

ПИЛОТИРУЕМЫЕ ПОЛЕТЫ В КОСМОС
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 2(27)/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:

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

РЕДАКЦИОННО-ЭКСПЕРТНАЯ ГРУППА:

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

MANNED SPACEFLIGHT
SCIENTIFIC JOURNAL No 2(27)/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:

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

EDITORIAL-EXPERT GROUP:

Kharlamov M.M.,	Head of the Editorial-Expert Group
Bondareva E.N.,	Technical editor
Vasilieva L.K.,	Executive editor
Volkova N.V.,	Editor
Gordienko O.S.,	Distributor
Dmitriev V.N.,	Candidate of Military Sciences
Dolgov P.P.,	Candidate of Technical Sciences
Ignatiev S.V.,	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Kalmin A.V.,	Executive secretary
Kaspranskiy R.R.,	PhD of Medical Science
Oreshkin G.D.,	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Saev V.N.,	DScTech, Associate Professor
Titova M.L.,	Editor
Tyurin M.V.,	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-52/53 при выполнении программы космического полета. <i>С.Н. Рязанский, А.А. Курицын, А.И. Кондрат, В.А. Копнин, Д.Е. Рыбкин, Е.И. Корзун</i>	5
Медицинские аспекты обеспечения безопасности полета экипажа МКС-52/53 (экспресс-анализ). <i>В.В. Богомолов, В.И. Почуев, И.В. Алферова, Е.Г. Хорошева, В.В. Криволапов</i>	20
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС	35
Подготовка космонавтов к действиям в аварийных ситуациях на космической станции. <i>С.В. Бронников, А.Е. Маликов, И.А. Рожкова</i>	35
Об одном подходе к решению задачи спуска космического аппарата в атмосфере Земли. <i>М.А. Джабаров, Н.Е. Зубов</i>	46
Некоторые вопросы совершенствования внекорабельной деятельности космонавтов. <i>А.А. Алтунин, Д.И. Верба, П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов, В.С. Коренной, Ю.И. Онуфриенко</i>	64
Обоснование возможности использования кисломолочного пробиотического продукта для снижения медицинских рисков полетов в дальний космос. <i>А.И. Кобатов</i>	81
ИСТОРИЯ. СОБЫТИЯ. ЛЮДИ	99
Человеческий фактор в авиации и космонавтике. <i>Т.Б. Нестерович, А.А. Меденков, Н.М. Козлова</i>	99
НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ	115
Совместный эксперимент Европейского космического агентства и Роскосмоса «Плазменный кристалл-4» на Международной космической станции. <i>В.Е. Фортвов, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев, А.В. Зобнин, В.И. Молотков, М.Ю. Пустыльник, Х.М. Томас, М.Х. Тома, Е.О. Серова, А.М. Самокутяев, Г.И. Падалка, О.Д. Кононенко, А.Н. Овчинин, А.А. Иванишин, О.В. Новицкий, С. Кристофоретти</i>	115
База данных «Деятельность экипажей РС МКС по обслуживанию доставляемых, возвращаемых и удаляемых грузов». <i>Б.И. Крючков, В.И. Ярополов, В.И. Горлова</i>	133

CONTENTS

RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS	5
Main Results of the ISS-52/53 of Expedition Training and Activity When Carrying out the Mission Plan. <i>S.N. Ryazanskiy, A.A. Kuritsyn, A.I. Kondrat, V.A. Kopnin, D.E. Rybkin, E.I. Korzun</i>	5
Medical Support of the ISS-52/53 Crew Members (Express Analysis). <i>V.V. Bogomolov, V.I. Pochuev, I.V. Alferova, E.G. Khorosheva, V.V. Krivolapov</i>	20
THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS	35
Cosmonaut Training for Emergency Situations Aboard the Space Station. <i>S.V. Bronnikov, A.Ye. Malikov, I.A. Rozhkova</i>	35
On One Approach to the Solution of the Spacecraft Descent Problem in the Earth's Atmosphere. <i>M.A. Dzhabarov, N.E. Zubov</i>	46
Some Issues of Improving Extravehicular Activity of Cosmonauts. <i>A.A. Altunin, D.I. Verba, P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov, V.S. Korennoy, Yu.I. Onufrienko</i>	64
Reasoning of the Possibility to Use a Fermented Milk Probiotic Product for Mitigating Health Risks During Long-Term Space Missions. <i>A.I. Kobatov</i>	81
HISTORY. EVENTS. PEOPLE	99
Human Factors in Aviation and Space Exploration. <i>T.B. Nesterovich, A.A. Medenkov, N.M. Kozlova</i>	99
SCIENTIFIC-INFORMATION SECTION	115
The Joint ESA-Roscosmos "Plasma Cristall-4" Experiment On-Board the International Space Station. <i>V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev, A.V. Zobnin, V.I. Molotkov, M.Yu. Pustyl'nik, H.M. Thomas, M.H. Thoma, E.O. Serova, A.M. Samokutyayev, G.I. Padalka, O.D. Kononenko, A.N. Ovchinin, A.A. Ivanishin, O.V. Novitsky, S. Cristoforetti</i>	115
The Database "Activities of the ISS RS's Crews for the Maintenance of Delivered, Return and Disposable Cargo". <i>B.I. Kryuchkov, V.I. Yaropolov, V.I. Gorlova</i>	133

ИТОГИ ПОЛЕТОВ ЭКИПАЖЕЙ МКС

RESULTS OF THE ISS CREW MISSIONS

УДК 629.78.007

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОДГОТОВКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА МКС-52/53 ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПРОГРАММЫ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

С.Н. Рязанский, А.А. Курицын, А.И. Кондрат, В.А. Копнин,
Д.Е. Рыбкин, Е.И. Корзун

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ, канд. биол. наук
С.Н. Рязанский; 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-52/53 на борту
транспортного пилотируемого корабля (ТПК) «Союз МС-05» и Междуна-
родной космической станции (МКС). Представлены основные задачи эки-
пажа при выполнении научной программы. Дан обзор задач, решаемых при
выполнении ВКД.

Ключевые слова: задачи подготовки экипажа, космический полет, Меж-
дународная космическая станция, научно-прикладные исследования и экс-
перименты.

Main Results of the ISS-52/53 of Expedition Training and Activity When Carrying out the Mission Plan. S.N. Ryazanskiy, A.A. Kurit- syn, A.I. Kondrat, V.A. Kopnin, D.E. Rybkin, E.I. Korzun

The paper considers results of the ISS-52/53 crew activity aboard the Soyuz-
МС-05 spacecraft and the ISS. Main tasks of the research program carried out
by a crew are given. The tasks solved when performing extravehicular activity
are reviewed.

Keywords: tasks of crew training, spaceflight, International Space Station, sci-
entific applied research and experiments.

Состав экипажа

Основной экипаж длительной экспедиции МКС-52/53 (рис.1) в составе:

Рязанский Сергей Николаевич командир ТПК «Союз МС-05»
бортинженер МКС-52/53
(Роскосмос, Россия)

Рэндолф Брезник бортинженер-1 ТПК «Союз МС-05»
 бортинженер МКС-52
 командир МКС-53 (НАСА, США)

Паоло Нespoли бортинженер-2 ТПК «Союз МС-05»,
 бортинженер МКС-52/53 (ЕКА, Италия)

выполнил космический полет длительностью 140 суток с 28 июля 2017 года по 14 декабря 2017 года. Позывной экипажа – «Борей».



Рязанский
Сергей Николаевич

Рэндолф Брезник

Паоло Нespoли

Рис. 1. Экипаж ТПК «Союз МС-05»

Рязанский Сергей Николаевич – космонавт Роскосмоса, до назначения в экипаж совершил один космический полет с 25 сентября 2013 года по 11 марта 2014 года в составе экипажа 37/38-й длительной экспедиции на МКС в качестве бортинженера МКС и бортинженера ТПК «Союз ТМА-М». В ходе полета выполнил три выхода в открытый космос общей длительностью 19 часов 55 минут. Продолжительность полета составила 166 суток 06 часов.

Рэндолф Брезник – астронавт НАСА, полковник ВВС США. Первый полет совершил по программе STS-129 (16–29 ноября 2009 года), выполнил два выхода в открытый космос общей продолжительностью 11 часов 50 минут. Полет STS-129 продолжался 10 дней 19 часов и 16 минут.

Паоло Нespoли – астронавт ЕКА (Италия), первый полет совершил с 23 октября по 7 ноября 2007 года в составе экипажа экспедиции STS-120 на МКС в качестве специалиста полета на шаттле «Дискавери». 2-й космический полет выполнил с 15 декабря 2010 года по 24 мая 2011 года в качестве бортинженера ТПК «Союз-ТМА-20» и бортинженера МКС-26/27.

Основные итоги полета

Старт ТПК «Союз МС-05» состоялся 28 июля 2017 года с космодрома Байконур. Состав экипажа (рис. 2):

Рязанский Сергей Николаевич – командир корабля (Роскосмос, Россия);
Рэндолф Брезник – бортинженер-1 (НАСА, США);
Паоло Неспולי – бортинженер-2 (ЕКА, Италия).



Рис. 2. Экипаж МКС-52/53 перед стартом

Программа полета экипажа МКС-52/53 предусматривала выполнение следующих работ:

- доставка экипажа МКС-52/53 на борт МКС, завершившаяся стыковкой 29 июля 2017 года ТПК «Союз МС-05» в автоматическом режиме с МКС к стыковочному узлу модуля МИМ1 ($T_{М.з.} = 00:54:46$ ДМВ). Сближение и стыковка транспортного пилотируемого корабля выполнялись по четырехвитковой схеме;
- научно-прикладные исследования и эксперименты в соответствии с программой НИИ;
- техническое обслуживание бортовых систем, ремонтно-восстановительные работы, дооснащение, проведение телевизионных репортажей, видео- и фотосъемок, работы по программе символической деятельности;

- сближение американского грузового корабля многоразового использования SpaceX-12 «Dragon» с МКС, захват манипулятором станции SSRMS, перемещение и установка корабля на надирном порту модуля Node2 АС МКС. Затяжка болтов проведена 16 августа 2017 года ($T_{\text{ОКОНЧАНИЯ ЗАТЯЖКИ}} = 17:00$ ДМВ);
- ВКД-43 17 августа 2017 года из стыковочного отсека СО1, продолжительность выхода – 7 ч 33 мин. Выход осуществили космонавты Ф. Юрчихин и С. Рязанский;
- испытания новой серии скафандра «Орлан-МКС»;
- расстыковка ТПК «Союз МС-04» от стыковочного узла модуля МИМ2. Расстыковка выполнена 3 сентября 2017 года в 00:58:03 ДМВ, время посадки СА – 04:21:50 ДМВ;
- стыковка ТПК «Союз МС-06» к стыковочному узлу МИМ2 осуществлена 13 сентября 2017 года ($T_{\text{М.З.}} = 05:55:18$ ДМВ). Сближение и стыковка транспортного пилотируемого корабля выполнялись по четыреххватковой схеме;
- расстыковка американского грузового корабля SpaceX-12 «Dragon» от манипулятора SSRMS АС МКС ($T = 11:40$ ДМВ). Сход с орбиты и приводнение в расчетной точке Тихого океана ($T = 17:14$ ДМВ) осуществлены 17 сентября 2017 года;
- стыковка ТГК «Прогресс МС-07» к СО1. Стыковка выполнена 16 октября 2017 года ($T_{\text{М.З.}} = 14:04$ ДМВ). Сближение и стыковка грузового корабля выполнялись 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 АС 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 проведена 6 декабря 2017 года;
- расстыковка ТПК «Союз МС-05» от стыковочного узла модуля МИМ1. Расстыковка выполнена 14 декабря 2017 года в 08:14:30 ДМВ, время посадки СА – 11:37:50 ДМВ.

Основные задачи подготовки экипажа к полету

Подготовка к полету членов экипажа МКС-52/53 проводилась с 2016 года. Программа подготовки была разработана с учетом задач полета, уровня подготовленности и функциональных обязанностей членов экипажа.

Объемы подготовки в России на этапе основного экипажа представлены в таблице 1. Подготовка проводилась поочередными тренировочными сессиями: в России – по российскому сегменту, транспортным пилотируемому и грузовым кораблям, и на базах международных партнеров – по американскому сегменту МКС.

Таблица 1

Объемы подготовки в России (в часах, на этапе основного экипажа)

Разделы подготовки	С. Рязанский	Р. Брезник	П. Неспольи
Подготовка по ТПК «Союз МС»	66,5	62,5	53
Подготовка по РС МКС	72	19	43
Подготовка к ВКД	30	–	–
Подготовка по научной программе	92,3	8	–
Медико-биологическая подготовка	72,3	41,5	41,5
Другие виды подготовки	45	3	14
Всего:	378,1	134	151,5

Основными задачами подготовки по МКС и ТПК «Союз МС-05» являлись:

- формирование у членов экипажа знаний и умений, необходимых для выполнения ими функциональных обязанностей в составе экипажа ТПК «Союз МС-05»;
- 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 ТГК «Прогресс МС» на стыковочные узлы РС МКС в режиме ТОРУ;
- контроль автоматического сближения и стыковки ТГК «Прогресс МС» с МКС;
- подготовка экипажа к приему, передаче смены и совместной работе в полете с экипажами МКС-51/52, МКС-53/54;
- 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 российском сегменте МКС;
- подготовка по задачам внекорабельной деятельности в объеме типовых операций и по программе ВКД-43;
- 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

Результаты экзаменов и экзаменационных комплексных тренировок

Вид экзамена	С. Рязанский	Р. Брезник	П. Неспולי
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»	4,9	–	–
По ТОРУ ТГК «Прогресс МС»	5,0	–	–
По РУС ТПК «Союз МС»	5,0	4,65	–

Полет на борту транспортного пилотируемого корабля «Союз МС-05»

Старт ТПК «Союз МС-05» состоялся 28 июля 2017 года с космодрома Байконур (рис. 3). Выведение, отделение корабля от ракеты-носителя прошло штатно. В процессе предстартовой подготовки, выведения и маневров замечаний к работе бортовых систем не выявлено.

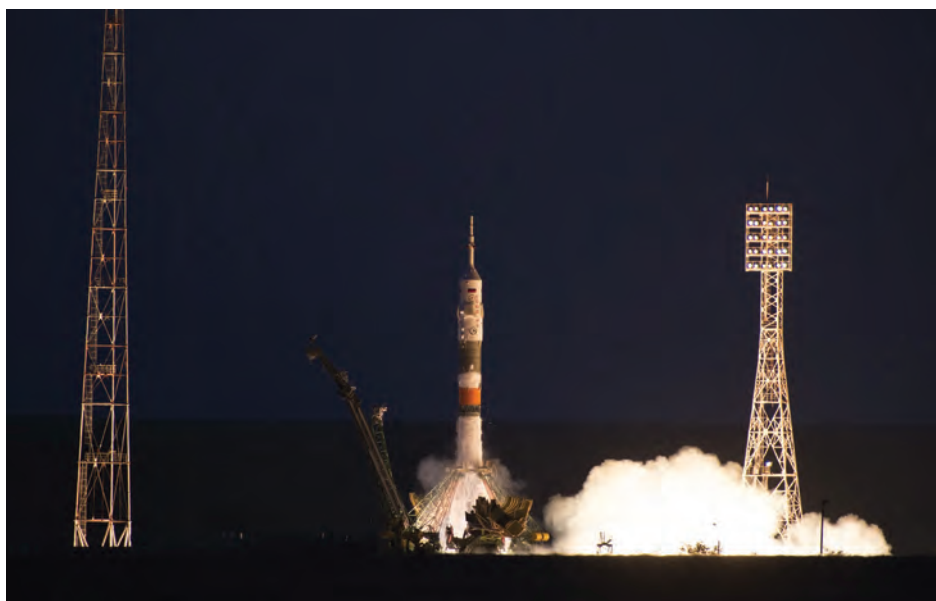


Рис. 3. Запуск ракеты-носителя «Союз-ФГ» с ТПК «Союз МС-05»

Сближение ТПК «Союз МС-05» 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 по расчетам ЦВМ был выполнен на 2-м и 3-м суточных витках.

На 3-м суточном витке началось проведение этапа автономного сближения с МКС, в заключение которого выполнялись автоматический облет, причаливание и стыковка к модулю МИМ1 ($T_{МЗ} = 00:55:10$ ДМВ).

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-05».

24.08.2017 г. и 26.08.2017 г. на ТПК «Союз МС-05» в составе РС МКС на витках 107242 и 107268, соответственно, зафиксировано снятие готовности ЦВМ-101 с переходом в аварийно-диагностический режим. В связи

с этим в период с 24.08.2017 г. по 20.11.2017 г. проводились четыре дополнительных «Теста СУДН № 2». Штатный предпусковой (пятый по счету) «Тест СУДН № 2» проводился 08.12.2017 г. в составе КК и БИ-1.

Завершив программу полета на борту МКС, экипаж начал подготовку к возвращению на Землю. На 11-м суточном витке проведена расконсервация корабля. Переход на автономное питание выполнен экипажем на этом же витке в 04:40:00 ДМВ. По указанию ЦУПа-М на 12-м суточном витке в 05:03:00 ДМВ экипаж выполнил закрытие переходных люков. На этом же витке экипажем была проведена проверка герметичности переходных люков.

Подготовка к расстыковке проводилась по штатной программе полета. На 13-м суточном витке после перехода в СА и закрытия люка СА-БО экипаж приступил к проверке герметичности скафандров и люка СА-БО.

Расстыковка выполнена 14 декабря 2017 года на 14-м суточном витке в автоматическом режиме с одним импульсом увода. МКС была развернута в специальную сертифицированную для расстыковки ориентацию «ОСК + разворот» (–Y по направлению полета, –X по радиус-вектору). Уход ТПК от МИМ1 выполнялся вперед по полету МКС (импульс на разгон). Запуск динамического режима СУДН для режима расстыковки выполнен экипажем в 08:05:00 ДМВ. Команда на открытие крюков ТПК по указанию ЦУПа выдана экипажем в 08:13:00 ДМВ, время фактической расстыковки – 08:14:30 ДМВ.

Спуск выполнялся по штатной программе. Запуск динамического режима СУДН для режима спуска выполнен на 15-м суточном витке в 09:45:00 ДМВ, посадка – на 1-м суточном витке. По указанию ЦУПа в 10:30:00 ДМВ экипаж выдал команду «ЗАПРЕТ ИКВ». Время включения СКД для выдачи тормозного импульса – 10:44:59 ДМВ. Двигатель работал штатно, отработал тормозной импульс 128,0 м/с без замечаний. Разделение отсеков прошло в 11:12:13 ДМВ. Расчетное время входа СА в атмосферу – 11:16:37 ДМВ. Спуск в атмосфере выполнен в режиме АУС. Внеатмосферный промах составил 8 секунд (перелет). Максимальная перегрузка – 4,76 единиц. Специалисты ПСС обнаружили СА на парашюте в расчетном районе, установили связь с экипажем в 11:25 ДМВ.

Посадка спускаемого аппарата осуществлена 14 декабря 2017 года в 11:37:50 ДМВ в расчетной точке с координатами 47°23,591' с.ш., 69°38,516' в.д. вблизи г. Жезказгана. Двигатели мягкой посадки сработали штатно. Работа по эвакуации экипажа закончилась в 11:56 ДМВ после взятия СА под охрану. Аппарат после посадки находился вертикально.

Полет на борту МКС

Экипаж МКС-52/53 работал на борту МКС 139 суток с 29 июля 2017 года по 14 декабря 2017 года. Экипаж на российском сегменте МКС выполнил обширный объем работ по техническому обслуживанию и дооснащению бортовых систем МКС, программу научно-прикладных исследований и экспе-

риментов, 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:

- регламентные работы по обслуживанию клапанов системы «Родник» в СМ;
- тестирование Remote RS1 Laptop КЦП1 и КЦП2 после чистки БРИ;
- диагностика блока сборных шин (БСШ-2) и блока фильтров (БФ-2) системы СЭС ФГБ;
- проведение регламентных тестовых проверок оптических приборов СУДН (ВП-2, ВШТВ, ПУМА);
- сепарация ЕДВ с помощью устройства сепарации (УС);
- наддув атмосферы МКС воздухом из секции СрПК «Прогресс МС-06»;
- регулировка программного коэффициента пассивного режима БД-2;
- проведение модернизации скафандра «Орлан-МК» № 6.

Выполнены основные ремонтно-восстановительные работы и дооснащение РС МКС:

- замена блока 800А АБ № 4 в СМ;
- замена малогабаритного насоса-разделителя (МНР-НС) в АСУ СМ;
- замена блока фильтров CO₂ газоанализатора ИК0501 в СМ;
- замена блоков БСК-1В для обеспечения электропитания 1-го и 2-го комплекта «Регул-ОС»;
- замена моноблока СА-325 системы «Регул-ОС»;
- демонтаж/монтаж блоков НППМ1, 2, 3, 4 из состава АСН-М;
- установка новой версии ПО (v.4.3) на лэптоп RSK1;
- установка защитной сетки на преобразователь напряжения ПН28-120 на борту МКС;
- интеграция американской беспроводной точки доступа BelAir War на СМ.

В процессе работ по связям с общественностью проводились различные ТВ-приветствия и поздравления. Выполнялись видеосъемки жизнедеятельности на станции экспедиций МКС-52 и МКС-53 на борту РС МКС для сайта Роскосмоса и социальных сетей. Выполнены работы по программе символической деятельности.

Совместный полет с другими экипажами МКС

Во время полета проводились совместные работы с экипажами МКС-51/52, МКС-53/54.

