальный фильм, который получил высокую оценку. Пленочные камеры IMAX обладали самым высоким разрешением в мире – оно почти в 10 раз превышало разрешение на 35-миллиметровых пленках. Фильмы, отснятые на них, позволяли погружать зрителей как бы в центр происходящих событий, делать их сопричастными тому, что происходит на экране [2].

Следующим естественным шагом было размещение камер IMAX на борту пилотируемого космического аппарата (ПКА). Впервые такая камера появилась в космосе в 1982 году. Камеры IMAX использовались экипажами многих шаттлов, в частности: 41C, 41D, 41G; STS-29, -34, -32, -31, -42, -46, -51, -61, -63, -71 и др.

Камера IMAX находилась и на борту орбитальной станции «Мир». В частности, ее успешно применяли космонавты основной экспедиции ЭО-18 Г. Стрекалов и Н. Тагарт в 1995 году (рис 1).



Рис. 1. Камера IMAX на борту орбитального комплекса «Мир» (фото НАСА)

В мае 2001 года пилот шаттла «Эндевор» STS-100 Джеффри Шизэрс Эшби после отстыковки от МКС совершил ее облет для съемок объемного фильма в IMAX 3D.

Большой интерес у специалистов вызвали съемки в формате IMAX 3D, выполненные экипажем «Атлантис» STS-125 (пятый полет к телескопу Хаббл, май, 2009 г.). Астронавты этой миссии проводили уникальные



операции по ремонту телескопа. После полета на материалах съемок был сделан 45-минутный документальный фильм (2010 г.), позволивший оценить выполненную работу экипажем шаттла, и разработать предложения на перспективу по совершенствованию методов технического обслуживания и ремонта в космосе. В дополнение к съемкам на STS-125 при создании фильма использовались съемки камерой IMAX экипажем Дискавери STS-31 (выведение телескопа на орбиту, апрель, 1990 г.) и Индевор STS-61 (5 выходов в открытый космос для ремонта и дооснащения телескопа, декабрь, 1993 г.).

Новое качество технологии IMAX 3D получили в рамках полетов международных экипажей на МКС. Пока существовала американская программа «Спейс шаттл», особых проблем с обеспечением космонавтов 70-миллиметровой пленкой в космосе не было. Ее можно было доставлять часто и помногу (для технологии IMAX характерен большой расход пленки – на 8 мин съемки ее необходимо около 1,8 км). С закрытием программы полетов шаттлов из-за недостаточных весовых и габаритных возможностей «Союзов» возникла проблема пополнения запасов пленки. Доставка на ТГК «Прогресс» была ограничена из-за недостаточной частоты их полетов. Пришлось бы длительно хранить пленку на борту МКС, что стало проблематичным из-за ее порчи при длительном воздействии радиации. Выходом из создавшегося положения стала разработка цифрового варианта камеры IMAX. Радиация действует и на цифровые камеры, но специалисты научились бороться с этим негативным явлением.

Особенно больших успехов при работе с камерой IMAX на МКС добился российский космонавт С. Крикалёв. Под руководством продюсера и режиссера Т. Майерса удалось создать фильм о сборке МКС и работе экипажей внутри станции (рис. 2). При этом на борту станции использовались две камеры IMAX, одна снаружи МКС, другая в ее обитаемых отсеках. Фильм «МКС в 3D» (2002 г.) получил всеобщее признание и за рубежом, и в нашей стране.



Рис. 2. С. Крикалёв и Б. Шепард во время съемки камерой IMAX на борту МКС (фото НАСА)

Следующим этапом развития 3D-съемок в космосе можно считать совместные работы ЕКА и НАСА на МКС со стереоскопическими камерами типа ERB (European Recording Binocular). Их создателями стали Италия (Techno System, г. Неаполь) и Нидерланды (Cosine BV, г. Лейден). Цифровые стереокамеры типа ERB с двумя объективами позволяют вести прямую 3D-трансляцию из космоса, что обеспечивает хорошие перспективы применения 3D-видеосъемки в пилотируемой космонавтике.

Сначала была разработана и испытана в условиях МКС стереокамера ERB-1. Затем на борт станции была доставлена ее усовершенствованная версия – камера ERB-2 (рис. 3).

Стереокамера ERB-1 была доставлена на МКС в июне 2006 года. В том же году европейский астронавт Томас Рейтер пользовался ей на борту станции, выполняя полет в составе экспедиций МКС-13 / МКС-14.



Рис. 3. Внешний вид камеры ERB-2 [23]

Камера ERB-2 была введена в строй в сентябре 2010 года и до конца 2013 года с ее помощью отрабатывались приемы и методы съемок с целью получения наиболее эффективных результатов, в том числе, определение скорости перемещения человека с камерой по МКС, поиск оптимальных зон и ракурсов съемок, выбор фокусного расстояния, определение мест фиксации для стационарных съемок, выбор сцен для получения максимального 3D-эффекта и др.

По сравнению с ERB-1 новая камера имеет улучшенное разрешение (1280 x 720 пикселей), благодаря которому она соответствует современным стандартам (HDTV). Прямая трансляция видеосюжетов обеспечивается за счет высокоскоростной передачи данных. Стереокамера ERB-2 имеет также высокую чувствительность при плохом освещении [3].

Итальянский астронавт П. Неспולי снимал на ERB-2 видео- и фотосюжеты в ходе своего второго полета на МКС в составе экспедиции МКС-26. Впервые прямая опытная трансляция с использованием ERB-2 была прове-

дена астронавтом НАСА Р. Гараном в ходе экспедиции МКС – в космический центр ЕКА в Нидерландах 28 в августе 2011 года. [23].

### **Инструментарий для 3D-съемок ПКК в условиях экстремальной среды**

Для решения задач 3D-съемок крупномасштабных ПКК необходимы определенные технические средства. Их выбор будет зависеть от типа используемых транспортных пилотируемых кораблей, наличия и возможностей беспилотных средств для облета ПКК, приспособленных к съемкам в условиях экстремальной среды видео-, фото- и сканирующей аппаратуры. Рассмотрим кратко эти средства.

#### ***1. Пилотируемые космические аппараты***

ТПК, предназначенные для транспортировки экипажей и грузов, могут использоваться для 3D-съемок крупномасштабных ПКК. Уже имеется определенный опыт применения для фото- и видеосъемок орбитальных станций «Салют-7», «Мир», МКС транспортных кораблей с экипажем на борту типа «Союз» и «Спейс шаттл». В будущем для подобных работ могут быть использованы и новые перспективные транспортные корабли – российские класса «Федерация», американские типа «Орион» и др. Наиболее критичными факторами проведения съемок с их помощью в режимах облета ПКК являются два: безопасность работ и запас горючего в баках транспортного корабля. Первый фактор определяет исключение возможностей столкновения объектов при выполнении маневров облета ПКК. Второй – характеризует возможности ПКА с учетом целевых задач его применения: для обеспечения стыковок, перестыковок, спуска и других динамических операций, предусмотренных программой выполнения полета. При необходимости ТПК в процессе облета может зависать в определенной зоне ПКК для осуществления детальных съемок каких-либо его элементов.