С 29 июля 2017 года по 3 сентября 2017 года – совместный полет с экипажем МКС-51/52 в составе:

- Юрчихин Фёдор Николаевич (бортинженер экспедиции МКС-51, командир экспедиции МКС-52, Роскосмос, Россия);

– Джек Фишер (бортинженер МКС-51/52, НАСА, США);
– Пегги Уитсон (бортинженер МКС-52, НАСА, США). По взаимному соглашению НАСА и Роскосмоса было продлено пребывание на МКС Пегги Уитсон на 94 дня. После расстыковки ТПК «Союз МС-03» продолжила полет в качестве бортинженера МКС-52 вместе с Фёдором Юрчиным и Джеком Фишером со 2 июня по 3 сентября 2017 года.

С 13 сентября 2017 года по 14 декабря 2017 года – совместный полет с экипажем МКС-53/54 в составе:

– Мисуркин Александр Александрович (бортинженер экспедиции МКС-53, командир экспедиции МКС-54, Роскосмос, Россия);
– Марк Ванде Хай (бортинженер МКС-53/54, НАСА, США);
– Джозеф Акаба (бортинженер МКС-53/54, НАСА, США).

Внекорабельная деятельность

17 августа 2017 года был выполнен выход в открытый космос ВКД-43 из шлюзового отсека СО1 «Пирс» в скафандрах «Орлан-МКС» и «Орлан-МК» (рис. 4). Выход совершили космонавты Ф. Юрчин и С. Рязанский из состава экспедиции МКС-52.

Во время проведения ВКД-43 Фёдором Юрчиным впервые использовался скафандр новой модификации «Орлан-МКС». При подготовке к ВКД-43 проведена модернизация скафандра «Орлан-МК» № 6.

Время открытия выходного люка стыковочного отсека (СО1) «Пирс» – 17:36:34 ДМВ, закрытия – 01:10:01 ДМВ. Продолжительность выхода составила 7 ч 33 мин.



Рис. 4. С. Рязанский во время проведения ВКД-43

Целевые задачи выхода:

- демонтаж адаптера механического с планшетом КЭ «Релаксация» с ВУ СО1;
- панорамные съемки для телекомпании «Russia Today»;
- запуск наноспутника «Томск-ТПУ 120»;
- запуск двух наноспутников «Танюша-ЮЗГУ»;
- запуск наноспутника ТНС-0 № 2;
- запуск тестового спутника «ТС530-Зеркало»;
- фотографирование съемной кассеты СКК № 9 СМ;
- установка планшета КЭ «Импакт» (I пл. АО СМ);
- фотографирование штанги ОНА на АО СМ;
- монтаж подкосов на МИМ2 и СМ;
- монтаж поручней-переходов МИМ2-СМ и МИМ2-ФГБ;
- установка адаптера с датчиками на МИМ2;
- проведение КЭ «Тест»:
 - изменение ориентации прибора БКДО на МИМ2;
 - фотографирование внешней поверхности РС МКС.

Особенности выхода:

- выход в открытый космос Ф.Н. Юрчихиным осуществлялся в новом скафандре «Орлан-МКС»;
- в ходе выполнения ВКД-43 проводилась проверка функционирования систем скафандра «Орлан-МКС»;
- в процессе выхода у скафандра «Орлан-МК» № 6 (С.Н. Рязанский) произошел отказ основного насоса с дальнейшим переходом на резервный насос;
- в ходе проведения ВКД-43 не выполнена задача по монтажу поручня-перехода МИМ2-ФГБ.

По программе АС МКС за время полета экспедиции МКС-52/53 было выполнено три выхода в открытый космос.

Первый выход ВКД-44 проведен 5 октября 2017 года из шлюзового отсека Airlock в скафандрах ЕМУ. Выход выполнили операторы Рэндолф Брезник (командир экспедиции МКС-53) и Марк Ванде Хай (бортинженер МКС-52/53). Время открытия выходного люка – 15:02 ДМВ, закрытия – 21:53 ДМВ. Продолжительность выхода – 6 ч 55 мин.

Второй выход ВКД-45 осуществлен 10 октября 2017 года из шлюзового отсека Airlock в скафандрах ЕМУ. Выход выполнили операторы Рэндолф Брезник (командир экспедиции МКС-53) и Марк Ванде Хай (бортинженер МКС-52/53). Время открытия выходного люка – 14:55 ДМВ, закрытия – 21:18 ДМВ. Продолжительность выхода – 6 ч 23 мин.

Третий выход выполнен 20 октября 2017 года из шлюзового отсека Airlock в скафандрах ЕМУ. Выход выполнили операторы Рэндолф Брезник (командир экспедиции МКС-53) и Джозеф Акаба (бортинженер МКС-53/54). Время открытия выходного люка – 14:45 ДМВ, закрытия – 21:30 ДМВ. Продолжительность выхода – 6 ч 45 мин.

Основные результаты выполнения научной программы

В ходе полета выполнялись работы по российской программе научно-прикладных исследований и экспериментов.

Физико-химические процессы и материалы в условиях космоса:

- ТХН-9 «Кристаллизатор»;
- АСР-16 «Перитектика» (ЕМЛ) (прокладка, демонтаж кабелей, открытие газового клапана).

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»;
- КПП-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»;
- АСР-9 «Сарколаб»;
- РБО-3 «Матрешка-Р».

Космическая биология и биотехнология:

- БИО-2 «Биориск»* (пассивное экспонирование);
- БИО-16 «Электронный нос» (фото);
- БТХ-10 «Конъюгация» (фото);
- БТХ-11 «Биодеградация»;
- БТХ-42 «Структура»;
- БТХ-44 «Кальций»;
- БТХ-45 «Биопленка»;
- БТХ-48 «Пробиовит» (рис. 5);

* – эксперимент выполняется без участия космонавтов

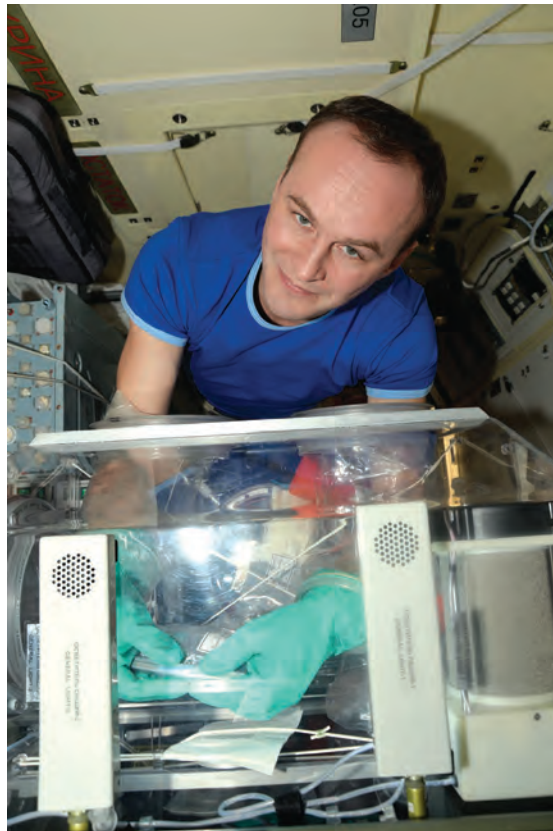


Рис. 5. С. Рязанский выполняет КЭ «Пробиовит»

- БТХ-49 «Фаген»;
- БТХ-50 «Константа-2».

Технологии освоения космического пространства:

- ТЕХ-14 «Вектор-Т» (ВКД-43);
- ТЕХ-15 «Изгиб» * (автомат);
- ТЕХ-19 «Отклик» (перезапуск НА);
- ТЕХ-22 «Идентификация»;
- ТЕХ-34 «Реставрация» (ВКД-43);
- ТЕХ-42 «Наноспутник» (ВКД-43);
- ТЕХ-44 «Среда МКС» * (автомат);
- ТЕХ-52 «Визир»;
- ТЕХ-58 «Выносливость» * (пассивное экспонирование);
- ТЕХ-60 «Таймер»;
- ТЕХ-62 «Альbedo» * (автомат);
- ТЕХ-64 «Пробой»;
- ТЕХ-68 «ИМПАКТ» (ВКД-43);

- КПТ-24 «Тест» (ВКД-43);
- ТЕХ-46 «Кварц-М» (поиск и фотографирование разъемов за пан. 202 в МИМ2);
- ТЕХ-55 «Перспектива-КМ».

Образование и популяризация космических исследований:

- ОБР-4 «РадиоСкаф» (ВКД-43);
- ОБР-7 «О Гагарине из космоса»;
- ОБР-11 «Ряска» (поиск и инвентаризация оборудования).

Космические эксперименты (рис. 6) в период полета БИ-4 МКС-52/53 выполнялись на основании «Программы реализации научно-прикладных исследований, планируемых в период пятьдесят первой и пятьдесят второй пилотируемых экспедиций МКС-51 и МКС-52» и «Программы реализации научно-прикладных исследований, планируемых в период пятьдесят третьей и пятьдесят четвертой пилотируемых экспедиций МКС-53 и МКС-54».

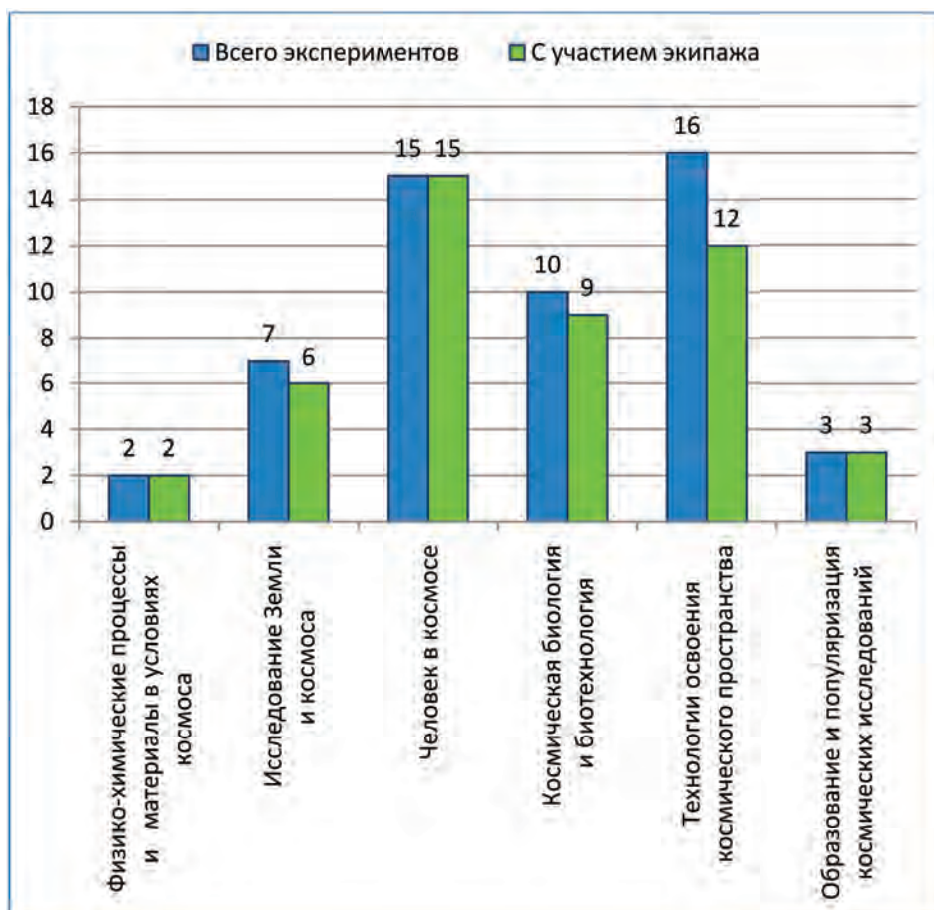


Рис. 6. Космические эксперименты

Всего было проведено 53 космических эксперимента, 47 из которых проводились с участием экипажа и 6 без участия экипажа.

Новые эксперименты:

- АСР-16 «Перитектика»;
- ТЕХ-68 «ИМПАКТ»;
- ТЕХ-46 «Кварц-М»;
- ТЕХ-55 «Перспектива-КМ»;
- ОБР-11 «Ряска».

Выводы

Уровень подготовленности экипажа МКС-52/53 по транспортному кораблю «Союз МС-05» и российскому сегменту МКС позволил экипажу успешно выполнить запланированную программу космического полета и сформулировать замечания и предложения по ТПК и РС МКС.

Полет экипажа МКС-52/53 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-52/53 (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-52/53. 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 Support of the ISS-52/53 Crew Members (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-52/53 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:

- экспедиция МКС-52 – с 29 июля по 3 сентября 2017 года в составе пяти человек (два представителя Роскосмоса и три представителя NASA);
- экспедиция МКС-53 – с 4 сентября по 12 сентября 2017 года в составе трех человек (один представитель Роскосмоса и два представителя NASA) и с 13 сентября по 14 декабря 2017 года в составе шести человек (два представителя Роскосмоса и четыре представителя NASA).

Длительность полета одного российского (БИ-4) и двух американских (КЭ и БИ-6) членов экспедиции 52/53, прибывших на корабле «Союз МС-05», составила 139 суток.

Этапы полета основной экспедиции

28.07.17 г. – выведение ТПК «Союз МС-05» – 18:41 ДМВ.

28.07.17 г. – стыковка ТПК «Союз МС-05» к МИМ1 – 21:54 GMT/00:54 ДМВ (29.07.17 г.).

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

Время посадки – 11:38 ДМВ.

Основные динамические операции

14.08.17 г. – старт корабля SpX-12 «Dragon» – 16:31 GMT/19:31 ДМВ.

16.08.17 г. – стыковка SpX-12 «Dragon». Установка на надирный порт Node2 МКС с помощью манипулятора SSRMS – 14:00 GMT/17:00 ДМВ.

02/03.09.17 г. – расстыковка ТПК «Союз МС-04» от МИМ2 – 21:28 GMT/00:28 ДМВ.

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

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

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

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

(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.

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

Внекорабельная деятельность

Внекорабельная деятельность (ВКД) в скафандре «Орлан-МК»:

17.08.17 г. было выполнено ВКД-43 – командиром экипажа (КЭ) МКС-52 и бортинженером-4 (БИ-4). Открытие выходного люка (ОВЛ) – 14:36 GMT; закрытие выходного люка (ЗВЛ) – 22:10 GMT. Время пребывания в открытом космосе – 7 ч 34 мин.

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

Старт экипажа ТПК «Союз МС-05» состоялся 28.07.17 г. в 18:41 ДМВ.

Выведение, автономный полет ТПК «Союз МС-05» и стыковку с МКС БИ-4 перенес хорошо. Сонливости и утомления не было. Перегрузки на выведении ощущались менее ожидаемых. После выведения организм сразу «вспомнил» невесомость.

Стыковка ТПК «Союз МС-05» с МИМ1 проведена штатно в автоматическом режиме по 4-витковой схеме 28.07.17 г. в 00:54 ДМВ. После открытия переходного люка 28.07.17 г. в 23:57 GMT (29.07.17 г. в 02:57 ДМВ) экипаж ТПК перешел на станцию и приступил к выполнению служебных операций. После выполнения предписанных после стыковки работ и приема пищи на станции всем космонавтам было предоставлено время для сна и отдыха с 07:00 GMT 29.07.17 г. до 06:00 GMT 30.07.17 г. продолжительностью 23 часа.

В связи с временным сокращением количества членов российского экипажа на борту МКС, в период работы экспедиции МКС-52 четыре субботы были переведены в разряд рабочих дней, удалено время на ознакомление БИ-4 с МКС, еженедельная уборка станции по субботам включалась в рабочее время космонавтов.

Данные мероприятия были согласованы с российскими членами экипажа.

Последующие две недели БИ-4 совместно с КЭ выполнял работы по подготовке к ВКД -43, текущие работы на станции, научные эксперименты и др.

Работоспособность БИ-4 сохранялась на достаточно высоком уровне. Противопоказаний в плане режима труда и отдыха (РТО) для выполнения КЭ и БИ-4 17.08.17 г. операции «Выход» (ВКД-43) не отмечалось.

На 4-й неделе полета (с вечера 17.08.17 г. и в ночь с 17.08 на 18.08.17 г.) БИ-4 и КЭ провели операцию «Выход» (ВКД-43).

В день, предшествующий ВКД (16.08.17 г.), экипажу был предоставлен отдых полдня. В ночь перед ВКД сон был запланирован на период с 19:30 GMT 16.08.17 г. до 05:30 GMT 17.08.17 г. продолжительностью 10 часов.

Операция «Выход» выполнена в ночь с 17-го на 18.08.17 г. на 120-е сутки полета КЭ и на 20-е сутки полета БИ-4. ОВЛ состоялось в 17 ч 40 мин, ЗВЛ – в 01 ч 10 мин (по ДМВ). Общее время пребывания космонавтов в открытом космосе составило 7 ч 30 мин. Космонавты работали спокойно и уверенно. Основная программа запланированных работ выполнена.

По мере выполнения ВКД космонавтам выдавались рекомендации по регулированию величины теплосъема и уровня физической активности. Тепловые ощущения обоих космонавтов находились в пределах нормы. Система охлаждения скафандра работала эффективно, температурный режим был комфортным на протяжении всего «Выхода». БИ-4 сообщил, что жажды во время выполнения ВКД не было. Проблем с подгонкой скафандра не испытывал.

В соответствии с планом продолжительность ВКД должна была составлять 6 ч 05 мин, фактически ВКД продолжалась 7 ч 34 мин. Космонавты работали спокойно и уверенно. Основная программа запланированных работ была выполнена. Время работы у БИ-4 составило 17 ч 45 мин, период бодрствования – 22 часа.

После ВКД космонавтам было предоставлено время для отдыха с 03:30 до 13:30 GMT 18.08.17 г. продолжительностью 10 часов. В последующие полдня 18.08.17 г. космонавты выполняли небольшие по объему (в пределах 3–4 часов) заключительные работы со скафандрами.

19.08.17 г. при обсуждении результатов ВКД БИ-4 сообщил, что физическое утомление мышц рук и верхнего плечевого пояса после ВКД-43 было ожидаемым и соответствовало объему выполненных работ, подобные ощущения бывают после выполнения большого объема резистивных упражнений. Со слов БИ-4 физические резервы для более продолжительной работы оставались.

Дополнительно к плану в каждый из дней 4-й недели БИ-4 затрачивал по 1,5 часа на 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).

На 6-й неделе полета РТО также оценивался как напряженный. Напряженность была обусловлена завершением пребывания на станции и возвращением на Землю экипажа МКС-52, а также выполнением работ по отстыковке от МКС и посадке ТПК «Союз МС-04» в позднее вечернее и ночное время.

После ухода экспедиции МКС-52 оставшемуся на станции российскому космонавту БИ-4 было предоставлено время для сна и отдыха с 02:00 GMT 03.09.17 г. до 06:00 GMT 04.09.17 г. продолжительностью 28 часов. На 04.09.17 г. для БИ-4 был запланирован дополнительный день отдыха. В предоставленный день отдыха после расстыковки ТПК «Союз МС-04» с МКС отдохнул хорошо, выспался. РТО в целом оценивал как нормальный.

На 7-й неделе полета БИ-4 РТО оценивался как штатный и характеризовался выполнением плановых работ и экспериментов по программе Task List, а также выполнением работ по подготовке к стыковке ТПК «Союз МС-06» с МКС (рис. 1).

Стыковка ТПК «Союз МС-06» с МИМ2 проведена штатно в автоматическом режиме по 4-витковой схеме 13.09.17 г. в 02:55 GMT/05:55 ДМВ.

После открытия переходного люка в 05:08 GMT прибывший экипаж перешел на станцию и приступил к выполнению неотложных рабочих операций. По прибытии на станцию на КК ТПК «Союз МС-06» были возложены обязанности БИ-1.

После выполнения всех запланированных работ экипажу было предоставлено время для сна и отдыха с 11:00 GMT (13.09.17 г.) до 06:00 GMT (14.09.17 г.) продолжительностью 19 часов. Таким образом, 13.09.17 г. у экипажа был практически день отдыха.

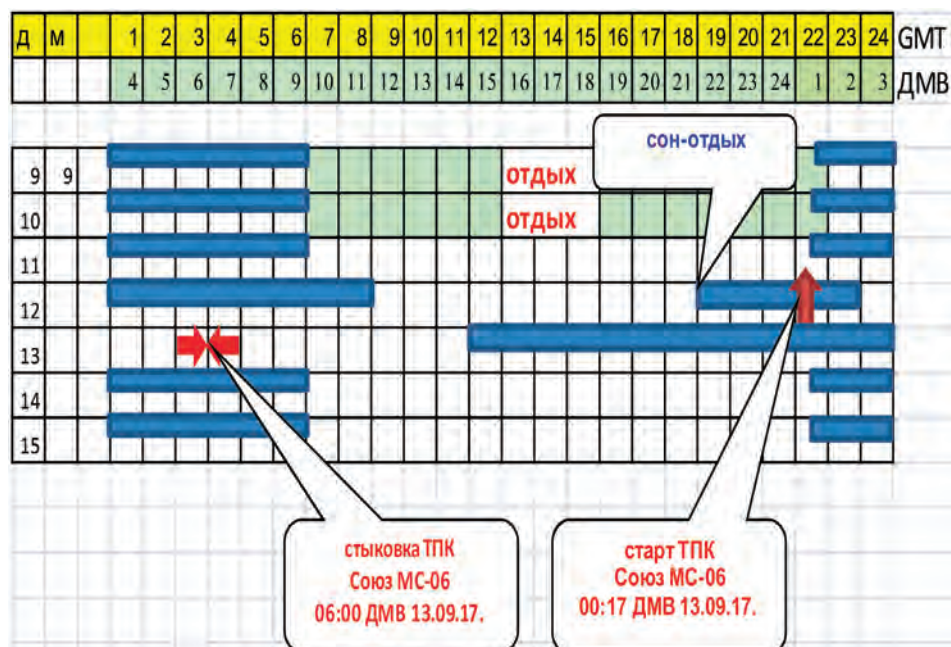


Рис. 1. РТО экипажа МКС
на период выведения и стыковки ТПК «Союз МС-06»

Последующие 4 недели БИ-4 совместно с БИ-1 выполняли текущие работы на станции, научные эксперименты, эксперименты по программе Task List и другие работы.

На 12-й неделе (11.10–17.10.17 г.) состоялась стыковка ТПК «Прогресс МС-07» к СО1. Операция стыковки была выполнена в штатном режиме 16.10.17 г. в 14:04 ДМВ/11:04 GMT, открытие переходного люка состоялось в 17:14 ДМВ/14:14 GMT.

В день стыковки с ТПК «Прогресс МС-07» (16.10.17 г.) РТО БИ-4 был напряженным: плановое время работы в этот день составило у БИ-4 7 ч 30 мин. Дополнительно к плану космонавт выполнил работы по разгрузке ТПК, на что затратил 2 часа. Кроме того, на выполнение экспериментов по программе Task List им было затрачено 45 минут. Таким образом, фактическое время выполнения работ в этот день составило у БИ-4 10 ч 15 мин. Рабочая зона увеличилась за счет сокращения времени физических тренировок на 1 час.

Следующие недели БИ-4 работал в штатном режиме.

Согласно требованиям «Основных правил и ограничений», начиная с 19-й недели (с 29.11.17 г.), рабочая зона у БИ-4 была сокращена на 1 час, а это время (1 час) ежедневно планировалось ему на подготовку к возвращению на Землю (рис. 2).

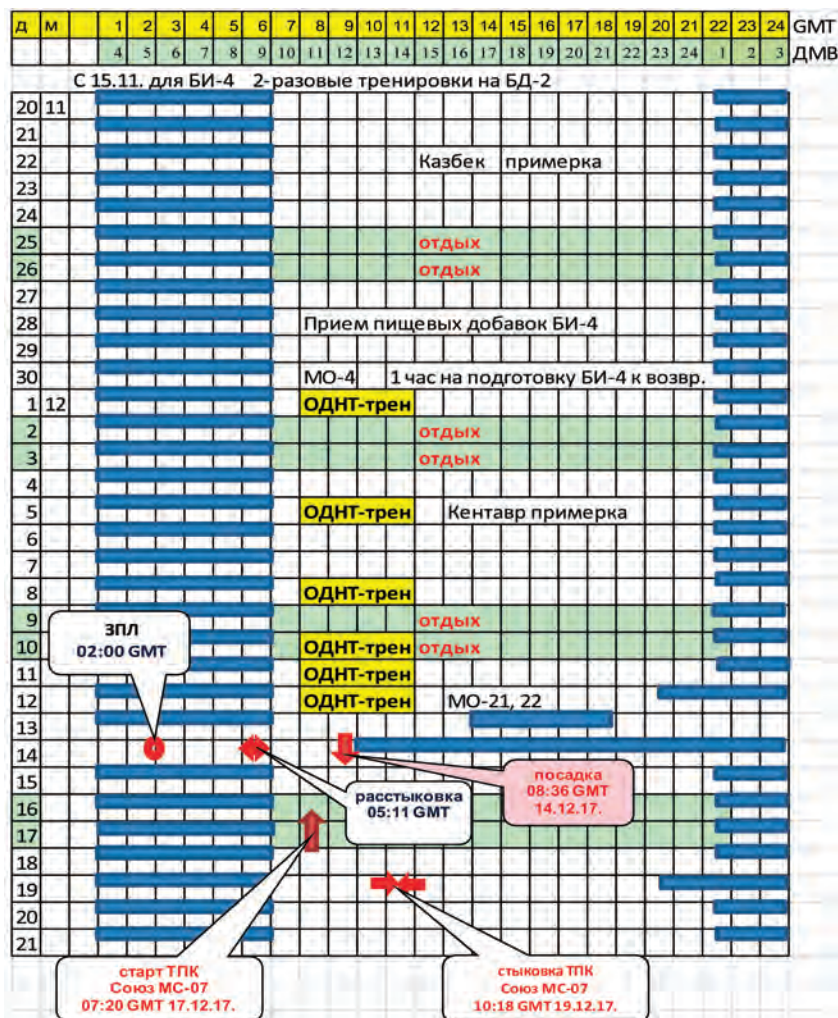


Рис. 2. Режим основных мероприятий для подготовки к посадке ТПК «Союз МС-05» № 735 (ОДНТ – отрицательное давление на нижнюю часть тела; ЗПЛ – закрытие переходного люка)

13.12.17 г. подъем состоялся в штатное время (в 6:00 GMT). После выполнения ряда работ по подготовке к спуску космонавтам был предоставлен дневной отдых с 13:00 до 18:00 GMT, продолжительностью 5 часов. После дневного отдыха БИ-4 продолжил работы по укладке возвращаемых грузов на борт ТПК «Союз МС-05». Закрытие переходного люка произошло в 02:02 GMT/05:02 ДМВ. Отстыковка ТПК «Союз МС-05» от МИМ1 была осуществлена 14.12.17 г. в 05:14 GMT/08:14 ДМВ. Посадка состоялась в 11:37 ДМВ в заданном районе, 139-суточный полет БИ-4 был успешно завершен (рис. 3).



Рис. 3. Эвакуация БИ-4 из спускаемого аппарата

По оценке специалистов группы медицинского обеспечения Главной оперативной группы управления (ГМО ГОГУ), РТО БИ-4 в сутки расстыковки и посадки был напряженным. Рабочая нагрузка у БИ-4 составила в общей сложности 12 часов (6 ч 45 мин на МКС и 5 ч 15 мин в ТПК). Период бодрствования 15 часов (с момента подъема и до момента посадки). Расстыковка и посадка проходили в ночное время суток.

Общее полетное время у БИ-4 составило 139 суток, из которых планировалось 102 рабочих дня и 37 дней отдыха, из них один день планировался как полдня отдыха.

Фактически, по сообщениям с борта и данным специалистов ГОГУ, из 37 дней отдыха у БИ-4 было 6 полноценных дней отдыха, когда время работы не превышало 2 часов; 15 неполных дней отдыха, когда фактическая продолжительность работ составляла от 2 до 4 часов, и 16 дней отдыха были практически рабочими днями, когда общее время работы составляло 4,5 часа и более.

За весь полет на выполнение дополнительных работ, включая Task List, по инициативе экипажа и по указанию Земли сверх плана БИ-4 затратил 231,5 часа, что практически равноценно 35,5 рабочим дням при плановой рабочей нагрузке 6,5 часа в день.

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). Отмечалось хорошее взаимодействие ГМО ГОГУ с полетными врачами экипажа.

БИ-4 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-05» № 736 (КК, БИ, БИ-2): 28–29.07.17 г.;
- перед и во время проведения ВКД: 17.08.17 г. (БИ-4, КЭ МКС-52);
- при проведении тренировок с отрицательным давлением на нижнюю часть тела (ОДНТ): 01.12.17 г.; 05.12.17 г.; 08.12.17 г.; 10.12.17 г.; 11.12.17 г.; 12.12.17 г.;
- во время расстыковки и спуска на Землю ТПК № 736 (КК, БИ, БИ-2): 14.12.17 г.;
- при проведении научных экспериментов:
 - «Биокард» (БИ-4): 21.08.17 г.; 04.10.17 г.; 15.11.17 г.;
 - «ДАН» (БИ-4): 28.09.17 г.; 24.10.17 г.; 27.11.17 г.

Результаты динамического медицинского контроля свидетельствуют об адекватных физиологических реакциях, достаточных функциональных резервах организма и отсутствии каких-либо существенных отклонений в функциональном состоянии организма БИ-4, что обеспечило сохранение высокого уровня работоспособности на всех этапах экспедиции.

Психологический климат в экипаже и взаимодействие с наземными службами оцениваются высоко. БИ-4 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 пределах допустимых величин) 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 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 ответил, что «можно и понизить температуру», в связи с чем РРЖ2 КОХ2 переведен с режима 14 °С в режим 10 °С.

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

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.

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-05» на различных этапах полета показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры микроклимата ТПК «Союз МС-05»
на участке выведения, орбитального полета и стыковки с МКС (28.07.17 г.)

Параметры	Минимально	Максимально	Допустимый диапазон
ДСА мм рт.ст.	807	835	450–970
ДБО мм рт.ст.	816	826	450–970
Р _{О₂} мм рт.ст.	173	182	140–310
Р _{СО₂} мм рт.ст.	1,2	2,3	<10
Р _{Н₂О} мм рт.ст.	15,1	21,5	<20
ОВ %	59	89	40–75
ТСА, °С	25,2	27,1	18–25
ТБО, °С	16,9	21,1	18–25

ДСА – давление в спускаемом аппарате; ДБО – давление в бытовом отсеке; Р_{О₂} – парциальное давление кислорода; Р_{СО₂} – парциальное давление углекислоты; Р_{Н₂О} – 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-05»
на этапе расстыковки (14.12.17 г.)

Параметры	Минимально	Максимально	Допустимый диапазон
ДСА мм рт.ст.	738	792	450–970
ДБО мм рт.ст.	629	759	450–970
Р _{О₂} мм рт.ст.	140	191	140–310
Р _{СО₂} мм рт.ст.	2,1	3,7	<10
Р _{Н₂О} мм рт.ст.	9,2	12,1	<15
ОВ %	47	54	40–75
ТСА, °С	21,8	24,3	18–25
ТБО, °С	20,1	22,5	18–25

Газоанализатор СО (монооксида углерода) в связи с неисправностью был снят с телеметрического контроля с 27.01.15 г. и демонтирован. 07.07.17 г. проведен монтаж нового газоанализатора ГА ГЛ2106. После тестирования включен в работу 28.08.17 г.

16.11.17 г. зафиксировано срабатывание датчиков дыма в ФГБ. Показания газоанализатора CSA-CP в ФГБ и на центральном посту было в норме. Срабатывание датчиков расценено специалистами как ложное.

16.11.17 г. в течение дня периодически в системе АСУ появлялся сигнал «консервант некачественный». 18.11.17 г. экипаж выполнил ремонтно-восстановительные работы АСУ: замена трубопровода 5182-03, емкости с консервантом и ДКиВ (дозатор консерванта и воды). Работоспособность АСУ СМ была восстановлена.

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

В период с 06.09. по 12.09.17 г. радиационная обстановка внутри станции была слабо возмущенная в связи с произошедшими солнечными протонными событиями 5–10 сентября. По показаниям бортовых дозиметров ТЭПС и Р16 дополнительная поглощенная доза за время произошедших солнечных вспышек не превысила 20 мрад.

10.09.17 г. в связи с ожидаемым повышением уровня радиации на МКС из-за солнечной активности (в период с 05:50 GMT до 13:00 GMT 11.09.17 г.) БИ-4 переданы интервалы времени, когда ему рекомендовано находиться в кормовой части СМ за панелью 339, как в наиболее защищенном месте. Утром 11.09.17 г. БИ-4 доложил, что спал в своей (правой) каюте СМ.

Служба радиационной безопасности (СРБ) 11.09.17 г. сообщила о радиационной обстановке в связи с солнечным протонным событием (СПС) от 10.09.17 г. По состоянию на 12:00 мск (9:00 GMT) 11.09.17 г. потоки протонов с энергиями больше 100 МэВ от СПС, начавшегося 10.09.17 г. уменьшились до 33 прот/см²с (максимум составлял 68 прот/см²с). Никаких дополнительных мер по ограничению деятельности космонавтов не предпринималось. Было рекомендовано при ухудшении радиационной обстановки передавать на борт рекомендации космонавтам не посещать малые модули СО-1, МИМ1, МИМ2 и каюты СМ. В случаях невозможности покинуть каюты размещаться в каюте в наиболее удаленном от иллюминатора месте, ближе к выходу из кают. На борт отправлены рекомендации экипажу на 12.09.17 г. избегать в указанные интервалы времени зоны МКС с пониженным уровнем экранирования: каюты СМ, переходный отсек СМ (между ФГБ и СМ), шлюзовые отсеки, а также иллюминатор Lab/стойка WORF. БИ-4 было предложено спать в NODE2 американского сегмента в каюте по левому борту, от чего БИ-4 отказался и спал в правой каюте СМ.

Накопленная поглощенная доза за полет у БИ-4 составила 4,9 сГр (4904 мрад), что не превышает допустимые значения доз, определенных согласно полетным правилам 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 проводился контроль радиационной безопасности экипажа с использованием датчиков дозиметра «ПИЛЛЕ-МКС». Согласно заключению СРБ по радиационной безопасности экипажа, во время ВКД значения измеренной мощности поглощенной дозы были в пределах, установленных полетными правилами Flight Rules В 14.2.2-12.

18.08.17 г. проведена замена карты памяти дозиметра «ПИЛЛЕ-МКС», карта 29-016 (00068850R) возвращена на ТПК «Союз МС-04» (с МКС-52).

Санитарно-гигиеническое состояние МКС

Еженедельно экипаж проводил плановую уборку станции. В связи с отсутствием на борту МКС пробоотборников ИПД-СО, для контроля содержания монооксида углерода в атмосфере РС МКС использовались результаты замеров американским переносным газоанализатором CSA-CP.

Ежемесячный контроль пробоотборниками ИПД-СО возобновлен после их доставки с ТПК «Прогресс МС-07» (октябрь 2017 г.). При отборах проб воздуха (13.11.17 г., 11.12.17 г.) пробоотборником ИПД-СО в СМ монооксид углерода не обнаружен.

Контроль содержания аммиака в атмосфере РС МКС пробоотборниками ИПД-NH₃ проведен 19.10.17 г. в СМ – аммиак не обнаружен.

25.10.17 г. ЦУП-Х сообщил, что во время монтажа спутников в модуле ЖЕМ произошла утечка 214 мл фреона-218. Проведен отбор воздуха в модуле ЖЕМ с использованием пробоотборников GSC и АК-1М на фреон. В РС МКС проведен контроль атмосферы с помощью анализатора фреона ФИТ 25.10 и 26.10.17 г. – фреон не обнаружен (по докладу БИ-4 результат измерений: «underload»).

Замечаний по санитарно-гигиеническому состоянию от экипажа в сеансах радиосвязи не поступало. На протяжении всего полета БИ-4 санитарно-гигиеническую обстановку на станции в основном оценивал как комфортную, однако отметил, что, по сравнению с предыдущим полетом, заметна более выраженная запыленность станции.

Спал в каюте правого борта, используя спальный мешок. Все необходимые средства личной гигиены, одежда, спортивная обувь, средства защиты слуха имелись. Наушники с активным шумоподавлением одевал только на ночь.

Акустические измерения, выполненные 04.09.17 г. выявили в СМ РС МКС повышение уровней звука как на рабочих местах, так и в каютах, что требует использования индивидуальных средств защиты от шума.

Левая каюта СМ остается наиболее «шумной», уровни звука в которой превышают допустимые значения для периода сна на 6,5 дБА, что делает необходимым 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 (оборудование американского сегмента), которое работало в режиме акустической дозиметрии.

Места сна российских членов экипажей МКС-52/53:

БИ-1 – левая каюта СМ;

БИ-4 – правая каюта СМ.

У российских космонавтов шумовая нагрузка:

– за дневной период превышала предельно допустимый уровень (ПДУ) на 4,3–10,8 дБА;

– за ночной период превышала ПДУ на 1,2–12,6 дБА с максимальными значениями у БИ-1 (на 10,8 дБА и 12,6 дБА соответственно).

Исследования по санитарно-микробиологическому состоянию МКС (по результатам МО-21 «Контроль микроэкосферы среды обитания») от 01.09.17 г. (135-е сутки полета МКС-51/52, 36-е сутки полета МКС-52/53) выявили, что обсемененность газовой среды бактериями и плесневыми грибами поддерживалась в пределах нормативных показателей и соответствовала требованиям ISS MORD.

По результатам МО-22 «Контроль санитарно-эпидемиологического состояния», выполненного 01.09.17 г. (135-е сутки полета МКС-51/52, 36-е сутки полета МКС-52/53) содержание фрагментов плесневых грибов на поверхностях интерьера и оборудования не превышало нормативный показатель, регламентируемый ISS MORD.

Содержание бактерий на поверхностях интерьера и оборудования превышало нормативный показатель, регламентируемый ISS MORD в 1 зоне: МИМ2 с панели 302 в районе люка доступа СОТР. На остальных 20 поверхностях интерьера и оборудования содержание бактерий не превышало нормативный показатель, регламентируемый ISS MORD. Было рекомендовано запланировать обработку с помощью комплекта «Фунгистат» зоны МИМ2 панели 302 в районе люка доступа СОТР с повышенным содержанием микроорганизмов.

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-4 аппетит хороший, водопотребление в норме.

Доставленные на ТГК «Прогресс МС-07» свежие овощи и фрукты пришли в хорошем состоянии. БИ-4 отметил, что содержимое доставленных ДНП соответствует его пожеланиям и предпочтениям, высказанным на этапе формирования состава контейнеров.

Использование средств профилактики

БИ-4 изделием «Браслет-М» не пользовался.

С 05.08.17 г. физические тренировки для БИ-4 планировались по российской программе общей продолжительностью 2,5 часа, в основном, блоком, на БД-2 и ВБ-3М/ARED (с чередованием).

02.08–04.08.17 г., 18.09–21.09.17 г. и 20.11–23.11.17 г. физические тренировки ему не планировались в связи с проведением эксперимента «САРКОЛАБ».

26.09.17 г. физические тренировки на бортовых тренажерах планировалось заменить тренировками в комплекте КОР-01-Н (в рамках эксперимента «Профилактика-2»). Из-за неисправности комплекта КОР-01-Н и неоднократных попыток восстановить его, по рекомендации специалистов тренировки в комплекте КОР-01-Н были отменены.

С 15.11.17 г. в соответствии с требованиями на заключительном этапе полета и рекомендациями специалистов планировались двухразовые тренировки на бегущей дорожке (БД-2/Т2) и ОДНТ-тренировки (с 01.12.17 г.).

По ежедневным докладам физические тренировки выполнял в основном в полном объеме.

Замечаний к работе тренажеров, физической профилактике не было. На БД-2 тренировался по программе 4-дневного цикла, используя как активный, так и пассивный режимы тренировок. Готовясь к ВКД, тренировал руки и верхний плечевой пояс на ВБ-3М и с использованием кистевого эспандера из комплекта средств физической профилактики АС МКС.

По поводу имевшегося поперечного отслоения края полотна и бокового порыва полотна тренажера БД-2, а также деструкции наклеенного на поверхность полотна скотча, экипажу было рекомендовано продолжить контроль состояния полотна тренажера БД-2 и проводить раз в 2 недели фотографирование полотна и экранной формы вкладки «Полотно». Первое фотографирование выполнено 10.08.17 г.

23.11.17 г. во время проведения тестирования БД-2 высказал замечания по индикации величины нагрузки на панели управления БД-2.

29.11.17 г. БИ-4 доложил о нарушении целостности полотна бегущей дорожки БД-2. После анализа полученных с борта фотографий поврежденного полотна (рис. 4), 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, разрешено использование тренажера БД-2 для проведения БИ-4 одной сессии эксперимента «Мотокард».

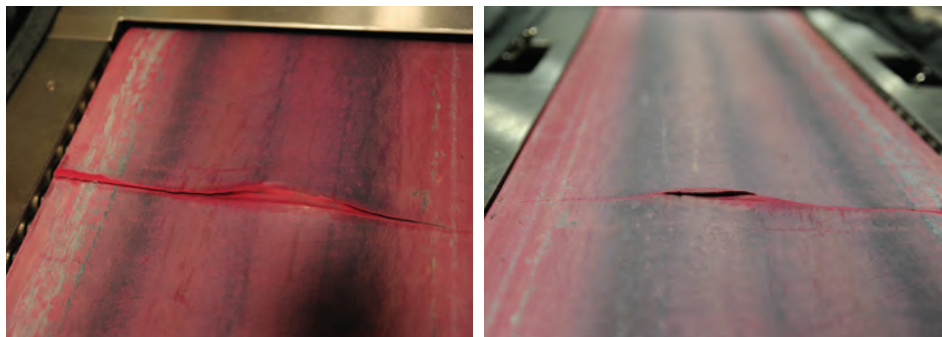


Рис. 4. Повреждения полотна БД-2

30.12.17 г. от американской стороны получено разрешение на использование российскими космонавтами бегущей дорожки T2 до замены полотна БД-2.

30.11.17 г. БИ-4 сообщил, что нанес на полотно армирующую ленту и, на его взгляд, БД-2 можно использовать. От специалистов по оборудованию были получены рекомендации по использованию тренажера БД-2 с 01.12.17 г. по 14.12.17 г. Проведя анализ дополнительной информации, поступившей с борта МКС 30.11.17 г. по нарушению целостности полотна тренажера БД-2 (сброс величины натяжения полотна и фото по нанесению армирующей ленты на полотно), и учитывая заключительную стадию полета БИ-4, ему было разрешено использовать тренажер БД-2 один раз в день. При этом БИ-4 контролировал состояние армированной ленты после каждого занятия.

Сведения о работе медицинской аппаратуры

11.10.17 г. при выполнении МО-12 «Исследование вен нижних конечностей» БИ-4 доложил о сбое в работе блока «Плетизмограф». Вероятная причина – выход из строя насоса, создающего давление в измерительной манжете. В связи с этим исследование было прекращено по рекомендации специалиста. Выполнено фотографирование окон «Кардиомеда» на ноутбуке RSE-Med, фотографии с борта переданы специалистам для анализа. Дальнейшие обследования у БИ-4 отменены.