#### ***2. Беспилотные платформы для облета ПКК***

В данном случае речь идет об использовании специализированных малых космических аппаратов (МКА) для выполнения съемок вблизи функционирующего на орбитах ИСЗ (или Луны) крупномасштабного ПКК. В работе [14] предложена структурно-функциональная схема подобного МКА, оснащенного необходимым комплексом оборудования для безопасного маневрирования в районе ПКК. Движением МКА и его фотосъемочной аппаратурой управляет подготовленный экипаж ПКК.

#### ***3. Бортовые робототехнические средства***

В практике пилотируемых полетов широко используются роботы-манипуляторы для выполнения задач сборки больших космических объектов, перемещения оборудования и космонавтов в различные зоны ПКК, содействия

космонавтам при выполнении операций технического обслуживания и ремонта и др.

Наилучшими рабочими характеристиками отличаются манипуляторы, применяемые на МКС – «Канадарм-2», «Декстр», ERA (планируется). Общая длина манипулятора «Канадарм-2» составляет 17 м, робота-манипулятора ERA – 11 м [16]. Подобные манипуляторы могут быть эффективно использованы для фото- и видеосъемок и сканирования внешней поверхности ПКК. Как правило, все они оснащены универсальными концевыми захватными устройствами, позволяющими крепить на них любые средства для съемок. Кроме того, они имеют автоматические системы, предотвращающие столкновение с другими объектами, средства подсветки и видеокамеры. В ряде случаев успешным может быть совместное применение роботов-манипуляторов с длинными конечностями (типа «Канадарм») и гибких типа «Декстр».

При необходимости на руке бортового манипулятора в специальном рабочем месте может быть зафиксирован космонавт с аппаратурой для съемки ПКК. В пределах длины руки манипулятора космонавт может перемещаться в ту или иную зону ПКК.

#### **4. Средства перемещения космонавта**

Для съемок внешней поверхности и конструкции ПКК могут применяться средства перемещения космонавта (СПК) в безопорном пространстве. СПК ранцевого типа, работающие на принципе реактивного движения, уже использовались в ряде космических программ СССР и США [16]. Подобные средства удобны для рассматриваемых работ тем, что они многоразовые, оснащены гироскопическими устройствами, позволяющими удерживать СПК с космонавтом в определенном пространственном положении, позволяют выполнять операции безопасного облета ПКК.

### **3.5D-камеры, бортовые фотоаппараты, сканеры, веб-камеры**

#### **3.5.1D-камеры**

Общая характеристика 3D-камер типа IMAX и ERB-2 приведена выше.

#### **5.2. Бортовые фотоаппараты**

На ПКА уже более 45 лет для фотосъемок успешно используются фотоаппараты типа Nikon [17]. На МКС (рис. 4) применяются цифровые камеры Nikon D3, Nikon D2X и Nikon D3X со сменными объективами с фокусным расстоянием от 18 до 800 мм, необходимым программным обеспечением и соответствующими аксессуарами. Фотоаппараты оснащаются самыми современными объективами типа NIKKOR, которые имеют превосходные оптические характеристики и исключительно надежны в сложных условиях съемок. Функция D-видео позволяет использовать фотоаппарат для съемки видеороликов, причем очень высокого качества. Для работ в открытом космосе используются обычные профессиональные камеры, помещенные в гермобоксы.

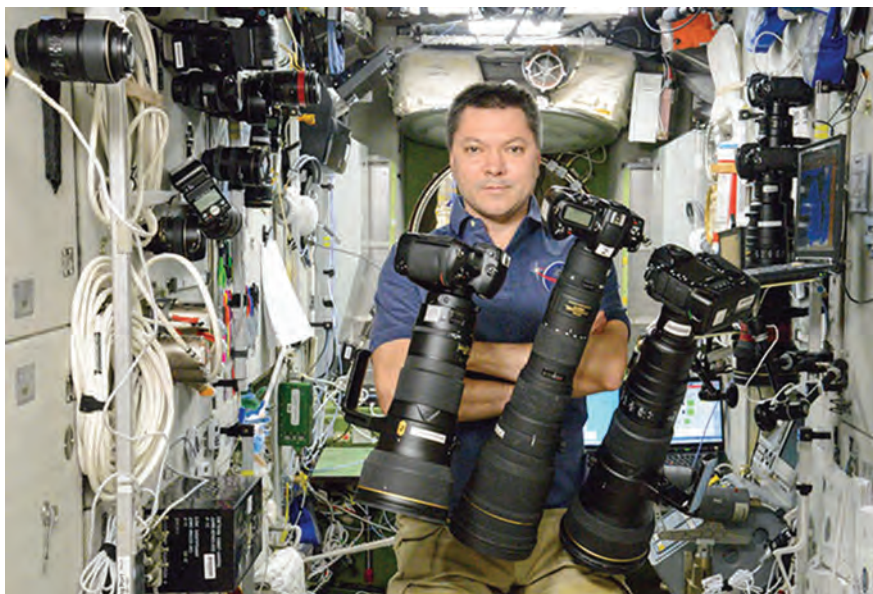


Рис. 4. О. Кононенко с фотоаппаратурой на МКС

### 5.3. Мини- видеокамеры типа Go Pro

Применяются на ТПК «Союз» для контроля деятельности экипажа и фиксации отдельных элементов внутри обитаемых отсеков. Могут снимать видео с разрешением более 3800 x 2100 ( SuperView при 30 fps), работать в режиме фотосъемки (с разрешением не менее 12 Mps), интервальной съемки, съемки фото и видео одновременно. Устанавливаются в отсеках СА и БО. Возможно использование для съемок внешних элементов ПКК через иллюминатор БО, а также снаружи при установке на корпусе ПКК или любом перемещаемом средстве. Вес таких мини-видеокамер не превышает 0,5 кг.

Мини-видеокамеры, помещаемые в гермобоксы, удобны при работе экипажей в открытом космосе. Они могут крепиться на шлем или корпус скафандра, не требуют больших усилий по их эксплуатации и не отвлекают космонавтов от основной работы. С помощью таких камер можно осуществлять прямую трансляцию внекорабельной деятельности в ЦУП, а также записывать видео на флеш-карту.

### 5.4. Видео- и вебкамеры

На МКС находится несколько моделей обычных видеокамер Sony. Они используются для видеофиксации экспериментов, выполняемых космонавтами, ведения репортажей, в том числе в режиме онлайн из жилых отсеков станции, записи через иллюминатор стыковок транспортных кораблей, а также видео полета над Землей. С них можно отправить на Землю отснятые видеоматериалы.

На РС МКС имеется следующая видеоаппаратура:

- видеокомплекс LIV с телеобъективом Fujinon A16 x 9 BRM-28AS;
- видеокомплекс HDTV с телеобъективом HJ15 x 8BIAS;
- видеокамера HDV (Sony HVR-21 и Sony HVR-27);
- видеокамера Sony DSR PD150P с 12-кратным вариообъективом.

Подробное описание и технические характеристики перечисленной аппаратуры приведены в [22].

На МКС нашли широкое применение веб-камерам – устройствам, предназначенным для фиксирования изображения в реальном времени и передачи его в сеть Интернет. НАСА запустило прямую видеотрансляцию с наружных и внутренних камер. В трансляцию включаются вахты космонавтов внутри станции, работы в открытом космосе, обзоры наружных конструкций МКС, стыковки кораблей, видео Земли [18].

Одна из камер может устанавливаться на манипуляторе МКС, что позволяет осуществлять внешний осмотр станции. Управление камерой происходит из обитаемых отсеков МКС.

### 5.5. Сканеры

При создании 3D-модели крупномасштабного ПКК следует учитывать, что на его внешней поверхности имеется огромное количество не только крупных, но и мелких деталей (элементов). При моделировании (например, полигональном) потребуется знание всех их геометрических параметров. В связи с этим становится необходимым применять лазерное сканирование для получения трехмерной точечной модели ПКК.

В таблице 2 приведены технические характеристики сканеров, наиболее пригодных для данных работ. На Земле подобные приборы успешно используются для оцифровки различных технических объектов [11, 20].

В серии сканеров типа Leica имеются малогабаритные приборы Leica BLK 360, однако они обеспечивают качественное сканирование только до 60 м.

Сканеры Leica P30/P40 обладают характеристиками и качествами, делающими их вполне пригодным для решения рассматриваемой задачи. В их числе: высокое качество сканирования до расстояния 120/270 м, автоматическая проверка и калибровка прибора, сверхвысокая скорость сканирования (до 1 млн точек в секунду), а значит возможность съемки элементов ПКК, обзор которых обеспечивается лишь на короткое время, встроенный накопитель записываемой информации, простота в управлении и др.

Хорошими техническими характеристиками обладает и сканер типа FaroFocus 350, причем его масса и стоимость гораздо ниже, чем у сканеров Leica P30/P40, а дальность применения достигает 350 м. Для использования в открытом космосе сканеры должны помещаться в герметичные боксы, подобные тем, что используются для фото- и видеоаппаратуры. При съемках из обитаемых отсеков ТПК гермобоксы не требуются.

Таблица 2

## Технические характеристики сканеров

Наименование	Размеры, мм	Масса, кг	Время работы	Дальность сканирования, м	Сканирование	Диапазон температур, °С	Примечание
Leica BLK 360	Высота 165, диаметр 100	1	Более 40 точек стояния прибора. Менее чем за 3 минуты выполняет панорамное сканирование с захватом фотоизображений в формате HDR	0,6–60	Скорость до 360 000 точек/с Панорама: 360° x 300° 3D-точность: 6 мм: 10 м/ 8 мм: 20 м	+5 ÷ +40	В настоящее время самый малогабаритный и легкий сканер
Leica Scan Station P30/P40	238 x x 358 x 395	12,64	(5,5–7,5) ч	p30 – 120 p40 – 270 (min – 0,4)	Угловая точность 8'' Панорама: 360° x 270°	–20 ÷ +50	Функции: фотосъемка, поверки и калибровка параметров
FaroFocus 350	230 x x 183 x 103	4,2	4,5 ч	От 0,6 до 350	Панорама: 300° x 360° Скорость до 976 000 точек/с Угловая точность 19'' 3D-точность: 2 мм: 10 м/ 3,5 мм: 20 м	–20 ÷ +55	Высокий класс защиты от внешних воздействий IP-54 Калибровка 1 раз в год

**Методы фотограмметрии**

Создание 3D-моделей объектов возможно методами фотограмметрии [21]. При этом необходимы их фотоизображения. В космонавтике фотограмметрия используется давно, в основном с целью разработки карт и планов Земли, других планет и космических тел.

Для создания 3D-моделей крупномасштабных космических объектов применение только методов фотограмметрии не очень эффективно, поскольку для их осуществления потребуются тысячи фотографий, сделанных в условиях космоса. При использовании ТПК для облета ПКК придется выполнять более сложные динамические маневры с большим количеством зависаний корабля в точках съемок. В конечном итоге это приведет к увеличению затрат времени на всю процедуру съемок. Кроме того, более сложные динамические операции могут негативно сказаться на безопасности экипажа.

Положительный эффект для создания виртуальной 3D-модели реального ПКК методы фотограмметрии могут дать при использовании в комплексе с методами сканирования.

### **Размеры крупномасштабных ПКК**

Строгого определения «крупномасштабных технических объектов», в том числе и для ПКК, не существует. В рамках данной работы к ним могут быть отнесены многомодульные ОКС и напланетные базы. Их масса может быть от десятков до сотен тонн, а габаритные размеры от десятков до ста и более метров. Так, масса ОКС «Салют-7» составляла вместе с модулем «Космос-1443» около 33 т, длина – 27,6 м, ширина по размаху солнечных батарей – 20,65 м, высота – более 12,5 м. Масса комплекса «Мир» была более 124 т, длина – 19 м, ширина – 31 м, высота – 27,5 м. Для МКС эти технические характеристики соответственно равны – 417 т, 109 м, 73,15 м, 27,4 м.

### **Роль и функции экипажа при 3D-съемках ПКК**

Полное сканирование столь масштабных объектов как МКС с одной точки съемки даже с использованием существующих манипуляторов типа «Канадарм-2», «Декстр», ERA практически невозможно. Для создания полноценной виртуальной модели МКС потребуется ее облет. Из имеющихся в настоящее время средств для решения этой задачи пригоден только ТПК «Союз МС».

Безопасный облет МКС может быть выполнен экипажем ТПК по заранее отработанной методике. Для сканирования наиболее важных (для создания модели) элементов МКС, например, стыковочных узлов, манипуляторов, внешнего научного оборудования и др., может быть использован режим зависания ТПК в зоне съемки.

Облет, т.е. боковое перемещение ТПК на заданном расстоянии для обеспечения его нужного положения относительно МКС выполняется командиром экипажа. Бортинженер, находясь в бытовом отсеке, контролирует дальность до МКС с помощью лазерного дальномера и выполняет сканирование. В зависимости от программы полета ТПК по окончании работ либо уводится от МКС для подготовки к спуску, либо возвращается на МКС – стыкуется на заранее выбранный узел. Как правило, все операции, необходимые для управления ТПК на этапах сближения, причаливания, стыковки и расстыковки, зависания, облетов, в том числе в ручных режимах, отрабатываются космонавтами при подготовке к полетам и, по сути, являются стандартными.

### **Предложения по постановке космического эксперимента**

Создание виртуальной 3D-модели реальной МКС можно осуществить в рамках специально поставленного космического эксперимента (КЭ). Порядок постановки КЭ определяется положениями, разработанными Координационным научно-техническим советом Роскосмоса [22]. КЭ может быть выполнен в рамках научных направлений № 5 – «Технологии освоения космического пространства» или № 6 – «Образование и популяризация космических технологий». К числу средств обеспечения КЭ можно отнести: ТПК с необходимым запасом горючего в двигательной установке и подготовлен-



ным экипажем на борту; сканер, сертифицированный для работы в космосе; фото- и видеоаппаратуру из состава имеющейся на борту; программное обеспечение для наземной обработки данных сканирования, методику выполнения работ.