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 выполнению программы полета во многом способствовали опыт и профессионализм БИ-4, приобретенные в предыдущих полетах, разумное взаимодействие и взаимопомощь российских космонавтов, работающих на станции, а также настрой на своевременное и в полном объеме выполнение профессиональных задач.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.007

ПОДГОТОВКА КОСМОНАВТОВ К ДЕЙСТВИЯМ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

С.В. Бронников, А.Е. Маликов, И.А. Рожкова

Канд. техн. наук С.В. Бронников (ПАО «РКК «Энергия»
им. С.П. Королёва»)
А.Е. Маликов (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)
И.А. Рожкова (ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»)

Рассматриваются задачи, решаемые в процессе подготовки экипажей к действиям в аварийных ситуациях, аргументируется необходимость проведения подготовки экипажей в полете, проводится структура бортового тренажера, описание процесса бортовой тренировки.

Ключевые слова: космическая станция, безопасность экипажа, подготовка, навыки и умения, уровень подготовленности, бортовой тренажер, задачи подготовки, методика подготовки космонавтов.

Cosmonaut Training for Emergency Situations Aboard the Space Station. S.V. Bronnikov, A.Ye. Malikov, I.A. Rozhkova

The paper considers the problems of training cosmonauts for emergency situations, argues the necessity of training crews in flight, gives the on-board simulator structure and describes the process of on-board training.

Keywords: space station, crew safety, training, skills, level of preparedness, on-board simulator, training tasks, methods of on-board training.

Главным условием обеспечения безопасности космического полета является отсутствие аварийной ситуации или выход из данной ситуации в случае ее возникновения [8]. Аварийной является ситуация, сложившаяся в результате появления на космической станции (КС) опасного фактора, и возникновении вследствие этого угрозы ухудшения здоровья или гибели экипажа.

В конструкторской документации современной КС, например, Международной космической станции (МКС), рассматриваются три вида аварийных ситуаций: пожар, разгерметизация, выброс токсичных веществ во внутренний объем КС. Экипаж в случае возникновения аварийной ситуа-

ции должен обеспечить выход из аварийной ситуации, т.е. выполнить необходимые действия, в первую очередь, для сохранения жизни и здоровья всех находящихся на КС членов экипажа, а также для минимизации возможного ущерба для состояния КС и выполнения программы полета.

Одним из важных показателей безопасности космического полета является вероятность выхода из аварийных ситуаций, требующих участия в их парировании экипажа $P_{\text{вас}}$, которую можно оценить следующим образом:

$$P_{\text{вас}} = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^{\text{воз}} \cdot P_i^{\text{ош}},$$

где: $P_{\text{вас}}$ – вероятность выхода из аварийных ситуаций; $P_i^{\text{воз}}$ – вероятность возникновения аварийной ситуации i -го типа; $P_i^{\text{ош}}$ – вероятность неправильных действий экипажа в i -й ситуации; n – число возможных аварийных ситуаций.

$P_i^{\text{ош}}$ определяется, главным образом, уровнем подготовленности экипажа. Поэтому подготовка экипажей к действиям в аварийных ситуациях является одним из основных направлений обеспечения безопасности.

Подготовка космонавтов к полету осуществляется в несколько этапов:

$$S = \{S_i\}, i = \overline{1, l},$$

где: l – количество этапов.

Наземная подготовка космонавтов включает 3 этапа:

- 1-й этап S_1 – общекосмическая подготовка кандидатов в космонавты;
- 2-й этап S_2 – подготовка космонавтов в составе групп специализации и совершенствования по типам пилотируемых космических аппаратов (ПКА) или направлениям специализации;
- 3-й этап S_3 – подготовка космонавтов в составе утвержденных экипажей к конкретному космическому полету на ПКА.

Подготовка к действиям в аварийной ситуации осуществляется на всех этапах подготовки космонавтов. Методика подготовки космонавтов к действиям в аварийных ситуациях разрабатывалась, начиная с первых пилотируемых полетов, и продолжает совершенствоваться в настоящее время. Большой вклад в разработку и совершенствование методики внесли В.И. Ярополов, В.А. Дмитров, Е.И. Жук, И.Г. Сохин, С.В. Приходько, А.А. Курицын, А.И. Кондрат, А.Е. Маликов, Т.Ю. Маликова и другие.

Рассмотрим задачи подготовки к действиям в аварийных ситуациях.

На этапе S_1 :

- изучение конструкции, состава и назначения служебных систем, бортового оборудования, задействованных при возникновении аварийной ситуации, а также приобретение первоначальных навыков их эксплуатации;

- приобретение знаний об объектах наземной космической инфраструктуры, которые принимают участие в ликвидации аварийных ситуаций;
- приобретение знаний о логике функционирования систем объекта в условиях аварийной ситуации;
- приобретение знаний по основам компьютерной техники ПКА и формирование необходимых навыков применения компьютеров при возникновении аварийных ситуаций;
- приобретение знаний по обеспечению безопасности космического полета;
- приобретение знаний об органах управления, контроля и методах управления объектом в аварийных ситуациях;
- формирование нервно-психической устойчивости к воздействию неблагоприятных факторов космического полета и навыков при работе в сложных условиях.

На этапе S₂:

- изучение реакции бортовых служебных систем ПКА на аварийные ситуации;
- формирование навыков работы с бортовыми процедурами по выполнению действий в аварийных ситуациях;
- формирование навыков работы с бортовыми системами и оборудованием при возникновении аварийных ситуаций;
- совершенствование знаний по обеспечению безопасности экипажа и космического полета ПКА в целом;
- отработка умения ориентироваться в предметном пространстве орбитального комплекса;
- формирование и развитие профессионально важных психологических качеств при выполнении действий по ликвидации аварийной ситуации;
- формирование навыков оказания неотложной медицинской помощи.

На этапе S₃:

- изучение программы предстоящего полета, порядка обеспечения безопасности экипажа, взаимодействия членов экипажа между собой, а также с группами управления при возникновении аварийных ситуаций;
- освоение конкретных должностных и функциональных обязанностей в экипаже при реагировании на аварийную ситуацию;
- совершенствование навыков и умений работы с бортовой документацией при выполнении действий при возникновении аварийной ситуации;
- совершенствование навыков использования средств защиты дыхания;
- умение оценивать изменения параметров бортовых систем при развитии аварийной ситуации и оперативно принимать правильные решения.

В результате наземной подготовки у экипажа вырабатываются:

- комплексный образ объекта;
- знания возможных причин возникновения аварийных ситуаций и стратегии действий при их устранении;

- навыки выполнения типовых операций при реагировании на аварийную ситуацию;
- навыки определения параметров развития ситуации;
- навыки восприятия информации с использованием средств отображения;
- навыки выдачи управляющих воздействий с использованием органов управления;
- навыки самостоятельного комплексного управления объектом при возникновении аварийной ситуации, включающие принятие решений по ликвидации аварийной ситуации, контроль выполнения автоматических и ручных режимов работы, контроль состояния бортовых систем и конструкции ПКА, выполнение действий при консервации ПКА;
- навыки групповой работы при выполнении действий по парированию аварийной ситуации.

Известно [5], что уровень и качество навыков и умений оператора со временем снижаются. Как показала практика полетов орбитальных станций «Мир», МКС и исследования динамики навыков управления движением ПКА в полете, качественной предполетной подготовки по действиям в аварийных ситуациях недостаточно для обеспечения надежной работы экипажа в течение длительного полета на орбитальной станции [1, 7]. Это связано со следующими причинами:

- снижение уровня подготовленности экипажа;
- изменение конфигурации станции;
- несоответствие расположения оборудования, используемого в аварийных ситуациях на наземных тренажерах, штатному расположению на борту.

В процессе длительного космического полета происходит снижение уровня подготовленности экипажа, ухудшается эффективность выполнения экипажем полетных операций, требующих сложных психомоторных навыков. В результате проведенных исследований индивидуальных особенностей регулирования психофизиологического состояния и надежности профессиональной деятельности космонавта в наземных условиях и в процессе длительных космических полетов было установлено, что существенное ухудшение сложных психомоторных навыков (разрушение структуры навыка) происходит после перерыва в тренировках более 75–90 дней [7]. Под надежностью деятельности в данном случае понимается способность человека-оператора выполнять предписанные ему функции с заданным качеством и при сохранении в допустимых пределах психофизиологической «цены» деятельности [6].

КС является развивающейся системой, происходит изменение конфигурации станции, добавляются новые модули, приходят и уходят транспортные корабли к различным портам, производится модернизация/замена бортовых систем, вводятся в строй новые системы, выводятся из эксплуатации отказавшие и выработавшие ресурс элементы, доставляется новое оборудо-

вание, подготовка по которому проводилась с данным экипажем давно или вообще не проводилась. Это, в свою очередь, вызывает необходимость корректировки деятельности экипажа в аварийных ситуациях, эксплуатационной документации и бортовых инструкций экипажа.

Внешний вид и интерьер макета ПКА наземных тренажеров по отделке, освещенности, расположению оборудования, органов управления соответствуют штатному изделию, однако в процессе полета интерьер станции может изменяться из-за установки экспериментального оборудования, временного размещения оборудования на хранение, перемещения экипажем отдельных элементов оборудования по указанию ЦУПа и т.д. Так, в период с 1-й по 46-ю экспедицию МКС зафиксировано более 100 сообщений от экипажей, уточняющих местоположение используемого в аварийных ситуациях оборудования.

Из анализа приведенных причин снижения уровня подготовленности следует, что в процессе полета необходимо проводить дополнительную подготовку космонавтов на борту КС. Этап подготовки космонавтов на борту – S_4 .

На этапе S_4 решаются следующие задачи подготовки к действиям в аварийных ситуациях:

- восстановление навыков выполнения действий при аварийных ситуациях на КС с отработкой функций членов экипажа и центров управления;
- отработка умения ориентироваться в реальном предметном пространстве орбитального комплекса в части выполнения операций с оборудованием, используемым в аварийной ситуации;
- отработка практических навыков использования средств индивидуальной защиты в условиях невесомости;
- отработка практических навыков ведения связи и координации действий с центрами управления;
- отработка навыков групповой работы для данного состава экипажа при выполнении действий по сценарию аварийной ситуации;
- восстановление умения оценивать изменения параметров объекта при развитии аварийной ситуации и оперативно принимать правильные решения.

Выполнение вышеуказанных задач позволит экипажу восстановить и поддержать уровень подготовленности.

На рисунке 1 показан график поддержания уровня подготовленности Р экипажа (восстановление навыка) с помощью бортовых тренировок.

- 0–1 – этап приобретения навыков;
- 2 – начальный уровень подготовленности сохраняется до этой точки, затем начинает снижаться;
- 3 – в этой точке снижение уровня подготовленности достигает границы допустимого предела, поэтому на участке 3–4 проводится тренировка для восстановления навыков;
- 4 – уровень подготовленности восстановлен.

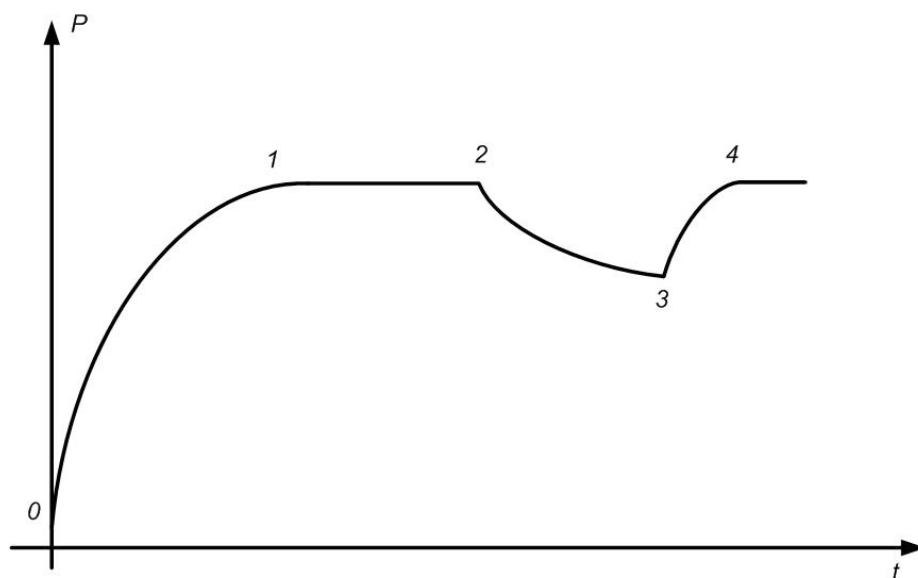


Рис. 1. График динамики уровня подготовленности экипажа

В соответствии с исследованиями надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») [7] для сложных психомоторных задач участок 1–2 составляет 1 месяц, участок 2–3 составляет 1–2 месяца. Своевременное проведение бортовой тренировки позволяет поддержать или восстановить навык и, таким образом, обеспечить профилактику ошибочных действий экипажа, что повышает эффективность и безопасность полета в целом.

До 1990 г. тренировки по аварийным ситуациям на борту проводились без использования тренажеров с применением идеомоторного метода, при котором все действия экипажа воспроизводятся в уме.

В целом, идеомоторная подготовка позволяла выработать установку на воображаемую ситуацию и создать такое отношение к ней, какое бы имело место, если бы эта ситуация была реальной.

Однако этот метод имеет ряд недостатков:

- отсутствие возможности отработки навыка распознавания ситуации экипажем по информационной модели;
- отсутствие ответной реакции органов управления;
- отсутствие эффекта неожиданности, т.к. параметры развития ситуации известны тренируемым.

Современный этап проведения бортовых тренировок характеризуется созданием бортового тренажера нового типа, в разработке которого авторы принимали непосредственное участие. В РКК «Энергия» первый бортовой тренажер по действиям в аварийных ситуациях был разработан для станции

«Мир» в 90-е годы (С.В. Бронников, Л.Г. Шевченко, О.С. Ромашков). Затем были разработаны различные модификации тренажера, отличающиеся объемом моделируемых параметров, типом интерфейса пользователя [2–4]. На МКС в настоящее время используется бортовой тренажер, разработанный НАСА в 2012 г. (Р. Дэвис, Л. Маккаллоу, К. Болт, С. Сегади и др.) при участии партнеров по МКС, в том числе авторов настоящей статьи. Отличительной особенностью данного тренажера является то, что реальный объект – МКС – включен в тренировочный процесс. Экипаж отрабатывает процедуру ликвидации аварийной ситуации, перемещаясь по определенному маршруту.

Бортовой тренажер содержит математическую модель систем и оборудования, используемых при ликвидации аварийных ситуаций. Тренажер включает в себя следующие технические средства:

- бортовой файл-сервер;
- компьютерные средства экипажа;
- средства связи «борт–Земля»;
- бортовую беспроводную сеть;
- наземный файл-сервер;
- интерфейсные средства персонала управления;
- интерфейсные средства инструкторов;
- сеть Интернет.

На рисунке 2 показана структура тренажера.

Структура тренажера имеет три уровня:

– уровень экипажа, включающий в себя бортовой сервер, обеспечивающий распределение данных на интерфейсные средства членов экипажа и передачу данных на наземный сервер через привлекаемые средства связи;

– уровень персонала управления, включающий в себя наземный сервер, обеспечивающий прием данных с бортового сервера и распределение данных через привлекаемые средства связи на интерфейсные средства персонала управления, участвующего в процессе тренировки и передачу данных на бортовой сервер;

– уровень инструктора, обеспечивающий контроль инструкторами выполненных экипажем действий и выдачу команд по управлению тренировкой.

Программное обеспечение тренажера позволяет в реальном времени имитировать параметры развития аварийной ситуации на борту КС. Результаты моделирования отображаются на виртуальных приборных панелях, содержащих приборы, индикаторы и органы управления реального объекта. Члены экипажа имеют возможность «перемещаться» по модели КС и находиться во время тренировки в разных отсеках. При приближении к оборудованию, с которым требуется выполнить определенные действия, космонавт выполняет действие на экране мобильного компьютера. Данные с мобильного компьютера через беспроводную сеть поступают в бортовой сервер, на котором моделируется состояние КС, с учетом действий, выполненных экипажем.

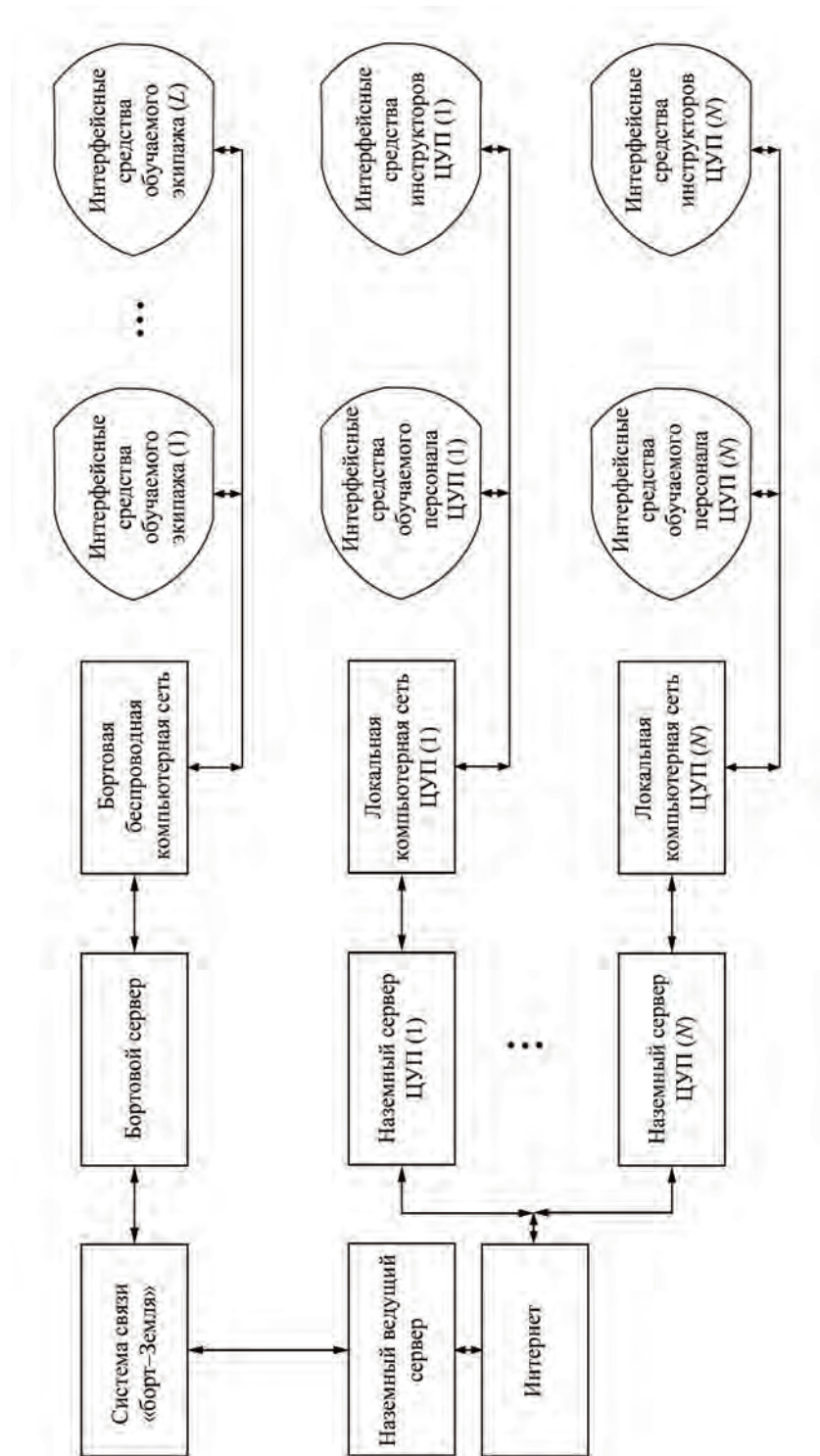


Рис. 2. Структура тренажера

Бортовой сервер с помощью средств связи «борт–Земля» передает состояние модели КС в наземный сервер. Персонал ЦУПа получает информацию о моделируемом состоянии КС на штатных средствах отображения и выполняет предписанные ему действия, взаимодействуя с экипажем с помощью штатных средств связи. Действия персонала ЦУПа и инструкторов с наземного сервера передаются в бортовой сервер, на котором моделируется состояние КС с учетом действий экипажа, персонала ЦУПа и инструкторов.

Используемый подход создания тренажера предполагает широкое применение технологий удаленного доступа к приложениям и ресурсам, который позволяет существенно упростить и унифицировать обмен данными, образуя единую имитационную среду. Отличительным достоинством данного подхода являются минимальные требования к пользовательскому оборудованию, т.к. используются покупные компьютерные средства и сеть Интернет.

С помощью такой архитектуры обеспечиваются:

- проектирование программного обеспечения в форме взаимодействующих сервисов;
- развитие принципа модульной разработки отдельных блоков;
- использование программного обеспечения, объединяющего сервисы в единое логическое и связанное приложение;
- сокращение сроков создания тренажера;
- сохранение ресурсов и сокращение стоимости тренажера;
- непрерывное развитие средств тренажера;
- коллективное использование тренажера через интернет-ресурсы.

Методика подготовки космонавтов в полете включает в себя следующие тренировки:

- тренировка по ознакомлению с оборудованием, используемым в аварийных ситуациях на КС;
- тренировка по использованию аварийной маски;
- тренировка для поддержания навыков действий экипажа в аварийных ситуациях;
- тренировка по особенностям действий в аварийных ситуациях после прихода нового корабля/модуля.