Исходя из соображений безопасности при ограниченном запасе горючего в ТПК «Союз МС», наиболее рациональным представляется поэтапное проведение КЭ. При этом сканирование МКС выполняется по частям, поочередно двумя-тремя экипажами РС МКС, например, на участках полета после отстыковки ТПК от пилотируемого комплекса и спуском космонавтов на Землю. Для отработки технологии сканирования использовался макет МКС (масштаб 1:48), созданный в НИИ ЦПК для подготовки космонавтов (рис. 5).



Рис. 5. Макет МКС для отработки методики 3D-моделирования

## Выводы

1. Крупномасштабные пилотируемые космические комплексы, такие как многомодульные национальные орбитальные космические станции типа «Салют», «Алмаз», «Мир», Международная космическая станция, являются уникальными объектами, в значительной мере характеризующими определенный этап научно-технического развития человечества. По окончании эксплуатации они разрушаются (ликвидируются), при этом безвозвратно утрачивается значительная часть подлинной информации о них, необходимая для будущих историко-технических и историко-научных исследований, а также для популяризации пилотируемой космонавтики.

2. Сохранение полноценной информации об уникальных ПКК является важной проблемой, решение которой возможно уже в настоящее время. Одним из самых доступных и современных способов решения этой проблемы является виртуальное 3D-моделирование реальных ПКК. Опыт создания цифровых моделей крупномасштабных наземных научно-технических и природных комплексов уже имеется и может быть использован для решения подобных задач в космосе.

3. В настоящее время на завершающем этапе функционирования находится уникальный научно-технический объект – Международная космическая станция. Сохранение подлинной информации о конструктивно-технологических особенностях МКС можно осуществить путем создания виртуальной 3D-модели реального объекта в рамках специально поставленного космического эксперимента. В статье рассматриваются основные организационно-методические особенности и даются предложения по проведению такого эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Леонов А.В. Виртуальное 3D-моделирование в истории науки и техники. Докторская диссертация, ИИЕТ РАН – 2018. – 319 с.
- [2] Сердечнов А. Как снимался 3D-фильм об МКС. Популярная механика, апрель, 2014.
- [3] Sabbatini M., Visentin G, Collon M., Ranebo H., Sunderland D., Fortezza R. Стереосъемка на Международной космической станции. SPIE 64901P, Сан-Хосе, Калифорния, США, ISSN 0277-786X, 2007. – 2018. – 1–6 с.
- [4] <http://spacegid.com/pryamaya-onlayn-translyatsiya-s-mks.html#i>
- [5] <https://sketchfab.com/models/bd6ac084ae5645848a67597b17665579?ref=related>
- [6] <https://sketchfab.com/models/6dfff011b8df4b0891366aab8b6b0349?ref=related>
- [7] Бородин Л.И., Жеребятьев Д.И. Технологии 3D-моделирования в исторических исследованиях: от визуализации к аналитике // Историческая информатика. – 2012. – № 2. – С. 49–63.
- [8] Леонов А.В. Применение 3D-технологий в истории науки и техники. 3D-модель как историко-технический источник. В сб.: Междисциплинарные методы в изучении истории науки и техники: Материалы науч. конф., Москва, 27 мая 2015 г. / Отв. ред. Ю.М. Батулин. – М.: ИИЕТ РАН, 2015. – С. 42–45.
- [9] Михайлюк М.В., Торгашев М.А. Моделирование и распределенная стереовизуализация Международной космической станции в режиме реального времени // XVIII годичная научная конференция, посвященная 80-летию ИИЕТ РАН: Москва, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 17–19 апреля 2012 г.: Труды конференции, Т. II. – М.: Янус-К, 2012. – С. 859–860.
- [10] Рысь И.В., Леонов А.В. Методы виртуальной реконструкции памятников техники: мировой опыт. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова. Годичная научная конференция (2016) / Отв. ред. Р.В. Артеменко. – М.: ИИЕТ РАН, 2016. – С. 720–721.
- [11] Рысь И.В., Карташев М.О., Леонов А.В. Виртуальная реконструкция электромотоцикла Columbia (1901): методика 3D-моделирования и первые результаты. В сб.: Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова. Годичная научная конференция, 2015, Т.1 / Отв. ред. Ю.М. Батулин. – М.: ИИЕТ РАН, 2015. – С. 434–439.
- [12] Kryuchkov, B.I., Usov, V.M., Chertopolokhov, V.A., Ronzhin, A.L., and Karpov A.A. Simulation of the «cosmonaut-robot» system interaction on the lunar surface based on methods of machine vision and computer graphics // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W4 (2nd International ISPRS Workshop on PSBB, 15–17 May 2017). – 2017. – pp. 129–133. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W4-129-2017.

- [13] Технические рекомендации по созданию виртуальных музеев. М.: Министерство культуры РФ, 2014. <https://www.mkrf.ru/documents/po-sozdaniyu-virtualnykh-muzeev-250714/>
- [14] Алтунин А.А., Верба Д.И., Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С., Онуфриенко Ю.И. / Некоторые вопросы совершенствования внекорабельной деятельности / Пилотируемые полеты в космос, № 2 (27), 2018. – С. 64–80.
- [15] Афанасьев В.О., Байгозин Д.А., Батулин Ю.М. и др. / Системы визуализации и виртуального окружения в задачах исследования космоса: настоящее и будущее. В кн. «Космонавтика XXI века». – М: Издательство «РТСофт», 2010. – С. 185–256.
- [16] Крючков Б.И. Техническое обслуживание и ремонт в космосе. НИИ ЦПК, 2010. – 257 с.
- [17] <https://www.ferra.ru/ru/digiphoto/review/how-to-shoot-in-the-space/>
- [18] <https://www.geocam.ru/online/iss/>
- [19] Шукшунов В.Е., Шукшунов И.В., Фоменко В.В., Крючков Б.И. и др. Учебный тренажерно-моделирующий комплекс для подготовки экипажей космонавтов к проведению научных исследований на борту МКС / Патент на изобретение/.RU 2617 433 С2/ МПК G09В 9/52. Дата публикации заявки 15.03.2017 Бюл. № 8.
- [20] <http://www.geometer-center.ru/kontakty;>  
[http://leica.geometer-center.ru/catalog/HDS\\_Systems/p20#tabs-1](http://leica.geometer-center.ru/catalog/HDS_Systems/p20#tabs-1)
- [21] Луманн Т., Робсон С., Кайл С., Бом Я. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение. Пер. с англ. URSS. 2018. – 704 с.
- [22] РС МКС. Справочник пользователя. РКК «Энергия» имени С.П.Королева. 191 с.  
<http://knts.tsnimash.ru>
- [23] <http://eea.spaceflight.esa.int/portal/exp/?id=9150>

## REFERENCES

- [1] Leonov A.V. Virtual 3D Modeling in the History of Science and Technology. Doctoral Dissertation, IHSTS RAS Publ. – 2018. – 319 p.
- [2] Serdechnov A. How the 3D Film about the ISS Was Created. Populyarnaya Mekhanika, April 2014.
- [3] Sabbatini M., Visentin G, Collon M., Ranebo H., Sunderland D., Fortezza R. Stereo Cameras on the International Space Station. SPIE 64901P, San Jose, California, USA, ISSN 0277-786X, 2007. – 2018. – 1–6 p.
- [4] <http://spacegid.com/pryamaya-onlayn-translyatsiya-s-mks.html#i>
- [5] <https://sketchfab.com/models/bd6ac084ae5645848a67597b17665579?ref=related>
- [6] <https://sketchfab.com/models/6dfff011b8df4b0891366aab8b6b0349?ref=related>
- [7] Borodkin L.I., Zheryatyev D.I. 3D Modeling in Historical Research: from Visualization to Analytics // Istoricheskaya Informatika. – 2012. – No 2. – pp. 49–63.
- [8] Leonov A.V. Application of 3D Technologies in the History of Science and Technology. 3D-model as a Historical and Technical Source. Coll.: Interdisciplinary Methods in the History of Science and Technology: Proceedings of Scientific Conference, Moscow, May 27, 2015. / Executive Editor Yu.M. Baturin. - Moscow: IHSTS RAS Publ., 2015. – pp. 42–45.
- [9] Mikhailyuk M.V., Torgashev M.A. Modeling and Distributed Real-Time Stereo Visualization of the ISS // The XVIII Annual Scientific Conference Dedicated to the 80th Anniversary of the IHSTS RAS: Moscow, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Science, April 17–19, 2012: Proceedings of the Conference, Vol. II. – Moscow: Yanus-K, 2012. – pp. 859–860.

- [10] Rys I.V., Leonov A.V. Methods of Virtual Reconstruction of Technical Monuments: World Experience. Coll.: S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology. Annual Scientific Conference (2016) / Executive Editor R.V. Artyomenko. – Moscow: IHSTS RAS Publ., 2016. – pp. 720–721.
- [11] Rys I.V., Kartashev M.O., Leonov A.V. Virtual Reconstruction of Electric Vehicle Columbia (1901): 3D-modeling Technique and First Results. Coll.: S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology. Annual Scientific Conference, 2015, Vol.1 / Executive Editor Yu.M. Baturin. – Moscow: IHSTS RAS Publ., 2015. – pp. 434–439.
- [12] Kryuchkov, B.I., Usov, V.M., Chertopolokhov, V.A., Ronzhin, A.L., and Karpov A.A. Simulation of the «Cosmonaut-Robot» System Interaction on the Lunar Surface Based on Methods of Machine Vision and Computer Graphics // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W4 (2nd International ISPRS Workshop on PSBB, 15–17 May 2017). – 2017. – pp. 129–133. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W4-129-2017.
- [13] Technical Recommendations for Creation of Virtual Museums. Moscow: The Ministry of Culture of the Russian Federation, 2014. <https://www.mkrf.ru/documents/po-sozdaniyu-virtualnykh-muzeev-250714/>
- [14] Altunin A.A., Verba D.I., Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korenna V.S., Onufrienko Yu.I. / Some Issues of Improving Extravehicular Activity of Cosmonauts // Manned Space Flight, No 2(27), 2018. – pp. 64–80.
- [15] Afanasyev V.O., Baigozin D.A., Baturin Yu.M., and others / Visualization and Virtual Environment Systems in Space Exploration: the Present and the Future. Book. “Cosmonautics of the XXI century”. – Moscow: “RTSoft” Publ. 2010. – pp. 185–256.
- [16] Kryuchkov B.I. Maintenance and Repair in Space. GCTC Publ., 2010. – 257 p.
- [17] <https://www.ferra.ru/ru/digiphotoreview/how-to-shoot-in-the-space/>
- [18] <https://www.geocam.ru/online/iss/>
- [19] Shukshunov V.E., Shukshunov I.V. Fomenko V.V., Kryuchkov B.I. and others. Educational Simulator Complex for Training Cosmonauts to Carry out Scientific Studies aboard the ISS / Patents of Invention/.RU 2617 433 C2/ МПК G09B 9/52. Issue Date of the Application: 15.03.2017 Bulletin № 8.
- [20] <http://www.geometer-center.ru/kontakty;>  
[http://leica.geometer-center.ru/catalog/HDS\\_Systems/p20#tabs-1](http://leica.geometer-center.ru/catalog/HDS_Systems/p20#tabs-1)
- [21] Luhmann Thomas, Robson Stuart, Kyle Stephen, Boehm, Jan. Close-Range Photogrammetry and 3D-Imaging. Translation from Engl. URSS. 2018. – 704 p.
- [22] ISS RS. User’s Reference. 191 p. <http://knts.tsniimash.ru>
- [23] <http://eea.spaceflight.esa.int/portal/exp/?id=9150>

# ИСТОРИЯ. СОБЫТИЯ. ЛЮДИ

## HISTORY. EVENTS. PEOPLE

УДК 629.78

### ГИРД – КАК ИСТОРИЧЕСКОЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ НАЧАЛО ОТЕЧЕСТВЕННОГО РАКЕТОСТРОЕНИЯ

А.П. Александров

Летчик-космонавт СССР, канд. техн. наук А.П. Александров  
(ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва)

В статье на фоне развития мировой космонавтики дается историческая ретроспектива первых работ, связанных с развитием ракетостроения в СССР. Кратко оценивается вклад отечественных специалистов, положивших начало работам по ракетной технике в московской группе по изучению реактивного движения (ГИРД). Рассматриваются вопросы организации пионерских работ в ГИРД. Обращается внимание на необходимость сохранения научного наследия ГИРД.

**Ключевые слова:** ракеты, ракетостроение, реактивные двигатели, космонавтика, культурное наследие.

#### **Group on Propulsion Research (GPR) – as a Historical Scientific and Practical Initial Point of National Rocketry. A.P. Aleksandrov**

The paper on the background of world cosmonautics evolution gives a historical retrospective of first works related to development of rocketry in the USSR. It evaluates briefly the contribution to science made by national specialists who started working on rocket technology in GPR, Moscow. It describes issues of organization of pioneer works in GPR, and draws attention to the necessity for preserving its scientific heritage.

**Keywords:** rockets, rocketry, propulsion, cosmonautics, cultural heritage.

«Борьба за приоритет полета ракеты с человеком уже началась и мы, советские ученые и инженеры, не имеем морального права медлить».

Из письма тов. Сталину  
М.К. Тихонравова и Н.Г. Чернышева  
по проекту ВР-190. 21 мая 1946 года.

Московская группа изучения реактивного движения была организована в августе 1931 года. Решению о ее организации предшествовала деятельность Ф.А. Цандера и С.П. Королёва, направленная на создание ракетоплана с реактивным двигателем на жидком топливе ОР-2 конструкции Ф.А. Цандера (рис. 1, 2).



Рис. 1. Ф.А. Цандер (1887–1933 гг.)



Рис. 2. С.П. Королёв (1907–1966 гг.)

Фридрих Артурович Цандер был горячим энтузиастом межпланетных перелетов, чему посвятил множество теоретических работ (1924–1929 гг.) по расчетам баллистических схем полетов к другим планетам, практическому конструированию жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) и летательных аппаратов с ЖРД (1929–1933 гг.).