Такой комплекс бортовых тренировок по действиям в аварийных ситуациях позволяет восстановить следующие знания и навыки экипажа:

- знание стратегии действий в аварийных ситуациях;
- знание порядка и правил обеспечения безопасности экипажа;
- знание распределения функций и обязанностей при реагировании на аварийную ситуацию;
- знание структуры и содержания бортовых процедур по действиям в аварийных ситуациях;
- знание последовательности первоначальных действий;
- знание порядка действий при изоляции отсека/модуля;
- знание мест размещения оборудования, используемого при аварийных ситуациях;

- навыки взаимодействия между членами экипажа;
- навыки организации и ведения связи в аварийной ситуации;
- навыки выполнения бортовых процедур в соответствии с заданным сценарием аварийной ситуации;
- навыки ведения связи в надетых средствах защиты;
- навыки определения резервного времени;
- навыки считывания информации пультов КС и форматов бортового компьютера;
- умение организовать свою деятельность в условиях аварийной ситуации, в том числе при отсутствии связи с Землей;
- умение оценивать изменение параметров объекта при развитии аварийной ситуации и оперативно принимать правильные решения.

Выводы

Представленная сформированная в процессе многолетних исследований и развития методика подготовки космонавтов к действиям в аварийных ситуациях при выполнении длительных космических полетов позволяет повысить качество подготовки в ходе полета и снизить затраты на подготовку за счет использования тренажера нового типа, создаваемого на базе коммерческого оборудования и привлекаемых систем КС. Описанный подход может найти применение в других отраслях, в которых имеется необходимость поддержания готовности оперативного персонала к действиям при возникновении аварийных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров А.П., Бронников С.В. Пути повышения эффективности в деятельности экипажа космического аппарата // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2005. – № 1. – С. 11–16.
- [2] Бронников С.В., Рожкова И.А. Тренажер аварийных ситуаций // Доклад на XLIV научных чтениях памяти К.Э. Циолковского, Калуга 15–17 сентября, 2009. – С. 100–101.
- [3] Проведение тренировок и обучения космонавтов на борту орбитального комплекса «МИР» по радиоканалам межкомпьютерного обмена информацией / С.В. Бронников, С.Н. Самбуров, Л.Г. Шевченко, М.В. Тюрин // XXXI Научные чтения, посвященные разработке творческого наследия К.Э. Циолковского (Калуга, 17–20 сентября 1996 г.). – С. 145.
- [4] Развитие системы бортовых тренажеров пилотируемых орбитальных станций / Бронников С.В., Сальницкий В.П., Шевченко Л.Г. // Сб. материалов научно-технического семинара. – Вып. 4. Технические средства и технологии построения тренажеров. – 10–11 октября 2002, Звездный городок. – С. 129–130.
- [5] Ломов Б.Ф. Человек и техника: Очерки инженерной психологии / Б.Ф. Ломов. – М.: Книга по требованию, 2012. – 464 с.

- [6] Психодиагностический комплекс-тренажер для оценки и прогнозирования надежности профессиональной деятельности космонавта / Сальницкий В.П., Бронников С.В., Городецкий И.Г. // Приборы. – 2008. – № 4. – С. 23–28.
- [7] Исследование надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») / Сальницкий В.П., Мясников В.И., Бобров А.Ф., Шевченко Л.Г., Дудукин А.В. // Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина. – Т. 2. Медико-биологические эксперименты. – М.: ГНЦ РФ–ИМБП РАН, 2002. – С. 285–300.
- [8] Справочник по безопасности космических полетов / Г.Т. Береговой [и др.]. – М.: Машиностроение, 1998. – 337 с.

REFERENCE

- [1] Alexandrov A.P., Bronnikov S.V. How to Improve the Efficiency of a Spacecraft Crew's Activity // Polyot. All-Russian Scientific and Technical Journal. – 2005. – No 1. – pp. 11–16.
- [2] Bronnikov S.V., Rozhkova I.A. Emergency Simulator // Report of the XLIV Scientific Readings of the Memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 15–17, 2009. – pp. 100–101.
- [3] Implementation of Training the Cosmonauts Aboard the «MIR» Orbital Complex Via Radio Channels of Intercomputer Information Exchange / S.V. Bronnikov, S.N. Samburov, L.G. Shevchenko, M.V. Tyurin // XXXI Scientific Readings Devoted to Development of Creative Heritage of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 17–20, 1996). – 145 p.
- [4] Development of Onboard Training Simulators for Manned Orbital Stations / Bronnikov S.V., Salnitsky V.P., Shevchenko L.G. // Coll. of Proceedings of the Scientific and Technical Workshop. – Issue 4. Technical Facilities and Technologies for Constructing Simulators. – October 10–11, 2002, 3Star City. – 129–130 pp.
- [5] Lomov B.F. Man and Technology: Essays on Engineering Psychology / B.F. Lomov – Moscow: Book on demand, 2012. – 464 p.
- [6] Psychodiagnostic Complex-Simulator for Evaluating and Predicting the Reliability of a Cosmonaut's Professional Activity / Salnitsky V.P., Bronnikov S.V., Gorodetsky I.G. // Pribory. – 2008. – No 4. – 23–28 pp.
- [7] Study of Reliability of a Cosmonaut's Activity at Different Stages of a Space Flight (Experiment «Pilot») / Salnitsky V.P., Myasnikov V.I., Bobrov A.F., Shevchenko L.G., Dudukin A.V. // «Mir» Orbital Station. Space Biology and Medicine. – Vol. 2. Medical and Biological Experiments. – Moscow: GNTs RF–IMBP RAS, 2002. – pp. 285–300.
- [8] A Guide to the Space Flight Safety / G.T. Beregovoy [and others]. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1998.

УДК 629.782

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ
СПУСКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

М.А. Джабаров, Н.Е. Зубов

М.А. Джабаров; докт. техн. наук, профессор Н.Е. Зубов
(ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва)

Для математической модели шестого порядка получено аналитическое решение задачи отслеживания пространственной программной траектории спуска космического аппарата в атмосфере Земли при управлении по крену. Для этого с использованием метода точного размещения полюсов синтезирован регулятор по состоянию. Приведены результаты численного моделирования отслеживания программной траектории на всем протяжении спуска от момента входа в атмосферу и до раскрытия парашютов системы посадки.

Ключевые слова: космический аппарат, спуск, атмосфера Земли, номинальная траектория, закон управления.

On One Approach to the Solution of the Spacecraft Descent Problem in the Earth's Atmosphere. M.A. Dzhabarov, N.E. Zubov

The analytical solution to the problem of tracking the spatial program trajectory of spacecraft descent in the Earth's atmosphere under roll control was obtained for the sixth-order mathematical model. For this purpose, a regulator is developed using the poles precise placement method. The numerical simulation results of the program trajectory tracking during the entire descent from the entering the atmosphere moment to the parachute landing system opening are presented.

Keywords: spacecraft, descent, Earth's atmosphere, nominal trajectory, control law.

Задача управления спуском космического аппарата (КА) в атмосфере Земли чрезвычайно актуальна, поскольку из всех этапов полета КА спуск остается самым динамически нагруженным режимом. В этом случае главной задачей является обеспечение заданных значений перегрузки и тепловых режимов, а также обеспечение посадки в заданном районе или в заданной точке поверхности Земли. Основными направлениями исследований является синтез управлений на основании прогноза точки посадки [1–3] или отслеживание программной траектории продольного движения [2]. Данная работа посвящена аналитическому синтезу высокоточной обратной связи, позволяющей осуществлять отслеживание пространственной программной траектории спуска на протяжении всей траектории полета. В такой постановке указанная задача спуска ранее никем не решалась.

Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу без учета вращения Земли имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &= -g \sin \theta - \frac{c_x S \rho V^2}{2m}, \\
 \dot{\theta} &= \frac{g}{V} \left(\frac{V^2}{rg} - 1 \right) \cos \theta + \frac{c_y S \rho V}{2m} \cos u, \\
 \dot{r} &= V \sin \theta, \\
 \dot{\eta} &= -\frac{V}{r} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \cos \eta + \frac{c_y S \rho V}{2m \cos \theta} \sin u, \\
 \dot{\varphi} &= \frac{V}{r} \cos \theta \sin \eta, \\
 \dot{\lambda} &= \frac{V}{r \cos \varphi} \cos \theta \cos \eta.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь V – текущая скорость движения КА, θ – угол наклона траектории, r – расстояние от центра Земли до центра масс КА, g – гравитационное ускорение, m – масса КА, ρ – плотность атмосферы, c_x – коэффициент лобового сопротивления, S – площадь мидела, c_y – коэффициент подъемной силы, η – угол курса, φ – широта, λ – долгота места нахождения КА, $u = \gamma$ – управление.

Предполагается, что все состояния (1) доступны для непосредственного наблюдения.

Запишем систему уравнений (1) в форме пространства состояний

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \tag{2}$$

где $\mathbf{x} = (V \ \theta \ r \ \eta \ \varphi \ \lambda)^T$ – вектор состояния КА; $\mathbf{u} = \gamma$ – скалярное управление,

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} -g \sin \theta - \frac{c_x S \rho V^2}{2m} \\ \frac{g}{V} \left(\frac{V^2}{rg} - 1 \right) \cos \theta + \frac{c_y S \rho V}{2m} \cos u \\ V \sin \theta \\ -\frac{V}{r} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \cos \eta + \frac{c_y S \rho V}{2m \cos \theta} \sin u \\ \frac{V}{r} \cos \theta \sin \eta \\ \frac{V}{r \cos \varphi} \cos \theta \cos \eta \end{pmatrix}.$$

Для решения задачи отслеживания опорной траектории спуска линеаризуем систему уравнений (2) с учетом отклонений в окрестности базового решения и применим метод точного размещения полюсов, который позволяет получить аналитическое решение для формирования компенсирующего управления.

В результате будем иметь

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta u, \quad (3)$$

где $\Delta \mathbf{x} = (\Delta V \ \Delta \theta \ \Delta r \ \Delta \eta \ \Delta \varphi \ \Delta \lambda)^\top$ – вектор состояния КА в отклонениях от номинальной траектории; $\Delta u = \Delta \gamma$ – скалярное компенсирующее управление,

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & 0 & 0 \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial u} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \\ 0 \\ b_{41} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Элементы матриц (4), (5) системы (3) определяются следующим образом

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{c_x S \rho V}{m}, a_{12} = -g \cos \theta, a_{21} = \left(\frac{1}{r} + \frac{g}{V^2} \right) \cos \theta + \frac{c_y S \rho}{2m} \cos u, a_{22} = \frac{g}{V} \left(1 - \frac{V^2}{rg} \right) \sin \theta, \\ a_{23} &= -\frac{V}{r^2} \cos \theta, a_{31} = \sin \theta, a_{32} = V \cos \theta, a_{41} = \frac{c_y S \rho}{2m \cos \theta} \sin u - \frac{1}{r} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \cos \eta, \\ a_{42} &= \frac{V}{r} \operatorname{tg} \varphi \sin \theta \cos \eta + \frac{c_y S \rho V \sin \theta}{2m \cos^2 \theta} \sin u, a_{43} = \frac{V}{r^2} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \cos \eta, a_{44} = \frac{V}{r} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \sin \eta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{45} &= -\frac{V}{r} \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cos \theta \cos \eta, a_{51} = \frac{1}{r} \cos \theta \sin \eta, a_{52} = -\frac{V}{r} \sin \theta \sin \eta, \\
a_{53} &= -\frac{V}{r^2} \cos \theta \sin \eta, a_{54} = \frac{V}{r} \cos \theta \cos \eta, a_{61} = \frac{1}{r \cos \varphi} \cos \theta \cos \eta, \\
a_{62} &= -\frac{V}{r \cos \varphi} \sin \theta \cos \eta, a_{63} = -\frac{V}{r^2 \cos \varphi} \cos \theta \cos \eta, a_{64} = -\frac{V}{r \cos \varphi} \cos \theta \sin \eta, \\
a_{65} &= \frac{V}{r \cos \varphi} \operatorname{tg} \varphi \cos \theta \cos \eta, \\
b_{21} &= -\frac{c_y S \rho V}{2m} \sin u, b_{41} = \frac{c_y S \rho V}{2m \cos \theta} \cos u.
\end{aligned}$$

Размещение полюсов. Задача размещения полюсов или назначения собственных значений в линейных динамических системах в той или иной постановке рассматривается во многих работах, например, [4–6].

Для системы (3) введем обозначения $\mathbf{z} = \Delta \mathbf{x}$, $\mathbf{u} = \Delta \mathbf{u}$ и рассмотрим линейную стационарную многомерную динамическую систему

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (6)$$

где $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния; $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ – вектор управления; \mathbb{R} – множество действительных чисел; $n > r$.

Считается, что для системы (6) существует управление с обратной связью вида

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{z}, \quad (7)$$

где $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{r \times n}$ – матрица регулятора по состоянию.

Управление системой (6) с помощью закона (7) является классической задачей, когда необходимо найти такую матрицу \mathbf{K} , что обеспечиваются некоторые заданные требования к процессу управления.

Требования на распределение полюсов зададим с помощью разложения полинома на множители, например,

$$\det(\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_n), \quad (8)$$

где \mathbf{I}_n – единичная матрица n -го порядка; λ_i – заданные значения корней полинома (собственные значения матрицы $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$).

Рассмотрим эффективный метод решения задачи полного размещения полюсов [4–6] системы *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*) (6), в основе которого лежит декомпозиция матрицы \mathbf{A} модели исходной системы.

Пусть $\mathbf{B}^{\perp T} = \text{null}(\mathbf{B}^T)$ – полуортогональная матрица (матричный делитель нуля), удовлетворяющая условиям [4]

$$\mathbf{B}^{\perp} \mathbf{B} = \mathbf{0}_{(n-r) \times r}, \quad (9)$$

$$\mathbf{B}^{\perp} \mathbf{B}^{\perp T} = \mathbf{I}_{n-r}, \quad (10)$$

здесь $\text{null}(\cdot)$ – оператор вычисления полуортогонального матричного делителя нуля; $\mathbf{0}_{(n-r) \times r}$ – нулевая матрица размера $(n-r) \times r$.

Найдем \mathbf{B}^+ – псевдообратную матрицу Мура–Пенроуза:

$$\mathbf{B} \mathbf{B}^+ \mathbf{B} = \mathbf{B}, \quad \mathbf{B}^+ \mathbf{B} \mathbf{B}^+ = \mathbf{B}^+, \quad (\mathbf{B}^+ \mathbf{B})^m = \mathbf{B}^+ \mathbf{B}, \quad (\mathbf{B} \mathbf{B}^+)^m = \mathbf{B} \mathbf{B}^+.$$

Введем *многоуровневую декомпозицию* системы (6), представляемую парой матриц (\mathbf{A}, \mathbf{B}) , где $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$, $\mathbf{B} \in R^{n \times m}$.

Нулевой (исходный) уровень

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}, \quad \mathbf{B}_0 = \mathbf{B}. \quad (11)$$

Первый уровень

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp} \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0^{\perp T}, \quad \mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_0^{\perp} \mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0. \quad (12)$$

L-й (конечный) уровень, $L = \text{ceil}(n/r) - 1$,

$$\mathbf{A}_L = \mathbf{B}_{L-1}^{\perp} \mathbf{A}_{L-1} \mathbf{B}_{L-1}^{\perp T}, \quad \mathbf{B}_L = \mathbf{B}_{L-1}^{\perp} \mathbf{A}_{L-1} \mathbf{B}_{L-1}, \quad (13)$$

где $\text{ceil}(\cdot)$ – операция округления числа в сторону большего значения, например, $\text{ceil}(0,1) = 1$, $\text{ceil}(1,6) = 2$, $\text{ceil}(2,01) = 3$ и т.д.

Без ограничения общности будем считать, что все матрицы \mathbf{B}_i в (11)–(13) являются матрицами полного ранга по столбцам.

Тогда справедливо следующее утверждение. Если система (6) полностью управляемая [4] и матрица $\mathbf{K} \in R^{n \times m}$ удовлетворяет формулам

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 = \mathbf{B}_0^- \mathbf{A} - \Phi_0 \mathbf{B}_0^-, \quad \mathbf{B}_0^- = \mathbf{K}_1 \mathbf{B}_0^{\perp} + \mathbf{B}_0^+, \quad (14)$$

$$\mathbf{K}_1 = \mathbf{B}_1^- \mathbf{A}_1 - \Phi_1 \mathbf{B}_1^-, \quad \mathbf{B}_1^- = \mathbf{K}_2 \mathbf{B}_1^{\perp} + \mathbf{B}_1^+, \dots \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_L = \mathbf{B}_L^- \mathbf{A}_L - \Phi_L \mathbf{B}_L^-, \quad (16)$$

тогда

$$\text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{BK}) = \bigcup_{i=1}^{L+1} \text{eig}(\Phi_{i-1}), \quad (17)$$

где $\text{eig}(\cdot)$ – оператор вычисления собственных значений матрицы; Φ_i – заданные матрицы, объединение множеств собственных значений которых дает спектр (17) замкнутой системы

$$\dot{z}(t) = (A - BK)z(t). \quad (18)$$

Синтез закона управления для отслеживания программной траектории спуска космического аппарата в атмосфере. Рассмотрим использование приведенного метода синтеза регулятора, обеспечивающего заданное размещение полюсов, применительно к задаче минимизации отклонения от опорной траектории спуска космического аппарата, описываемого моделью (3), (4), (5). Поскольку размерность вектора состояния равна 6, а управление является скаляром, т.е. $r = 1$, то будем иметь $L = \text{ceil}(n/r) - 1 = 6 - 1 = 5$ шесть уровней декомпозиции (нулевой, первый, второй, третий, четвертый, пятый).

Будем считать, что заданный характеристический полином (8) замкнутой системы (18) имеет вид

$$\det(\lambda I_6 - A + BK) = (\lambda - \tilde{\lambda}_1) (\lambda - \tilde{\lambda}_6) = \prod (\lambda - \tilde{\lambda}), \quad (19)$$

где числа $\tilde{\lambda}_i$ заданы исходя из определенных требований.

Используя выражения (11)–(16) с учетом (3), (4), (5) и задавая матрицы $\Phi = \Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_5$ в следующем виде:

$$\Phi_0 = \lambda_0, \Phi_1 = \lambda_1, \Phi_2 = \lambda_2, \Phi_3 = \lambda_3, \Phi_4 = \lambda_4, \Phi_5 = \lambda_5 \quad (20)$$

для первого уровня декомпозиции имеем:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11}^1 & 0 & a_{13}^1 & 0 & 0 \\ a_{21}^1 & 0 & a_{23}^1 & 0 & 0 \\ a_{31}^1 & a_{32}^1 & a_{33}^1 & a_{34}^1 & 0 \\ a_{41}^1 & a_{42}^1 & a_{43}^1 & 0 & 0 \\ a_{51}^1 & a_{52}^1 & a_{53}^1 & a_{54}^1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} b_{11}^1 \\ b_{21}^1 \\ b_{31}^1 \\ b_{41}^1 \\ b_{51}^1 \end{bmatrix}, B_1^\perp = \begin{bmatrix} -\frac{b_{21}^1}{b_{11}^1} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{b_{31}^1}{b_{11}^1} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{b_{41}^1}{b_{11}^1} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{b_{51}^1}{b_{11}^1} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_1^{\perp-} = B_1^{\perp+} = \begin{bmatrix} b_{11}^{1\perp T} & b_{12}^{1\perp T} & b_{13}^{1\perp T} & b_{14}^{1\perp T} \\ b_{21}^{1\perp T} & b_{22}^{1\perp T} & b_{23}^{1\perp T} & b_{24}^{1\perp T} \\ b_{31}^{1\perp T} & b_{32}^{1\perp T} & b_{33}^{1\perp T} & b_{34}^{1\perp T} \\ b_{41}^{1\perp T} & b_{42}^{1\perp T} & b_{43}^{1\perp T} & b_{44}^{1\perp T} \\ b_{51}^{1\perp T} & b_{52}^{1\perp T} & b_{53}^{1\perp T} & b_{54}^{1\perp T} \end{bmatrix}, B_1^+ = [b_{11}^{1+} \quad b_{12}^{1+} \quad b_{13}^{1+} \quad b_{14}^{1+} \quad b_{15}^{1+}].$$