Группа ГИРД развернула большую пропагандистскую работу, получая всестороннюю поддержку такой мощной организации, как Осоавиахим (Общество содействия авиации и химической защиты).

Осоавиахим был не только пропагандистской организацией, перед ним ставились конкретные задачи подъема отстающих отраслей хозяйства страны и развития новых отраслей промышленности.

О значении, которое придавалось Осоавиахиму, говорит уже то, что в состав избранного в январе 1927 года его Центрального совета (ЦС) вошли видные партийные, государственные и военные деятели – П.И. Баранов, А.С. Бубнов, К.Е. Ворошилов, С.С. Каменев, В.В. Куйбышев, М.Н. Тухачевский, И.С. Уншлихт, В.Я. Чубарь, Р.П. Эйдемман и др. В первые годы деятельности организации председателем, а позднее почетным председателем ЦС Осоавиахима являлся председатель СНК СССР [5].

Агитационно-пропагандистская деятельность ГИРД вызвала широкий отклик в стране. Во многих городах при местных организациях Осоавиахима создавались соответствующие группы, секции и общества. Перечень их был представлен в газете «Техника» за 9 сентября 1932 года [3].

Создание ГИРД как организации, начавшей практическую работу по строительству ракетной техники, было обусловлено ходом развития научно-технического прогресса в нашей стране и сопровождалось рядом благоприят-

ных факторов. Тем не менее «ГИРДовцам» пришлось приложить героические усилия, чтобы выполнить свою историческую миссию первоизобретателей советских жидкостных ракет [4].

Для оценки исторического значения деятельности коллектива московской группы изучения реактивного движения следует обратиться к мировому опыту разработки этой темы в 20–30-е годы прошлого столетия.

В сентябре 1967 года в Белграде состоялся Первый международный симпозиум по истории astronautики и ракетной техники, в работе которого приняли участие свыше 50 ученых из разных стран мира.

С докладами выступали не ученые-историки науки, а непосредственно сами пионеры ракетной техники, сыгравшие большую роль в развитии этой области техники еще до второй мировой войны: Ю.А. Победоносцев, А.И. Полярный, М.К. Тихонравов, Е.С. Щетинков (СССР), Л. Крокко, Ф.Дж. Малина, Г.Э. Пендрей, Р.К. Труэкс, Э.А. Штейнхоф (США), О. Лутц, Г. Оберт (ФРГ), Х.Е. Росс (Англия), Л. Дамблан (Франция) [4].

В одиночку или малыми группами энтузиасты с инженерным образованием или без такового под впечатлением идеи полета на Луну, описанной знаменитым Жюлем Верном, проводили теоретические расчеты полетов в межпланетном пространстве, строили ракетные двигатели собственной конструкции и в единичных случаях доводили конструкции до осуществления полетов ракет.

Идеи известных теоретиков astronautики К.Э. Циолковского и Г. Оберта овладевали умами молодых изобретателей. Так, в Италии исследования и постройка ракетных двигателей на твердом топливе для ракет военного назначения были начаты генералом Г.А. Крокко в 1927 году. Исследовались составы топлива и экспериментальные ракетные двигатели на двухкомпонентном и унитарном топливе. К 1939 году был накоплен значительный опыт по использованию различных зарядов в двигательных установках [4].

Французский практический опыт основывался на исследованиях Л. Дамблана, которые он проводил по собственной инициативе, без помощи квалифицированных специалистов, занимаясь проектированием, изготовлением и проведением лабораторных экспериментов на стационарных стендах. Было проведено большое количество летных испытаний самодвижущихся ракет его конструкции.

Практические работы проводились с 1935 года по 1939 год. Двухступенчатая ракета на твердом топливе конструкции Л. Дамблана в октябре 1939 года достигла высоты полета 2150 м с массой заряда осветительной шашки 500 грамм. Ракета была принята к серийному производству [4].

Герман Оберт в 1923 году издал монографию «Ракета в межпланетном пространстве». Г. Оберт – один из теоретиков и пионеров ракетной техники и astronautики. В 1930 году он испытал ЖРД со щелевым соплом на жидком кислороде и керосине с тягой около 7 кгс. Проводил экспериментальные работы в области ракетной техники в Вене, затем в Дрездене. С 1941 года

по 1943 год работал в исследовательском центре Пенемюнде в Германии. После окончания Второй мировой войны проводил частные исследования, а в 1955–1958 гг. вместе с другими немецкими учеными и инженерами работал над ракетной программой «Редстоун» в Хантсвилле (США) [4].

В Соединенных Штатах Америки наиболее успешными были результаты работы как ученых-одиночек, таких как доктор Р.Х. Годдард, так и малых коллективов энтузиастов изучения реактивного движения.

Доктор Р.Х. Годдард, американский пионер ракетостроения и разработки теории космических полетов, опубликовал главную свою работу «Метод достижения экстремальных высот» в 1920 году.

С 1926 года он успешно проводил запуски ракет на кислородно-бензиновом топливе (первый успешный запуск был произведен 16 марта 1926 года), однако другие изобретатели в то время об этом ничего не знали до тех пор, пока в 1936 году не появился доклад Годдарда «Развитие ракет на жидком топливе».

Коллектив, получивший наименование Первоначальной группы ракетных исследований при Калифорнийском техническом институте, возглавлял молодой инженер Ф.Дж. Малина.

Группа из 6 человек начала активную работу под руководством известного ученого Т. фон Кармана, и к 1937 году были испытаны первые образцы ЖРД.

Первый выпуск «Бюллетеня Американского межпланетного общества», впоследствии более известного как «Американское ракетное общество» (ARS), вышел в свет в июне 1930 года.

Сообщалось о прогнозе Р. Эсно-Пельтри, французского изобретателя, о том, «что путешествие к Луне может осуществиться в ближайшие 15 лет»; также о составлении обществом обзора обширной информации, касающейся межпланетных путешествий.

Однако вскоре стало ясно, что существует большой разрыв между современными идеями, технической литературой по ракетам и практически задачами создания ракет как летательных аппаратов для исследования космического пространства.

Созданный энтузиастами Экспериментальный комитет на основе опыта, полученного в Германии, в 1931 году приступил к реализации проектов ракет с ЖРД (авторы проектов были члены общества Х.Р. Пиэрс и Г.Э. Пендрей).

Первое неудачное испытание ракеты ARS-1 массой 6,8 кгс с кислородно-бензиновым ЖРД тягой 27,2 кгс состоялось 12 ноября 1932 года. Вторая ARS-2 была запущена 14 мая 1933 года на полигоне поблизости от Нью-Йорка. Ракета за 2 секунды полета достигла высоты 76 м, после чего разрушилась от взрыва кислородного бака.

Как техническое общество, особенно после 1944 года, ARS насчитывало 20 тысяч членов. В 1963 году ARS слилось с Институтом авиационных наук и образовался Американский институт аэронавтики и астронавтики (AIAA) [4].

Британское межпланетное общество (BIS) было основано инженером Ф.Е. Клитором в октябре 1933 года в городе Ливерпуле. Общество издавало



свой журнал и бюллетень, в которых публиковались лекции и статьи для стимулирования интереса к астронавтике.