Здесь

$$a_{11}^1 = a_{11}, a_{13}^1 = a_{12} b_{23}^{0\perp T}, a_{21}^1 = a_{31}, a_{23}^1 = a_{32} b_{23}^{0\perp T}, a_{31}^1 = a_{41} - \frac{a_{21} b_{41}}{b_{21}}, a_{32}^1 = a_{43} - \frac{a_{23} b_{41}}{b_{21}},$$

$$a_{33}^1 = a_{44} b_{43}^{0\perp T} + b_{23}^{0\perp T} \left(a_{42} - \frac{a_{22} b_{41}}{b_{21}} \right), a_{34}^1 = a_{45}, a_{41}^1 = a_{51}, a_{42}^1 = a_{53}, a_{43}^1 = a_{52} b_{23}^{0\perp T} + a_{54} b_{43}^{0\perp T},$$

$$a_{51}^1 = a_{61}, a_{52}^1 = a_{63}, a_{53}^1 = a_{62} b_{23}^{0\perp T} + a_{64} b_{43}^{0\perp T}, a_{54}^1 = a_{65},$$

$$b_{11}^1 = a_{12} b_{21}, b_{21}^1 = a_{32} b_{21}, b_{31}^1 = a_{42} b_{21} - a_{22} b_{41} + a_{44} b_{41},$$

$$b_{41}^1 = a_{52} b_{21} + a_{54} b_{41}, b_{51}^1 = a_{62} b_{21} + a_{64} b_{41},$$

$$b_{11}^{1\perp T} = -\frac{b_{11}^1 b_{21}^1}{c_1}, b_{12}^{1\perp T} = -\frac{b_{11}^1 b_{31}^1}{c_1}, b_{13}^{1\perp T} = -\frac{b_{11}^1 b_{41}^1}{c_1}, b_{14}^{1\perp T} = -\frac{b_{11}^1 b_{51}^1}{c_1},$$

$$b_{21}^{1\perp T} = 1 - \frac{(b_{21}^1)^2}{c_1}, b_{22}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{31}^1}{c_1}, b_{23}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{41}^1}{c_1}, b_{24}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{51}^1}{c_1},$$

$$b_{31}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{31}^1}{c_1}, b_{32}^{1\perp T} = 1 - \frac{(b_{31}^1)^2}{c_1}, b_{33}^{1\perp T} = -\frac{b_{31}^1 b_{41}^1}{c_1}, b_{34}^{1\perp T} = -\frac{b_{31}^1 b_{51}^1}{c_1},$$

$$b_{41}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{41}^1}{c_1}, b_{42}^{1\perp T} = -\frac{b_{31}^1 b_{41}^1}{c_1}, b_{43}^{1\perp T} = 1 - \frac{(b_{41}^1)^2}{c_1}, b_{44}^{1\perp T} = -\frac{b_{41}^1 b_{51}^1}{c_1},$$

$$b_{51}^{1\perp T} = -\frac{b_{21}^1 b_{51}^1}{c_1}, b_{52}^{1\perp T} = -\frac{b_{31}^1 b_{51}^1}{c_1}, b_{53}^{1\perp T} = -\frac{b_{41}^1 b_{51}^1}{c_1}, b_{54}^{1\perp T} = 1 - \frac{(b_{51}^1)^2}{c_1},$$

$$c_1 = (b_{11}^1)^2 + (b_{21}^1)^2 + (b_{31}^1)^2 + (b_{41}^1)^2 + (b_{51}^1)^2,$$

$$b_{11}^{1+} = \frac{b_{11}^1}{c_1}, b_{12}^{1+} = \frac{b_{21}^1}{c_1}, b_{13}^{1+} = \frac{b_{31}^1}{c_1}, b_{14}^{1+} = \frac{b_{41}^1}{c_1}, b_{15}^{1+} = \frac{b_{51}^1}{c_1}.$$

Соответственно для второго уровня декомпозиции необходимые матрицы выглядят следующим образом:

$$A^2 = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{14}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{24}^2 \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & a_{34}^2 \\ a_{41}^2 & a_{42}^2 & a_{43}^2 & a_{44}^2 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} b_{11}^2 \\ b_{21}^2 \\ b_{31}^2 \\ b_{41}^2 \end{bmatrix}, B_2^\perp = \begin{bmatrix} -\frac{b_{21}^2}{b_{11}^2} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{b_{31}^2}{b_{11}^2} & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{b_{41}^2}{b_{11}^2} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где

$$a_{11}^2 = b_{11}^{1\perp T} \left(a_{21}^1 - \frac{a_{11}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right) + b_{31}^{1\perp T} \left(a_{23}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$a_{12}^2 = b_{12}^{1\perp T} \left(a_{21}^1 - \frac{a_{11}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right) + b_{32}^{1\perp T} \left(a_{23}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$a_{13}^2 = b_{13}^{1\perp T} \left(a_{21}^1 - \frac{a_{11}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right) + b_{33}^{1\perp T} \left(a_{23}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$a_{14}^2 = b_{14}^{1\perp T} \left(a_{21}^1 - \frac{a_{11}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right) + b_{34}^{1\perp T} \left(a_{23}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$a_{21}^2 = a_{31}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{32}^1 b_{21}^{1\perp T} + a_{33}^1 b_{31}^{1\perp T} + a_{34}^1 b_{41}^{1\perp T} - \frac{b_{31}^1 (a_{11}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{31}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{22}^2 = a_{31}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{32}^1 b_{22}^{1\perp T} + a_{33}^1 b_{32}^{1\perp T} + a_{34}^1 b_{42}^{1\perp T} - \frac{b_{31}^1 (a_{11}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{32}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{23}^2 = a_{31}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{32}^1 b_{23}^{1\perp T} + a_{33}^1 b_{33}^{1\perp T} + a_{34}^1 b_{43}^{1\perp T} - \frac{b_{31}^1 (a_{11}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{33}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{24}^2 = a_{31}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{32}^1 b_{24}^{1\perp T} + a_{33}^1 b_{34}^{1\perp T} + a_{34}^1 b_{44}^{1\perp T} - \frac{b_{31}^1 (a_{11}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{34}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{31}^2 = a_{41}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{42}^1 b_{21}^{1\perp T} + a_{43}^1 b_{31}^{1\perp T} - \frac{b_{41}^1 (a_{11}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{31}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{32}^2 = a_{41}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{42}^1 b_{22}^{1\perp T} + a_{43}^1 b_{32}^{1\perp T} - \frac{b_{41}^1 (a_{11}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{32}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{33}^2 = a_{41}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{42}^1 b_{23}^{1\perp T} + a_{43}^1 b_{33}^{1\perp T} - \frac{b_{41}^1 (a_{11}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{33}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{34}^2 = a_{41}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{42}^1 b_{24}^{1\perp T} + a_{43}^1 b_{34}^{1\perp T} - \frac{b_{41}^1 (a_{11}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{34}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{41}^2 = a_{51}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{52}^1 b_{21}^{1\perp T} + a_{53}^1 b_{31}^{1\perp T} + a_{54}^1 b_{41}^{1\perp T} - \frac{b_{51}^1 (a_{11}^1 b_{11}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{31}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{42}^2 = a_{51}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{52}^1 b_{22}^{1\perp T} + a_{53}^1 b_{32}^{1\perp T} + a_{54}^1 b_{42}^{1\perp T} - \frac{b_{51}^1 (a_{11}^1 b_{12}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{32}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{43}^2 = a_{51}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{52}^1 b_{23}^{1\perp T} + a_{53}^1 b_{33}^{1\perp T} + a_{54}^1 b_{43}^{1\perp T} - \frac{b_{51}^1 (a_{11}^1 b_{13}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{33}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$a_{44}^2 = a_{51}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{52}^1 b_{24}^{1\perp T} + a_{53}^1 b_{34}^{1\perp T} + a_{54}^1 b_{44}^{1\perp T} - \frac{b_{51}^1 (a_{11}^1 b_{14}^{1\perp T} + a_{13}^1 b_{34}^{1\perp T})}{b_{11}^1},$$

$$b_{11}^2 = a_{21}^1 b_{11}^1 - a_{11}^1 b_{21}^1 + b_{31}^1 \left(a_{23}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{21}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$b_{21}^2 = a_{31}^1 b_{11}^1 - a_{11}^1 b_{31}^1 + a_{32}^1 b_{21}^1 + a_{34}^1 b_{41}^1 + b_{31}^1 \left(a_{33}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{31}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$b_{31}^2 = a_{41}^1 b_{11}^1 - a_{11}^1 b_{41}^1 + a_{42}^1 b_{21}^1 + b_{31}^1 \left(a_{43}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{41}^1}{b_{11}^1} \right),$$

$$b_{41}^2 = a_{51}^1 b_{11}^1 - a_{11}^1 b_{51}^1 + a_{52}^1 b_{21}^1 + a_{54}^1 b_{41}^1 + b_{31}^1 \left(a_{53}^1 - \frac{a_{13}^1 b_{51}^1}{b_{11}^1} \right).$$

При этом

$$B_2^{\perp-} = B_2^{\perp+} = \begin{bmatrix} -\frac{b_{11}^2 b_{21}^2}{c_2} & -\frac{b_{11}^2 b_{31}^2}{c_2} & -\frac{b_{11}^2 b_{41}^2}{c_2} \\ 1 - \frac{(b_{21}^2)^2}{c_2} & -\frac{b_{21}^2 b_{31}^2}{c_2} & -\frac{b_{21}^2 b_{41}^2}{c_2} \\ -\frac{b_{21}^2 b_{31}^2}{c_2} & 1 - \frac{(b_{31}^2)^2}{c_2} & -\frac{b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2} \\ -\frac{b_{21}^2 b_{41}^2}{c_2} & -\frac{b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2} & 1 - \frac{(b_{41}^2)^2}{c_2} \end{bmatrix}, B_2^+ = [b_{11}^{2+} \quad b_{12}^{2+} \quad b_{13}^{2+} \quad b_{14}^{2+}].$$

Здесь

$$c_2 = (b_{11}^2)^2 + (b_{21}^2)^2 + (b_{31}^2)^2 + (b_{41}^2)^2$$

$$b_{11}^{2+} = \frac{b_{11}^2}{c_2}, b_{12}^{2+} = \frac{b_{21}^2}{c_2}, b_{13}^{2+} = \frac{b_{31}^2}{c_2}, b_{14}^{2+} = \frac{b_{41}^2}{c_2}.$$

Матрицы третьего уровня декомпозиции равны

$$A_3 = \begin{bmatrix} a_{11}^3 & a_{12}^3 & a_{13}^3 \\ a_{21}^3 & a_{22}^3 & a_{23}^3 \\ a_{31}^3 & a_{32}^3 & a_{33}^3 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} b_{11}^3 \\ b_{21}^3 \\ b_{31}^3 \end{bmatrix},$$

$$a_{11}^3 = \frac{a_{22}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{41}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2 - a_{12}^2 (b_{11}^2)^2 b_{21}^2 - a_{21}^2 (b_{11}^2)^2 b_{21}^2 - a_{12}^2 b_{21}^2 (b_{31}^2)^2 + a_{22}^2 b_{11}^2 (b_{31}^2)^2}{c_2} +$$

$$+ \frac{a_{13}^2 (b_{21}^2)^2 b_{31}^2 - a_{12}^2 b_{21}^2 (b_{41}^2)^2 + a_{22}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 + a_{14}^2 (b_{21}^2)^2 b_{41}^2 - a_{23}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 - a_{24}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{12}^3 = - \frac{a_{13}^2 (b_{21}^2)^3 - a_{23}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{13}^2 (b_{11}^2)^2 b_{21}^2 - a_{23}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2 + a_{21}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2 - a_{12}^2 (b_{21}^2)^2 b_{31}^2}{c_2} -$$

$$- \frac{a_{13}^2 b_{21}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{23}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{11}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 + a_{22}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 - a_{14}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 + a_{24}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{13}^3 = - \frac{a_{14}^2 (b_{21}^2)^3 - a_{24}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{14}^2 (b_{11}^2)^2 b_{21}^2 - a_{24}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2 + a_{14}^2 b_{21}^2 (b_{31}^2)^2 - a_{24}^2 b_{11}^2 (b_{31}^2)^2}{c_2} -$$

$$\frac{a_{21}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 - a_{12}^2 (b_{21}^2)^2 b_{41}^2 - a_{11}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2 + a_{22}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2 - a_{13}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 + a_{23}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{22}^3 = \frac{a_{33}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{11}^2 b_{11}^2 (b_{31}^2)^2 - a_{13}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2 + a_{12}^2 b_{21}^2 (b_{31}^2)^2 - a_{13}^2 (b_{21}^2)^2 b_{31}^2 + a_{33}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2}{c_2} +$$

$$+ \frac{-a_{31}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2 - a_{13}^2 b_{31}^2 (b_{41}^2)^2 + a_{33}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 + a_{14}^2 (b_{31}^2)^2 b_{41}^2 - a_{32}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 - a_{34}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{23}^3 = - \frac{a_{14}^2 (b_{31}^2)^3 - a_{34}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{14}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2 + a_{14}^2 (b_{21}^2)^2 b_{31}^2 - a_{34}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2 - a_{34}^2 b_{11}^2 (b_{31}^2)^2}{c_2} -$$

$$\frac{a_{31}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 - a_{13}^2 (b_{31}^2)^2 b_{41}^2 - a_{11}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 - a_{12}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 + a_{32}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2 + a_{33}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{31}^3 = - \frac{a_{12}^2 (b_{41}^2)^3 - a_{42}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{12}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 + a_{41}^2 (b_{11}^2)^2 b_{21}^2 - a_{14}^2 b_{21}^2 (b_{41}^2)^2 + a_{12}^2 (b_{31}^2)^2 b_{41}^2}{c_2} -$$

$$\frac{-a_{42}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2 - a_{42}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{11}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2 - a_{13}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 + a_{43}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 + a_{44}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{32}^3 = - \frac{a_{13}^2 (b_{41}^2)^3 - a_{43}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{13}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 + a_{13}^2 (b_{21}^2)^2 b_{41}^2 - a_{43}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2 + a_{41}^2 (b_{11}^2)^2 b_{31}^2}{c_2} -$$

$$\frac{-a_{14}^2 b_{31}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{43}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{11}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 - a_{12}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 b_{41}^2 + a_{42}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{31}^2 + a_{44}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2},$$

$$a_{33}^3 = \frac{a_{44}^2 (b_{11}^2)^3 + a_{11}^2 b_{11}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{14}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 + a_{12}^2 b_{21}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{14}^2 (b_{21}^2)^2 b_{41}^2 + a_{44}^2 b_{11}^2 (b_{21}^2)^2}{c_2} +$$

$$+ \frac{a_{13}^2 b_{31}^2 (b_{41}^2)^2 - a_{14}^2 (b_{31}^2)^2 b_{41}^2 + a_{44}^2 b_{11}^2 (b_{31}^2)^2 - a_{41}^2 (b_{11}^2)^2 b_{41}^2 - a_{42}^2 b_{11}^2 b_{21}^2 b_{41}^2 - a_{43}^2 b_{11}^2 b_{31}^2 b_{41}^2}{c_2}$$

$$b_{11}^3 = a_{21}^2 b_{11}^2 - a_{11}^2 b_{21}^2 + a_{22}^2 b_{21}^2 + a_{23}^2 b_{31}^2 + a_{24}^2 b_{41}^2 - \frac{b_{21}^2 (a_{12}^2 b_{21}^2 + a_{13}^2 b_{31}^2 + a_{14}^2 b_{41}^2)}{b_{11}^2},$$

$$b_{21}^3 = a_{31}^2 b_{11}^2 - a_{11}^2 b_{31}^2 + a_{32}^2 b_{21}^2 + a_{33}^2 b_{31}^2 + a_{34}^2 b_{41}^2 - \frac{b_{31}^2 (a_{12}^2 b_{21}^2 + a_{13}^2 b_{31}^2 + a_{14}^2 b_{41}^2)}{b_{11}^2},$$

$$b_{31}^3 = a_{41}^2 b_{11}^2 - a_{11}^2 b_{41}^2 + a_{42}^2 b_{21}^2 + a_{43}^2 b_{31}^2 + a_{44}^2 b_{41}^2 - \frac{b_{41}^2 (a_{12}^2 b_{21}^2 + a_{13}^2 b_{31}^2 + a_{14}^2 b_{41}^2)}{b_{11}^2},$$

$$B_3^\perp = \begin{bmatrix} -\frac{b_{21}^3}{b_{11}^3} & 1 & 0 \\ -\frac{b_{31}^3}{b_{11}^3} & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_3^{\perp-} = B_3^{\perp-} = \begin{bmatrix} b_{11}^{3\perp T} & b_{12}^{3\perp T} \\ b_{21}^{3\perp T} & b_{22}^{3\perp T} \\ b_{31}^{3\perp T} & b_{32}^{3\perp T} \end{bmatrix},$$

$$b_{11}^{3\perp T} = -\frac{b_{11}^3 b_{21}^3}{c_3}, b_{12}^{3\perp T} = -\frac{b_{11}^3 b_{31}^3}{c_3}, b_{21}^{3\perp T} = 1 - \frac{(b_{21}^3)^2}{c_3},$$

$$b_{22}^{3\perp T} = -\frac{b_{21}^3 b_{31}^3}{c_3}, b_{31}^{3\perp T} = -\frac{b_{21}^3 b_{31}^3}{c_3}, b_{32}^{3\perp T} = 1 - \frac{(b_{31}^3)^2}{c_3},$$

$$c_3 = (b_{11}^3)^2 + (b_{21}^3)^2 + (b_{31}^3)^2,$$

$$B_3^+ = [b_{11}^{3+} \quad b_{12}^{3+} \quad b_{13}^{3+}],$$

$$b_{11}^{3+} = \frac{b_{11}^3}{c_3}, b_{12}^{3+} = \frac{b_{12}^3}{c_3}, b_{13}^{3+} = \frac{b_{31}^3}{c_3}.$$

Соответственно для четвертого уровня декомпозиции имеем:

$$A_4 = \begin{bmatrix} a_{11}^4 & a_{12}^4 \\ a_{21}^4 & a_{22}^4 \end{bmatrix},$$

$$a_{11}^4 = a_{21}^3 b_{11}^{3\perp T} + a_{22}^3 b_{21}^{3\perp T} + a_{23}^3 b_{31}^{3\perp T} - \frac{b_{21}^3 (a_{11}^3 b_{11}^{3\perp T} + a_{12}^3 b_{21}^{3\perp T} + a_{13}^3 b_{31}^{3\perp T})}{b_{11}^3},$$

$$a_{12}^4 = a_{21}^3 b_{12}^{3\perp T} + a_{22}^3 b_{22}^{3\perp T} + a_{23}^3 b_{32}^{3\perp T} - \frac{b_{21}^3 (a_{11}^3 b_{12}^{3\perp T} + a_{12}^3 b_{22}^{3\perp T} + a_{13}^3 b_{32}^{3\perp T})}{b_{11}^3},$$

$$a_{21}^4 = a_{31}^3 b_{11}^{3\perp T} + a_{32}^3 b_{21}^{3\perp T} + a_{33}^3 b_{31}^{3\perp T} - \frac{b_{31}^3 (a_{11}^3 b_{11}^{3\perp T} + a_{12}^3 b_{21}^{3\perp T} + a_{13}^3 b_{31}^{3\perp T})}{b_{11}^3},$$

$$a_{22}^4 = a_{31}^3 b_{12}^{3\perp T} + a_{32}^3 b_{22}^{3\perp T} + a_{33}^3 b_{32}^{3\perp T} - \frac{b_{31}^3 (a_{11}^3 b_{12}^{3\perp T} + a_{12}^3 b_{22}^{3\perp T} + a_{13}^3 b_{32}^{3\perp T})}{b_{11}^3},$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} b_{11}^4 \\ b_{21}^4 \end{bmatrix},$$

$$b_{11}^4 = a_{21}^3 b_{11}^3 - a_{11}^3 b_{21}^3 + a_{22}^3 b_{21}^3 + a_{23}^3 b_{31}^3 - \frac{b_{21}^3 (a_{12}^3 b_{21}^3 + a_{13}^3 b_{31}^3)}{b_{11}^3},$$

$$b_{21}^4 = a_{31}^3 b_{11}^3 - a_{11}^3 b_{31}^3 + a_{32}^3 b_{21}^3 + a_{33}^3 b_{31}^3 - \frac{b_{31}^3 (a_{12}^3 b_{21}^3 + a_{13}^3 b_{31}^3)}{b_{11}^3},$$

$$B_4^\perp = \begin{bmatrix} -\frac{b_{21}^4}{b_{11}^4} & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_4^{\perp-} = B_4^{\perp+} = \begin{bmatrix} b_{11}^{4\perp T} \\ b_{21}^{4\perp T} \end{bmatrix},$$

$$b_{11}^{4\perp T} = -\frac{b_{11}^4 b_{21}^4}{c_4}, b_{21}^{4\perp T} = \frac{(b_{11}^4)^2}{c_4}, c_4 = (b_{11}^4)^2 + (b_{21}^4)^2,$$

$$B_4^+ = \begin{bmatrix} b_{11}^{4+} & b_{12}^{4+} \end{bmatrix},$$

$$b_{11}^{4+} = \frac{b_{11}^4}{c_4}, b_{12}^{4+} = \frac{b_{21}^4}{c_4}.$$

Декомпозиция пятого уровня дает следующие выражения:

$$A_5 = a_{11}^5 = b_{11}^{4\perp T} \left(a_{21}^4 - \frac{a_{11}^4 b_{21}^4}{b_{11}^4} \right) + b_{21}^{4\perp T} \left(a_{22}^4 - \frac{a_{12}^4 b_{21}^4}{b_{11}^4} \right),$$

$$B_5 = b_{11}^5 = a_{21}^4 b_{11}^4 - a_{11}^4 b_{21}^4 + b_{21}^4 \left(a_{22}^4 - \frac{a_{12}^4 b_{21}^4}{b_{11}^4} \right).$$

Для пятого уровня декомпозиции выражение для матрицы коэффициентов запишется так:

$$K_5 = \lambda^{k5} = -\frac{a_{11}^5 - \lambda_5}{b_{11}^5}.$$

На основании второго выражения (15) значения для матрицы B_4^- будут иметь вид

$$B_4^- = \begin{bmatrix} b_{11}^{4-} & b_{12}^{4-} \end{bmatrix},$$

где

$$b_{11}^{4-} = b_{11}^{4+} + \frac{b_{21}^4 \lambda^{k5}}{b_{11}^4}, b_{12}^{4-} = b_{12}^{4+} - \lambda^{k5}.$$

При этом матрица коэффициентов K_4 четвертого уровня декомпозиции определится следующим соотношением:

$$K_4 = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^{k4} & \lambda_{12}^{k4} \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\lambda_{11}^{k4} = b_{11}^{4-} \lambda_4 - a_{21}^4 b_{12}^{4-} - a_{11}^4 b_{11}^{4-}, \lambda_{12}^{k4} = b_{12}^{4-} \lambda_4 - a_{22}^4 b_{12}^{4-} - a_{12}^4 b_{11}^{4-}.$$