Общество приобрело международный характер, привлекая к его работе известных ученых: Р. Эсно-Пельтри (Франция), Г.Э. Пендрея (США), Г. Пирке (Австрия), Вилле Лея, фон Цеппелина (Германия), Я.И. Перельмана, Н.А. Рынина (СССР).

Основной работой, предпринятой Техническим комитетом общества, было создание пилотируемого космического корабля для полета на Луну с возвращением на Землю.

Энтузиасты проекта разрабатывали конструкцию корабля, силовую установку, систему управления полетом, программирующие и оптические устройства, скафандры и другие системы и агрегаты обеспечения жизнедеятельности и работы экипажа. Подробно рассматривались проблемы строительства ракетодрома и технологии запуска лунной ракеты.

Вторая мировая война прервала разработку проекта [4].

Тем временем в СССР в начале 1932 года московское отделение ГИРД получило название Центрального – ЦГИРД, и ему было поручено руководство всеми остальными группами. ЦГИРД были организованы первые в мировой истории курсы по ракетной технике, сыгравшие определенную роль в деле подготовки кадров ракетчиков в нашей стране [4].

«ГИРДовцами» были получены первые практические результаты проведенных исследований на базах ЦАГИ, Института авиационного моторостроения (ИАМ), Московского авиационного института по разработке и испытаниям конструкций планера РП-1, аэроплана АНТИ-3 и первого ракетного двигателя ОР-1 [4].

В Ленинграде созданная Н.И. Тихомировым в 1928 году газодинамическая лаборатория (ГДЛ) работала над созданием ракет на бездымном порохе, твердотопливных авиационных ускорителей и реактивных снарядов военного назначения.

С 1929 года в ГДЛ под руководством В.П. Глушко были начаты исследования и разработка электрических и жидкостных ракетных двигателей. В 1930–1931 гг. были построены и испытаны первые ЖРД ОРМ-1 и ОРМ-2 (опытные ракетные моторы) с тягой 20 кгс, а в 1933 году прошли испытания ОРМ-50 и ОРМ-52 с тягой 50 кгс и 300 кгс.

3 марта 1932 года было проведено совещание под председательством М.Н. Тухачевского с участием начальников управлений РККА, руководителей ГИРД и ГДЛ, на котором был заслушан доклад С.П. Королёва о перспективах развития работ по экспериментальному строительству ракетных двигателей, ракет и крылатых летательных аппаратов с ракетными двигателями. Его результатом стал подписанный 25 апреля 1932 года председателем ЦС Осоавиахим Р.П. Эйдеманом приказ о создании опытного завода «ЦГИРД». Этим же приказом С.П. Королёв назначается начальником и председателем технического совета ГИРД [6]. «ГИРДовцы» начали восстанавливать помеще-

ние (если так можно назвать сырой подвал), которое Осоавиахим арендовал для организации по адресу: угол Садово-Спасской улицы и Орликова переулка, дом № 19, строение 2. Площадь помещения составляла 650 кв. метров. В этом помещении размещались конструкторские бригады и производственные мастерские, поначалу там же проводили огневые испытания двигателей.

Сбылась мечта С.П. Королёва: он работал на предприятии, целью которого было осуществление ракетного полета. Если ЦГИРД имела в основном просветительские функции, то ГИРД как научно-производственная организация предназначалась для проведения экспериментальных работ по созданию ракет и двигателей [1].

Конструкторских бригад было четыре. Первую бригаду возглавлял Ф.А. Цандер. Бригаде была поручена разработка проектов двигателей и ракет с использованием элементов конструкций в качестве ракетного топлива (идея Цандера), в частности:

– двигатель ОР-2 для его установки на планер БИЧ-ХІ конструкции Б.И. Черановского и ракетоплан С.П. Королёва РП-1;

– ракета с использованием металлического топлива.

Вторая бригада под руководством М.К. Тихонравова разрабатывала темы:

03 – двигатель с насосной подачей компонентов, предназначенный для ракетоплана;

05 – ракета под азотно-кислотный двигатель ОРМ-50 конструкции ГДЛ;

07 – ракета с двигателем на жидком кислороде и керосине;

09 – ракета с использованием топлива смешанного агрегатного состояния, основную часть которого составлял жидкий кислород.

Двигатель ракеты «09» представлял собой камеру из листовой латуни с бронзовой головкой и бронзовым гнездом для сопла. Сопло было изготовлено из стали. Подача жидкого кислорода осуществлялась давлением его же паров. Сгущенный бензин представлял собой раствор бензина в канифоли и помещался непосредственно в камере сгорания между особой цилиндрической металлической сеткой и стенками камеры.

Первый успешный испытательный пуск ракеты состоялся на полигоне Нахабино 17 августа 1933 года. Ракета «09» достигала высоты полета около 400 метров. Второй пуск ракеты состоялся поздней осенью того же года.

Сборке и испытаниям ракеты «09» предшествовали многократно проведенные эксперименты с жидким кислородом и сгущенным бензином, а в мае 1933 года на испытательном полигоне проводились огневые испытания двигателя ракеты.

#### Технические характеристики ракеты (изделия «09»)

Стартовая масса ракеты, кг	18
Масса топлива, кг	4,5
Длина, м	2,4
Тяга двигателя, кгс	37
Давление в камере сгорания, кгс/см <sup>2</sup>	5–6
Продолжительность полета, с	18



Рис. 3. Ракета «09»  
на земле. Нахабино.  
1933 г.

Третья бригада под руководством Ю.А. Победоносцева работала по проблемам создания воздушно-реактивных двигателей и газодинамических установок.

Четвертую бригаду возглавлял С.П. Королёв, одновременно осуществляя руководство организацией. Бригада работала над конструкциями крылатых ракет с ЖРД различного назначения, в том числе ракетоплана РП-1.

Совместными усилиями 1-й и 2-й бригад, после доведения испытаний двигателя Ф.А. Цандера ОР-2 до успешного завершения, на полигоне в Нахабино 25 ноября 1933 года были проведены испытания первой советской жидкостной ракеты ГИРД-Х (рис. 3, 4). Ракета взлетела на высоту около 80 метров, затем, вследствие разрушения крепления двигателя и трубопровода горючего, отклонилась от вертикали и упала на расстоянии около 150 м от места старта.

Конструкция ракеты ГИРД-Х получила развитие в более совершенных ее модификациях, созданных в 1935–1937 годах [2]. Научно-производственная деятельность МосГИРД осуществлялась по договорам, которые заключались между ЦС Осоавиахима и исполнителями работ от ГИРД.

В итоге двухлетней работы МосГИРД приказом Реввоенсовета № 0113 от 21 сентября 1933 года за подписью заместителя народного комиссара по военным и морским делам председателя РВС СССР М.Н. Тухачевского на базе Ленинградской ГДЛ и МосГИРД организован первый в мире Реактивный



Рис. 4. Перед стартом ракеты «ГИРД-Х». Нахабино. 1933 г.