Соответственно для матрицы B_3^- будем иметь вид

$$B_3^- = \begin{bmatrix} b_{11}^{3-} & b_{12}^{3-} & b_{13}^{3-} \end{bmatrix},$$

где

$$b_{11}^{3-} = b_{11}^{3+} + \frac{b_{21}^3 \lambda_{11}^{k4} + b_{31}^3 \lambda_{12}^{k4}}{b_{11}^3}, b_{12}^{3-} = b_{12}^{3+} - \lambda_{11}^{k4}, b_{13}^{3-} = b_{13}^{3+} - \lambda_{12}^{k4}.$$

Для третьего уровня декомпозиции матрица коэффициентов K_3 запишется так:

$$K_3 = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^{k3} & \lambda_{12}^{k3} & \lambda_{13}^{k3} \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\lambda_{11}^{k3} = b_{11}^{3-} \lambda_3 - a_{21}^3 b_{12}^{3-} - a_{31}^3 b_{13}^{3-} - a_{11}^3 b_{11}^{3-}, \lambda_{12}^{k3} = b_{12}^{3-} \lambda_3 - a_{22}^3 b_{12}^{3-} - a_{32}^3 b_{13}^{3-} - a_{12}^3 b_{11}^{3-},$$

$$\lambda_{13}^{k3} = b_{13}^{3-} \lambda_3 - a_{23}^3 b_{12}^{3-} - a_{33}^3 b_{13}^{3-} - a_{13}^3 b_{11}^{3-}.$$

Матрица B_2^- равна

$$B_2^- = \begin{bmatrix} b_{11}^{2-} & b_{12}^{2-} & b_{13}^{2-} & b_{14}^{2-} \end{bmatrix},$$

где

$$b_{11}^{2-} = b_{11}^{2+} + \frac{b_{41}^2 \lambda_{13}^{k3} + b_{21}^2 \lambda_{11}^{k3} + b_{31}^2 \lambda_{12}^{k3}}{b_{11}^2}, b_{12}^{2-} = b_{12}^{2+} - \lambda_{11}^{k3}, b_{13}^{2-} = b_{13}^{2+} - \lambda_{12}^{k3}, b_{14}^{2-} = b_{14}^{2+} - \lambda_{13}^{k3}.$$

Матрица коэффициентов K_2 определяется соотношением

$$K_2 = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^{k2} & \lambda_{12}^{k2} & \lambda_{13}^{k2} & \lambda_{14}^{k2} \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\lambda_{11}^{k2} = b_{11}^{2-} \lambda_2 - a_{21}^2 b_{12}^{2-} - a_{31}^2 b_{13}^{2-} - a_{41}^2 b_{14}^{2-} - a_{11}^2 b_{11}^{2-}, \lambda_{12}^{k2} = b_{12}^{2-} \lambda_2 - a_{22}^2 b_{12}^{2-} - a_{32}^2 b_{13}^{2-} - a_{42}^2 b_{14}^{2-} - a_{12}^2 b_{11}^{2-},$$

$$\lambda_{13}^{k2} = b_{13}^{2-} \lambda_2 - a_{23}^2 b_{12}^{2-} - a_{33}^2 b_{13}^{2-} - a_{43}^2 b_{14}^{2-} - a_{13}^2 b_{11}^{2-}, \lambda_{14}^{k2} = b_{14}^{2-} \lambda_2 - a_{24}^2 b_{12}^{2-} - a_{34}^2 b_{13}^{2-} - a_{44}^2 b_{14}^{2-} - a_{14}^2 b_{11}^{2-}.$$

Матрица B_1^- запишется так:

$$B_1^- = \begin{bmatrix} b_{11}^{1-} & b_{12}^{1-} & b_{13}^{1-} & b_{14}^{1-} & b_{15}^{1-} \end{bmatrix},$$

где

$$b_{11}^{1-} = b_{11}^{1+} + \frac{b_{21}^1 \lambda_{11}^{k2} + b_{31}^1 \lambda_{12}^{k2} + b_{41}^1 \lambda_{13}^{k2} + b_{51}^1 \lambda_{14}^{k2}}{b_{11}^1}, b_{12}^{1-} = b_{12}^{1+} - \lambda_{11}^{k2}, b_{13}^{1-} = b_{13}^{1+} - \lambda_{12}^{k2},$$

$$b_{14}^{1-} = b_{14}^{1+} - \lambda_{13}^{k2}, b_{15}^{1-} = b_{15}^{1+} - \lambda_{14}^{k2}.$$

Для K_1 имеем следующее соотношение

$$K_1 = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^{k1} & \lambda_{12}^{k1} & \lambda_{13}^{k1} & \lambda_{14}^{k1} & \lambda_{15}^{k1} \end{bmatrix}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^{k1} &= b_{11}^{-} \lambda_1 - a_{21}^1 b_{12}^{-} - a_{31}^1 b_{13}^{-} - a_{41}^1 b_{14}^{-} - a_{51}^1 b_{15}^{-} - a_{11}^1 b_{11}^{-}, \lambda_{12}^{k1} = b_{12}^{-} \lambda_1 - a_{42}^1 b_{14}^{-} - a_{52}^1 b_{15}^{-} - a_{32}^1 b_{13}^{-}, \\ \lambda_{13}^{k1} &= b_{13}^{-} \lambda_1 - a_{23}^1 b_{12}^{-} - a_{33}^1 b_{13}^{-} - a_{43}^1 b_{14}^{-} - a_{53}^1 b_{15}^{-} - a_{13}^1 b_{11}^{-}, \lambda_{14}^{k1} = b_{14}^{-} \lambda_1 - a_{54}^1 b_{15}^{-} - a_{34}^1 b_{13}^{-}, \\ \lambda_{15}^{k1} &= b_{15}^{-} \lambda_1. \end{aligned}$$

В соответствии со вторым выражением (14) для нулевого уровня имеем

$$B^{-} = \begin{bmatrix} b_{11}^{-} & b_{12}^{-} & b_{13}^{-} & b_{14}^{-} & b_{15}^{-} & b_{16}^{-} \end{bmatrix},$$

где

$$b_{11}^{-} = -\lambda_{11}^{k1}, b_{12}^{-} = b_{12}^{+} + \frac{b_{41} \lambda_{13}^{k1}}{b_{21}} b_{12}^{+}, b_{13}^{-} = -\lambda_{12}^{k1}, b_{14}^{-} = b_{14}^{+} - \lambda_{13}^{k1}, b_{15}^{-} = -\lambda_{14}^{k1}, b_{16}^{-} = -\lambda_{15}^{k1}.$$

Матрица коэффициентов решения задачи отслеживания программной пространственной траектории движения космического аппарата в атмосфере Земли будет равна

$$K = \begin{bmatrix} \lambda_{11}^k & \lambda_{12}^k & \lambda_{13}^k & \lambda_{14}^k & \lambda_{15}^k & \lambda_{16}^k \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \lambda_{11}^k &= b_{11}^{-} \lambda_0 - a_{21} b_{12}^{-} - a_{31} b_{13}^{-} - a_{41} b_{14}^{-} - a_{51} b_{15}^{-} - a_{61} b_{16}^{-} - a_{11} b_{11}^{-}, \\ \lambda_{12}^k &= b_{12}^{-} \lambda_0 - a_{22} b_{12}^{-} - a_{32} b_{13}^{-} - a_{42} b_{14}^{-} - a_{52} b_{15}^{-} - a_{62} b_{16}^{-} - a_{12} b_{11}^{-}, \\ \lambda_{13}^k &= b_{13}^{-} \lambda_0 - a_{43} b_{14}^{-} - a_{53} b_{15}^{-} - a_{63} b_{16}^{-} - a_{23} b_{12}^{-}, \lambda_{14}^k = b_{14}^{-} \lambda_0 - a_{54} b_{15}^{-} - a_{64} b_{16}^{-} - a_{44} b_{14}^{-}, \\ \lambda_{15}^k &= b_{15}^{-} \lambda_0 - a_{65} b_{16}^{-} - a_{45} b_{14}^{-}, \lambda_{16}^k = b_{16}^{-} \lambda_0. \end{aligned} \quad (22)$$

Итак, выражения (21) и (22) определяют аналитическое решение задачи управления спуском космического аппарата относительно заданной номинальной траектории и позволяют формировать закон управления (7) для каждого такта работы бортовой ЭВМ.

Численный пример. В качестве примера рассмотрим задачу отслеживания программной траектории движения космического аппарата в атмосфере Земли со следующими значениями вектора состояния опорной траектории и отклонения от нее на момент входа в воздушное пространство:

$$x_0 = \begin{bmatrix} 8000 & -1.5 & 6470000 & 16.26 & 40.2 & 43.16 \end{bmatrix}^T,$$

$$\Delta x_0 = \begin{bmatrix} -60 & 0.1 & 1350 & -0.1 & 0.05 & 0.01 \end{bmatrix}^T.$$

В качестве основного параметра настройки коэффициентов регулятора вида (21), (22) выберем промах по долготе и широте в точке раскрытия парашюта на высоте 10 км относительно опорной траектории. Поскольку для решения задачи управления в соответствии с приведенным выше описанием необходимо выбрать собственные значения (20) характеристического полинома (19), предварительным моделированием было установлено, что минимальное отклонение достигается при следующих λ_i :

$$\lambda_0 = 0.031, \lambda_1 = 0.001, \lambda_2 = 0.001, \lambda_3 = 0.005, \lambda_4 = 0.034, \lambda_5 = 0.039.$$

Применение данного метода для модельной задачи позволило уменьшить абсолютный промах с 71.243 км до 0.901 км, что является высоким показателем качества. Опорная и скорректированная программы управления приведены на рисунке 1.

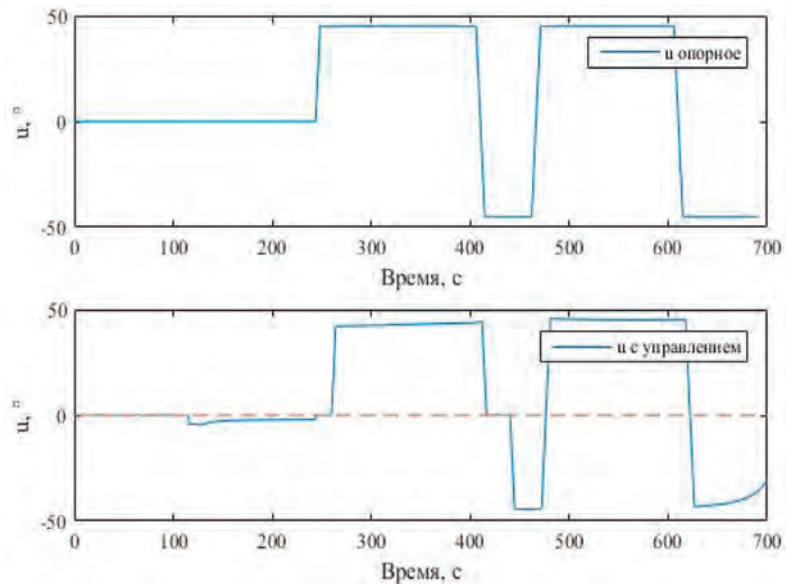


Рис. 1. Опорная и скорректированная программы управления

Выводы

Для пространственной математической модели шестого порядка получено аналитическое решение задачи отслеживания программной траектории спуска космического аппарата в атмосфере Земли. Для этого при управлении креном синтезирован регулятор с использованием метода точного размещения полюсов. Приведены результаты моделирования отслеживания программной траектории на всем протяжении спуска от момента входа в атмосферу и до раскрытия парашютов системы посадки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокимов С.Н., Климанов С.И., Корчагин А.Н., Микрин Е.А., Сихарулидзе Ю.Г. Терминальный алгоритм управления продольным движением спускаемого аппарата с ограничением перегрузки // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 5. – С. 102–118.
- [2] Ярошевский В.Я. Вход в атмосферу космических летательных аппаратов. – М.: Наука, 1988.
- [3] Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. – М.: Наука, 1975.
- [4] Zubov N.E., Mikrin Ye.A., Ryabchenko V.N. Matrix methods in the theory and practice of aircraft automatic control systems. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 666 с.
- [5] Zubov N.E., Mikrin Ye.A., Ryabchenko V.N., Oleynik A.S., Yefanov D.Ye. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2014. – № 5. – С. 3–17.
- [6] Zubov N.E., Zybin Ye.Yu., Mikrin Ye.A., Misrikhanov M.Sh., Proletarsky A.V., Ryabchenko V.N. Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 111–122.

REFERENCES

- [1] Evdokimov S.N., Klimanov S.I., Korchagin A.N., Mikrin Ye.A., Sikharulidze Yu.G. Terminal algorithm for controlling an axial motion of the descent module with the load factor limiting // News of the RAS. Control theory and systems. – 2012. – № 5. – P. 102–118.
- [2] Yaroshevsky V.Ya. Entry of space vehicles into atmosphere. – М.: Nauka, 1988.
- [3] Okhotsimsky D.Ye., Golubev Yu.F., Sikharulidze Yu.G. Algorithms for controlling a space vehicle at entering atmosphere. – М.: Nauka, 1975.
- [4] Zubov N.Ye., Mikrin Ye.A., Ryabchenko V.N. Matrix methods in the theory and practice of aircraft automatic control systems. – М.: Publishing house of Bauman MSTU, 2016. – 666 p.
- [5] Zubov N.Ye., Mikrin Ye.A., Ryabchenko V.N., Oleynik A.S., Yefanov D.Ye. Estimation of the spacecraft angular rate in the orbital stabilization mode based on the measurements of the local vertical sensor // Bulletin of Bauman MSTU. Series «Priborostroyeniye». – 2014. – № 5. – P. 3–17.
- [6] Zubov N.Ye., Zybin Ye.Yu., Mikrin Ye.A., Misrikhanov M.Sh., Proletarsky A.V., Ryabchenko V.N. Controlling the spacecraft motion spectrum by an output // News of the RAS. Control theory and systems. – 2014. – № 4. – P. 111–122.

УДК 629.78.007

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ**А.А. Алтунин, Д.И. Верба, П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов,
В.С. Коренной, Ю.И. Онуфриенко

А.А. Алтунин; Д.И. Верба; канд. техн. наук, ст.н.с. П.П. Долгов;
канд. техн. наук, ст.н.с. Е.Ю. Иродов; канд. техн. наук, ст.н.с. В.С. Коренной;
канд. техн. наук Ю.И. Онуфриенко (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Рассмотрены некоторые проблемы, возникающие при выполнении космонавтами актуальных задач внекорабельной деятельности: запуск малых космических аппаратов, отброс использованного оборудования, фото- и видеосъемка оборудования, приборов и элементов внешней поверхности орбитальной станции. Представлены предложения по разработке новых технических средств для выполнения отдельных задач внекорабельной деятельности и совершенствования подготовки космонавтов.

Ключевые слова: внекорабельная деятельность, малый космический аппарат, устройство для запуска, отбрасываемый объект, фотосъемка, видеосъемка, тренажер для подготовки космонавтов.

Some Issues of Improving Extravehicular Activity of Cosmonauts.**A.A. Altunin, D.I. Verba, P.P. Dolgov, E. Yu. Irodov, V.S. Korennoy,
Yu.I. Onufrienko**

The paper discusses some problems of fulfilling actual tasks of extravehicular activity by cosmonauts, such as: launch of small spacecraft, jettisoning of the used equipment, photographing and video filming of equipment, instruments and elements on the outer surface of the station. Also, it presents proposals on the development of new technical facilities for performing specific extravehicular tasks and improving cosmonaut training.

Keywords: extravehicular activity, small spacecraft, launching facility, jettisoned object, photographing, video filming, simulator for cosmonaut training.

Опыт эксплуатации российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) показывает, что внекорабельная деятельность (ВКД) является одной из наиболее сложных и напряженных полетных операций. В работе [1] проанализированы основные результаты ВКД экипажей в интересах сборки и эксплуатации МКС, проведена оценка объемов и структуры ВКД, определены некоторые характеристики ВКД. При выполнении космонавтами ряда актуальных задач ВКД имеют место отдельные проблемы, влияющие на качество и безопасность выполнения работ. К таким задачам можно отнести: запуск малых космических аппаратов, отброс использованного или неисправного оборудования, инспекционную деятельность, заключающуюся в фото- и видеосъемке оборудования, приборов и элементов внешней поверхности станции.

Запуск малых космических аппаратов с борта МКС

Одной из относительно новых актуальных задач при осуществлении внекорабельной деятельности является запуск малых космических аппаратов (МКА) с борта Международной космической станции. Операции запуска МКА стали проводиться довольно регулярно. В настоящее время на РС МКС такие запуски выполняются в ручном режиме и только во время ВКД, а до этого времени спутник может длительное время находиться на борту станции. В процессе выполнения запуска спутников основной проблемой является обеспечение требований по направлению, скорости отталкивания, а также вращению спутников.

С борта МКС космонавты в качестве спутников запускали различные объекты: скафандр, микро- и наноспутники (различной формы, массы и объема), мяч для гольфа, флеш-карту. 17 августа 2017 года в процессе ВКД-43 космонавты Роскосмоса Ф.Н. Юрчихин и С.Н. Рязанский во время выхода в открытый космос в ручном режиме запустили пять наноспутников: «Томск-ТПУ-120», два спутника «Танюша-ЮЗГУ», ТНС-0 № 2 и тестовый спутник «ТС530-Зеркало». Запуск спутников «Томск-ТПУ-120», ТНС-0 № 2, а также двух спутников «Танюша-ЮЗГУ» были выполнены путем ручного отталкивания с последующей фото- и видеофиксацией. Запуск спутника «ТС530-Зеркало» был осуществлен с помощью специального пускового устройства.

Основные сведения о запускаемых объектах представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные сведения о запускаемых объектах

№ п/п	Номер ВКД и дата	Название спутника	Массогабаритные характеристики
1	ВКД-13 28.03.2005	Наноспутник ТНС-0 № 1	Цилиндр: диаметром 250 мм, длиной 170 мм, массой 5 кг
2	ВКД-15 04.02.2006	«РадиоСкаф-№ 1»	Спутник создан на основе скафандра «Орлан-М» № 14
3	ВКД-17 23.11.2006	Эксперимент в рамках проекта «Гольф»	Шарик: диаметром 43 мм, массой 3 г
4	ВКД-29 03.08.2011	«РадиоСкаф-В № 2» – микроспутник «КЕДР»	Параллелепипед: 500 x 500 x 300 мм, массой 30 кг
5	ВКД-31 20.08.2012	Микроспутник «Сфера-53» – запуск с пускового устройства	Шар: диаметром 53 см, массой 13 кг
6	ВКД-39 18.08.2014	«РадиоСкаф-№ 3» – наноспутник НС-1	Параллелепипед: 200 x 180 x 180 мм, массой 2,4 кг
7	ВКД-42 03.02.2016	Флеш-карта «СМС на МКС, 70 тысяч спасибо»	Находилась в упаковке, перевязанной георгиевской лентой
8	ВКД-43 17.08.2017	Наноспутники: – «Томск-ТПУ-120»; – «Танюша-ЮЗГУ» – 2 шт.; – ТНС-0 № 2 Тестовый спутник: – «ТС530-Зеркало» («Сфера-53» № 2) – запуск с пускового устройства	Параллелепипед: 300 x 100 x 100 мм, массой 3,373 кг Параллелепипед: 300 x 100 x 100 мм, массой 4,65 кг Шестигранник: диаметром – 190 мм, длина – 590 мм, массой 4,8 кг Шар: диаметром 53 см, массой 13 кг

Для отработки космонавтами практических действий по запуску спутников в процессе подготовки к ВКД-43 были проведены тренировки экипажей МКС-51/52 на тренажере «Выход-2». При этом в рабочей зоне тренажера были размещены новые специально разработанные элементы, позволяющие отрабатывать имитацию запуска спутников как с помощью ручного пускового устройства (рис. 1), так и без него (рис. 2).



Рис. 1. Имитация запуска тестового спутника сферической формы «ТС530-Зеркало» с помощью пускового устройства



Рис. 2. Имитация запуска спутника «Танюша-ЮЗГУ»

При запуске МКА в ручном режиме космонавтом могут быть допущены отдельные ошибки: различные усилия (придание нерасчетной начальной скорости), неправильные углы запуска и рекомендованные промежутки времени между пуском спутников. Космонавт приблизительно оценивает направление запуска и требуемые для этого усилия. Во всех реализованных случаях запуска спутников имело место их вращение. В случае если предъявляются жесткие требования по времени и параметрам запуска спутника, то организовывать выход космонавтов для выполнения только одной операции является нецелесообразным. Поэтому операции запуска МКА представляется целесообразным автоматизировать для обеспечения требуемых параметров [2, 3] с учетом требований безопасности, предъявляемых к подобным устройствам [4, 5].

В настоящее время развивается класс МКА, предназначенных для выполнения в космосе различных задач и экспериментов. В ряде случаев предусмотрено осуществление запусков таких МКА с борта орбитальной станции. Запускаемые МКА имеют большой разброс масс, габаритов и форм. Массы спутников могут быть от 1 до 100 кг, габариты от 10 см до 100 см,

спутники могут быть выполнены в форме сферы, цилиндра, призмы и т.д. [6]. Для каждого МКА, исходя из его целевого назначения, выдвигаются определенные требования по направлению и скорости запуска. Необходимо предусмотреть возможность возвращения на борт орбитальной станции ряда спутников для проведения регламентных работ и подготовки к следующему пуску.