## Технические характеристики ракеты ГИРД-Х

Длина ракеты, м	2,2
Стартовая масса, кг	29,5
Масса топлива, кг	8,3
Тяга двигателя, кгс	70
Подача топлива	Вытеснительная
Давление в камере сгорания, кгс/см <sup>2</sup>	8–10
Удельный импульс, с	162–175
Компоненты топлива	78%-й этиловый спирт – жидкий кислород

научно-исследовательский институт – РНИИ. Временный штат РНИИ был утвержден в составе 281 человека, из которых 73 были сотрудники МосГИРД.

Характерной чертой всего, что изучали и строили «ГИРДовцы», было направлено на достижение в будущем возможности полета человека в заатмосферное пространство.

Основной и первоначальной задачей ГИРД было доказать на опыте пригодность реактивного принципа движения при современном состоянии техники. Всего за 2 года деятельности ГИРД это было сделано достаточно убедительно, на высоком научно-техническом уровне и в удивительно короткий срок [4].

Результаты расчетов и практической деятельности ГИРД позволили близко подойти к решению проблемы создания ракеты дальнего действия.

Начало прорыва в космос в Советском Союзе – это создание первой МБР Р7, первого спутника Земли, полет первого человека в космос. А совершали все это те же люди, которые начинали свою деятельность в подвале ГИРД на Садово-Спасской, 19: С.П. Королёв, М.К. Тихонравов, Ю.А. Победоносцев,



Рис. 5. Встреча С.П. Королёва с «ГИРДовцами» в ОКБ-1 в день 60-летия М.К. Тихонравова (1962 г.)

В.Н. Галковский, В.А. Андреев, Н.И. Ефремов, Л.С. Душкин, А.В. Палло, И.А. Меркулов, Е.К. Мошкин, М.К. Полярный, Л.К. Корнеев и многие другие талантливые инженеры и ученые, работавшие в ГДЛ и РНИИ (рис. 5).

## **Проблемные вопросы сохранения культурного наследия ГИРД**

### *Помещение ГИРД*

В настоящее время жилое здание 1910 года постройки по адресу: Садово-Спаская улица, дом 19, строение 2, в котором в 1931–1933 годах располагалась ГИРД, является объектом культурного наследия регионального значения. Департамент капитального ремонта г. Москвы закончил ремонтно-восстановительные работы указанного здания. Здание планируется использовать под городской маневренный фонд.

Департамент городского имущества г. Москвы считает невозможным рассмотрение вопроса о передаче части подвальных помещений для размещения музейной экспозиции (ответ Департамента культуры г. Москвы на письмо Фонда ... от 25 апреля 2016 г.). В подвальном помещении в 2017 году Мосимущество разместило частное предприятие по производству пиццы.

С целью сохранения подвального помещения строения 2 дома № 19 по Садово-Спаской улице в первоизданном виде, после завершения реставрационных работ в 2016 году было направлено обращение к мэру г. Москвы С.С. Собянину о переводе здания из категории объекта культурного наследия регионального значения в единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации.

Обращение было принято, но реакции не последовало.

### *Полигон «Нахабино»*

Место запусков первых отечественных жидкостных ракет «09» и ГИРД-Х в 1933 году находится на территории Военно-инженерного испытательного полигона (Николо-Урюпино) в городском поселении Нахабино Красногорского района Московской области. Земли Военно-инженерного полигона находятся в ведении МО РФ. Земельный участок, на котором располагается историческое место старта ракет ГИРД, не внесен в кадастровый план и не имеет собственного кадастрового номера.

На месте расположения макета пускового устройства и остатков блиндажа в 1966 году комсомольцы средней школы № 2 поселка Нахабино установили памятный гранитный обелиск.

Министерство культуры РФ в своем ответе на запрос «...готово рассмотреть вопрос о включении в реестр место запуска жидкостной ракеты «09», расположенного в поселке Нахабино Московской области, в качестве объекта культурного наследия – достопримечательного места федерального значения, а также готово оказать научно-методическую помощь при проведении указанной экспертизы».

С целью сохранения исторического полигона запуска ракет ГИРД требуется:

1. Вывести земельный участок полигона запуска ракет из состава принадлежащих МО РФ земель с присвоением ему кадастрового номера.

2. Выполнить соответствующие работы для принятия Министерством культуры РФ решения о включении объекта «Полигон ГИРД» в реестр в качестве объекта культурного наследия федерального значения. В противном случае Полигон ГИРД будет утерян для отечественной истории навсегда.

## Выводы

1. Роль ГИРД в истории отечественной космонавтики можно считать исключительно важной. В 1933 г. в ГИРД была запущена первая в СССР жидкостная ракета ГИРД-09. В том же году, находясь в составе РНИИ, «ГИРДовцы» выполнили запуск ракеты с кислородно-спиртовым ЖРД. Работа «ГИРДовцев» стала прологом достижений нашей страны в области военного строительства и пилотируемого космоса.

2. Исключительная роль ГИРД в развитии космонавтики проявилась не только в создании первых ракет, но и в том, что и в последующие 5 лет все отечественные бескрылые и крылатые ракеты, совершившие более 20 успешных полетов, и все гибридные и жидкостные ракетные двигатели для них были созданы «ГИРДовцами», работавшими в РНИИ и КБ-7.

3. Необходимы дополнительные усилия научной общественности, направленные на сохранение объектов культурного наследия, связанных с историей ГИРД.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Королёва Н.С. Отец. – Кн. 1. – М.: Наука, 2001.
- [2] Глушко В.П. Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР. – М.: Машиностроение, 1987.
- [3] Штурм стратосферы: подборка материалов // Техника. – 1932 от 9 сентября.
- [4] Из истории астронавтики и ракетной техники. Материалы XVIII Международного конгресса. Белград, 25–29 сентября 1967 г. – М.: Наука, 1970.
- [5] ЦГАОР СССР. Ф. 8355, оп..д, 4 (Цит. По(23)).
- [6] Голованов Я.К. Королёв: факты и мифы. – Т. 1. – «Русские витязи», 2007.

## REFERENCES

- [1] Korolyova N.S. My Father. – Book 1. – Moscow: Nauka Publ., 2001.
- [2] Glushko V.P. Development of Rocketry and Cosmonautics in the USSR. – Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987.
- [3] Stratospheric Storm: Collection of Articles // Tekhnika Publ. – September 9, 1932.
- [4] History of Astronautics and Rocket Technology. Proceedings of the XVIII International Congress. Belgrade, September 25–29, 1967. – Moscow: Nauka Publ., 1970.
- [5] TsGAOR the USSR. F. 8355, inventory 4 (Quot. Po(23)).
- [6] Golovanov Ya.K. Korolyov: Facts and Myths. – Vol. 1. – Russkiye Vityazi Publ., 2007.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ПИЛОТИРУЕМЫЕ  
ПОЛЕТЫ В КОСМОС**  
(научный журнал)

Выпускающий редактор *Л.К. Васильева*

Редактор *С.Г. Токарева*

Технический редактор *Е.Н. Бондарева*

Корректор *Т.И. Лысенко*

Перевод *С.Б. Беляковская, С.А. Дедова*

Подписано в печать 04.09.18.

Формат 70x108/16. Бумага ксероксная.

Усл. печ. л. 11,20. Тираж 120 экз. Зак. 416-18.

Отпечатано в редакционно-издательском отделе  
ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»