Разработка индивидуальных средств запуска для каждого МКА с борта орбитальной станции неэффективна по экономическим и массовым характеристикам, т.к. приводит к увеличению массы требуемого оборудования. Вследствие этого возникает необходимость разработки универсального пускового устройства, позволяющего осуществлять запуск МКА разной массы и габаритов с борта орбитальной станции в заданном направлении и с необходимой для данного МКА скоростью без вращательных движений, а также принимать МКА обратно на борт орбитальной станции после выполнения целевой задачи.

Для решения этой задачи предлагается устройство для запуска МКА [7], которое содержит: линейный двигатель, состоящий из неподвижного статора и подвижного якоря; блок регулирования ускорения; блок питания; основание с установленным на нем опорно-поворотным блоком; неподвижную стойку, прикрепленную к статору линейного двигателя; подвижную стойку, прикрепленную к якорю линейного двигателя; контактную группу, установленную с возможностью перемещения на неподвижной стойке; электромагнитный фиксатор, установленный с возможностью перемещения на подвижной стойке; пульт управления. Структурно-функциональная схема устройства для запуска малых космических аппаратов приведена на рисунке 3.

Функционирование разработанного устройства осуществляется следующим образом. Включается питание устройства для запуска малых космических аппаратов, напряжение подается на электромагнитный фиксатор и он приводится в действие. Устанавливается запускаемый МКА на электромагнитный фиксатор 7 и фиксируется на нем за счет действующего магнитного поля. Устройство для запуска малых космических аппаратов переносится и фиксируется в месте запуска МКА на внешней поверхности орбитальной станции. На пульте управления 9 устанавливаются исходные данные для запуска МКА – масса, требуемая скорость отброса, углы отброса относительно строительных осей станции. По этим параметрам опорно-поворотный блок 2 разворачивает статор линейного двигателя 3 в требуемом направлении, а блок регулирования ускорения 11 рассчитывает требуемое напряжение, которое должно быть подано на линейный двигатель для достижения требуемой скорости отброса. Программным способом или при нажатии кнопки «пуск» напряжение подается на статор линейного двигателя 3 и якорь 4 приводится в движение относительно статора. При движении якоря 4 подвижная стойка 6 перемещается вместе с ним и приводит МКА в движение. При этом МКА фиксируется к электромагнитному фиксатору 7 за счет

действующего магнитного поля. При движении якоря контактная группа 8 выходит из зацепления с электромагнитным фиксатором 7 и снимает с него напряжение. МКА перестает удерживаться на электромагнитном фиксаторе 7 и прижимается к подвижной стойке только за счет инерционных сил. При достижении заданной скорости отброса якорь 4 начинает замедляться и останавливается. При изменении ускорения якоря и соответственно подвижной стойки контакт между МКА и электромагнитным фиксатором 7 пропадает, и далее МКА летит по прямолинейной траектории по инерции. Ввиду того, что при отделении МКА от электромагнитного фиксатора 7 не было никаких сил сцепления, то соответственно не возникает и любых крутящих моментов. Этим обеспечивается отброс МКА без закручивания.

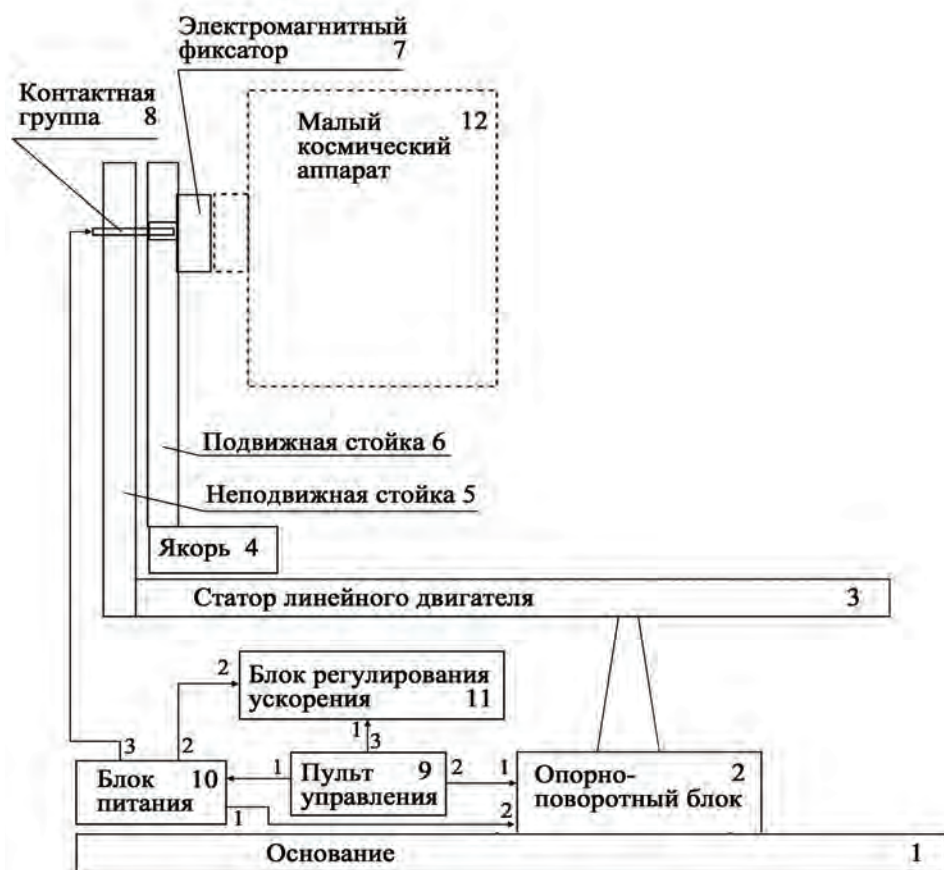


Рис. 3. Структурно-функциональная схема устройства для запуска малых космических аппаратов

После отброса спутника якорь 4 линейного двигателя возвращается в исходное положение, при этом происходит зацепление контактной группы 8 с электромагнитным фиксатором 7 и на него снова подается напряжение, которое генерирует магнитное поле. После выполнения МКА своей целевой задачи он подлетает к месту старта, ориентируется относительно устройства для запуска малых космических аппаратов и сближается с ним по заданной программе. При подходе к электромагнитному фиксатору 7 на заданное расстояние магнитное поле электромагнитного фиксатора притягивает МКА к себе и обеспечивает его удержание. Далее устройство для запуска малых космических аппаратов с размещенным на нем МКА перемещают к требуемому месту на поверхности станции.

Разработанная конструкция устройства позволяет осуществлять запуск малых космических аппаратов разной массы и габаритов с борта МКС в заданном направлении и с заданной для определенного малого космического аппарата скоростью, а также принимать специальные МКА, разрабатываемые для инспекции внешней поверхности станции, обратно на борт МКС после выполнения целевой задачи.

Применение устройства для запуска МКА позволит повысить эффективность решения целевых задач малыми космическими аппаратами за счет их запуска с заданными параметрами, уменьшить массу оборудования, требуемого для выполнения всей программы работ и экспериментов с малыми космическими аппаратами, за счет того, что запуск можно будет осуществлять только одним устройством.

Отброс оборудования

Одной из актуальных задач при осуществлении внекорабельной деятельности является отброс использованного или неисправного оборудования с борта Международной космической станции. Операции отброса использованного или неисправного оборудования стали проводиться довольно регулярно. Основными требованиями при выполнении данной операции являются направление и сила отталкивания.

С борта МКС космонавты отбрасывали различное использованное или неисправное оборудование: телевизионные камеры, антенны, рамы, фермы, чехлы экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) и т.п.

Конструкция отбрасываемых объектов изначально не была предусмотрена для этих целей. Они не имеют специальных ручек, жестких или мягких поручней, которые позволяли бы жестко захватить объект. Отброс таких объектов от МКС представляет определенные трудности.

Перечень объектов, которые были отброшены в космос во время выходов, представлен в таблице 2.

Таблица 2

Перечень отброшенных объектов

№ п/п	Номер ВКД и дата	Наименование отбрасываемого оборудования
1	ВКД-2 08.10.2001	Клапан съёмный 1, клапан съёмный 2, клапан «Мишень»
2	ВКД-7 16.08.2002	Жгуты
3	ВКД-14 18.08.2005	Чехол ЭВТИ
4	ВКД-15 04.02.2006	Зонд FPP, демонтированный с американского модуля Р-6, измеривший электрические поля за пределами станции
5	ВКД-17 23.11.2006	Защитный чехол аппаратуры БТН
6	ВКД-20 15.07.2008	Чехол ЭВТИ с радиатора научной аппаратуры «Всплеск»
7	ВКД-25 27.07.2010	Телевизионная камера, демонтированная с агрегатного отсека модуля «Звезда»
8	ВКД-28 16.12.2011	Устройство «Якорь» научной аппаратуры «Феррозонд»
9	ВКД-29 03.08.2011	Крышки с клапаном ЭВТИ
10	ВКД-32 19.04.2013	Катушка, контейнеры ШКД-1, ШКД-2
11	ВКД-37а 27.01.2014	Переходная рама 17КС.600Ю1110А-0
12	ВКД-38 19.06.2014	Несущая ферма научной аппаратуры МРАС&SEED
13	ВКД-40 22.10.2014	Радиометрический комплекс РК 21 с СМ, антенны 2АСФ1-1 и 2АСФ2-1 с модуля МИМ2
14	ВКД-41 10.08.2015	Коммуникационная антенна WAL-6
15	ВКД-44 02.02.2018	Прибор ША317А-II

Во время пятнадцати выходов совершен отброс 21 различного объекта. Кроме того, практически в каждом выходе перед входом в шлюзовую отсек космонавты протирают перчатки и скафандры полотенцами и отбрасывают их от станции. В случае неправильного отброса возможны различные нештатные ситуации: от столкновения отброшенного оборудования с модулями, антеннами, солнечными батареями станции с их последующим разрушением до зацепления отброшенного оборудования с различными объектами на внешней поверхности модулей станции. Поэтому представляется целесообразным организовать процесс отброса ненужного оборудования с внешней

поверхности станции для исключения возможности возникновения аварийных ситуаций. Основным требованием при отбросе оборудования является обеспечение требуемого направления с выбранной точки на внешней поверхности, обеспечивающего безопасный отход объекта от станции. Для решения задачи безопасного отброса оборудования и различного снаряжения может быть использовано устройство для запуска МКА [7] с универсальным блоком фиксации, позволяющим разместить на нем и осуществить как запуск МКА, так и отброс объектов различной формы, массы и габаритов.

Фото- и видеосъемка в процессе ВКД

Анализ циклограмм выходов в открытый космос в процессе осуществления ВКД при выполнении различных видов монтажных и ремонтно-восстановительных работ показывает, что завершающей операцией является, как правило, фотографирование (видеосъемка) смонтированных блоков, кабелей, разъемов, т.е. проводится инспекция локальной области поверхности МКС. Регулярно проводится фото- и видеосъемка научной аппаратуры или ее отдельных блоков, установленной на внешней поверхности МКС. Кроме того, постоянно требуется оценивать состояние внешней поверхности станции, иллюминаторов, ЭВТИ и т.д. Как показывает опыт эксплуатации МКС, количество фото- и видеосъемок в последние годы резко возросло. При этом повысились требования к выбору необходимого ракурса съемки и оперативности ее выполнения.

Анализ выполнения операций фотографирования показывает, что существуют объективные условия, снижающие качество выполнения данной операции, затрудняющие ее выполнение, увеличивающие время (и количество) выходов в открытый космос. Отдельные примеры фотофиксации оборудования на внешней поверхности МКС и возникающие при этом трудности представлены в таблице 3.

Основными факторами, препятствующими процессу фотосъемки, являются недостаточная освещенность и требуемый ракурс съемки. Космонавтам приходится ожидать выхода МКС на освещенную часть орбиты, что может занимать до 30 минут. Съемка с требуемого ракурса приводит к засветке индикации экрана фотоаппарата или к невыполнению съемки из-за неудовлетворительных условий освещенности. В отдельных случаях, когда требуется провести фотографирование стыковочных узлов, аппаратуры, расположенной на торцевых поверхностях модулей, солнечных батарей, выполнение данной операции существенно затрудняется или даже становится невозможным.

Для обеспечения решения задач фотографирования внешней поверхности станции представляется целесообразным использовать малые космические аппараты, оснащенные комплектом аппаратуры для регистрации изображений в различных спектральных диапазонах.

Таблица 3

Примеры фотофиксации оборудования на внешней поверхности МКС

№ п/п	Номер ВКД и дата	Объект фотосъемки	Условия фотосъемки	Проблемы при фотографировании
1	ВКД-4 13.11.2001	Недораскрывшаяся боковая створка панели солнечной батареи СБ-2 на модуле «Звезда»	Солнечная сторона орбиты	Положение космонавта и направление освещения не соответствуют нормальному режиму фотосъемки
2	ВКД-13 28.03.2005	Антенный блок аппаратуры спутниковой навигации АСН-М на модуле «Звезда»	Теневая сторона орбиты	Экипажу приходится ждать рассвета 19 минут
3	ВКД-14 18.08.2005	Съемная кассета-контейнер СКК № 5 СМ на модуле «Звезда»	Теневая сторона орбиты	Экипажу приходится ждать рассвета 18 минут
4	ВКД-16 02.06.2006	Насадок на заправочный клапан КЗЗ на переходном отсеке модуля «Звезда»	Теневая сторона орбиты	Экипажу приходится ждать рассвета 16 минут
5	ВКД-20 15.07.2008	Стыковочная мишень на переходном отсеке модуля «Звезда» после ее установки	Фотографирование стыковочной мишени осуществлялось с использованием грузовой стрелы ГСтМ-1 со стороны стыкуемого КА	Выполнение операции заняло много времени и потребовало значительных физических затрат космонавтов. При фотографировании возникают трудности с фиксацией космонавта
6	ВКД-22 05.06.2009	Антенны 4АО-ВКА, АР-ВКА и 2АР-ВКА системы сближения и стыковки «Курс-П» на модуле «Звезда»	Антенны фотографировались с помощью ГСтМ-2 со стороны подлетающего КА	Выполнение операции заняло много времени и потребовало значительных физических затрат космонавтов
7	ВКД-32 19.04.2013	Мишень видеометра на модуле «Звезда», после ее замены	Фотографирование мишени видеометра за несколько минут до того, как Солнце уйдет с агрегатного отсека	Трудно выйти на исходную позицию, откуда можно фотографировать

МКА для наблюдения за внешней поверхностью орбитальной станции должен базироваться на орбитальной станции, а для решения целевой задачи совершать полет около орбитальной станции и осуществлять фото- и видеосъемку ее поверхности.

Предлагается следующая конструкция МКА для наблюдения за орбитальной станцией, фотографирования аппаратуры и оборудования на ее внешней поверхности (рис. 4), содержащая корпус, в котором размещены система ориентации и стабилизации, двигательная установка, бортовой комплекс управления (БКУ), антенно-фидерное устройство (АФУ), бортовая информационно-телеметрическая система, система электропитания, система

терморегулирования, система предупреждения столкновения, блок управления поворотной платформой; на корпусе размещены система фиксации и стыковки, поворотная платформа с оптико-электронным комплексом наблюдения [8].

Функционирование МКА для наблюдения за орбитальной станцией осуществляется следующим образом. В исходном состоянии МКА состыкован с орбитальной станцией при помощи системы фиксации и стыковки 2. При необходимости проведения съемки орбитальной станции от системы электропитания 8 запитываются все служебные системы 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13 и полезная нагрузка – оптико-электронный комплекс наблюдения 4. Система 7 обеспечивает требуемый тепловой режим в корпусе 1 МКА и оптико-электронного комплекса наблюдения 4. Пусковое устройство, расположенное на орбитальной станции, отстыковывает систему 2 МКА и отталкивает его от орбитальной станции.

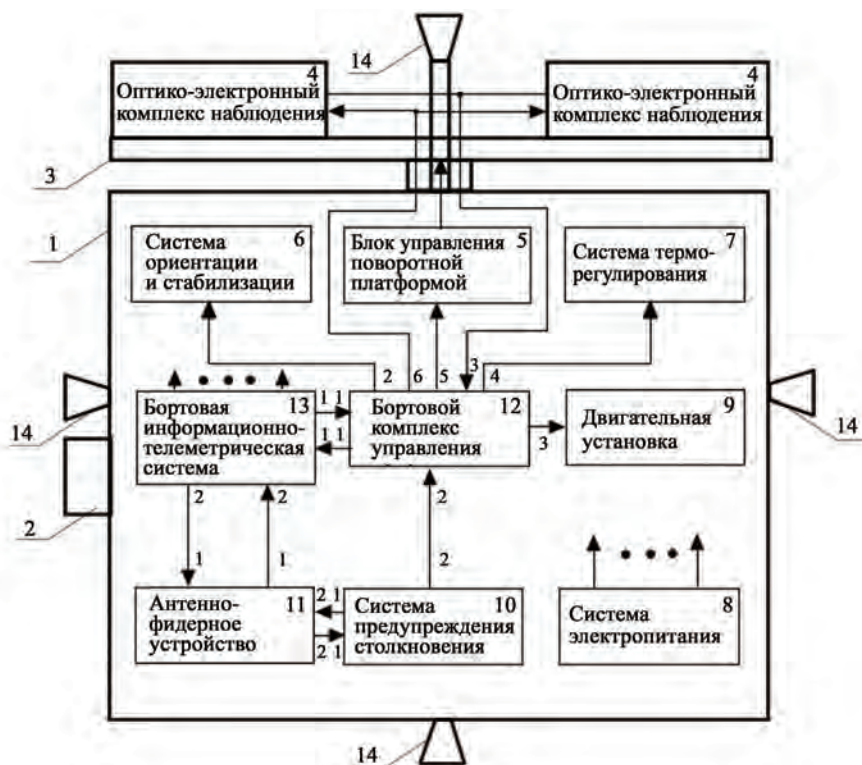


Рис. 4. Структурно-функциональная схема малого космического аппарата для наблюдения за орбитальной станцией

При отходе МКА на заданное расстояние по команде БКУ 12 двигательная установка 9 выдает тормозной импульс и МКА останавливается относительно станции. Система ориентации и стабилизации 6 осуществляет необ-

ходимую ориентацию и стабилизацию МКА и поддерживает ее во время всего полета. По командам БКУ 12 включается оптико-электронный комплекс наблюдения 4. Информация с комплекса 4 через бортовую информационно-телеметрическую систему 13 и АФУ 11 передается на сторонний пункт управления, находящийся на борту орбитальной станции или на Земле. Далее по командам, переданным через АФУ 11 на БКУ 12, двигательная установка 9 выдает разгонный импульс для сообщения МКА требуемой скорости относительно станции. По командам БКУ 12 блок 5 разворачивает платформу 3 в требуемом направлении обзора. МКА перемещается вдоль поверхности станции и оптико-электронный комплекс наблюдения 4 производит постоянную регистрацию изображения станции. В случае необходимости БКУ 12 через двигательную установку 9 выдает тормозной импульс, останавливая МКА относительно станции. Изменяя параметры трансфокации по третьему выходу БКУ 12, передаваемые на вход оптико-электронного комплекса наблюдения 4, осуществляется детальное наблюдение выбранного участка поверхности станции. При этом поле обзора может перемещаться по поверхности станции за счет разворота поворотной платформы.

После выполнения детального наблюдения МКА продолжает проведение съемки. В процессе относительного перемещения МКА система предупреждения столкновения 10 определяет расстояние до ближайших элементов поверхности станции по вектору скорости МКА. В случае сближения на опасное расстояние система 10 выдает сигнал в БКУ 12, по которому осуществляется остановка МКА и отвод его от препятствия на безопасное расстояние.

После пролета вдоль станции за счет тормозного импульса МКА останавливается, далее дается разгонный импульс для движения вдоль другой оси станции. Осуществляя импульсы разгона и торможения, можно осуществить облет станции вдоль всех ее строительных осей и получить видеоизображения поверхности станции со всех ракурсов.

После выполнения целевой задачи МКА при помощи двигательной установки возвращается к точке старта. Зависает в районе пускового устройства и осуществляет стандартную операцию стыковки своей системой фиксации и стыковки 2.

Управление полетом МКА может осуществляться БКУ 12 по заранее заданной программе полета или от стороннего пункта управления, расположенного на борту орбитальной станции или на Земле.

Введенные блоки и системы позволяют обеспечить возможность проведения периодической съемки в различных спектральных диапазонах и получения изображений внешней поверхности орбитальных объектов – космических аппаратов и орбитальных станций, что расширяет функциональные возможности МКА. Полученные данные позволяют оценить состояние внешней поверхности орбитальной станции, построить 3D-модели станции, обнаружить места попадания в станцию метеоритов или космического мусора.

В случае создания МКА для наблюдения за орбитальной станцией космонавты должны быть готовы управлять такими МКА в различных режимах, на различных этапах полета вокруг МКС. Задача подготовки космонавтов к управлению таким типом МКА может быть решена с использованием предлагаемого тренажера для подготовки космонавтов к управлению малым космическим аппаратом (рис. 5). Тренажер должен включать рабочее место космонавта, пульт инструктора, блок расчета параметров движения МКА, блок расчета положения МКА, блок формирования зоны наблюдения, блок моделей поверхности станции, блок формирования целевой информации. На рабочем месте космонавта расположены: монитор положения МКА, монитор целевой информации, индикаторы служебной информации, органы управления движением, органы управления комплексом наблюдения, пульт программного управления. Пульт инструктора содержит блок ввода исходных данных, блок ввода нештатных ситуаций, блок регистрации, блок мониторов инструктора [9].

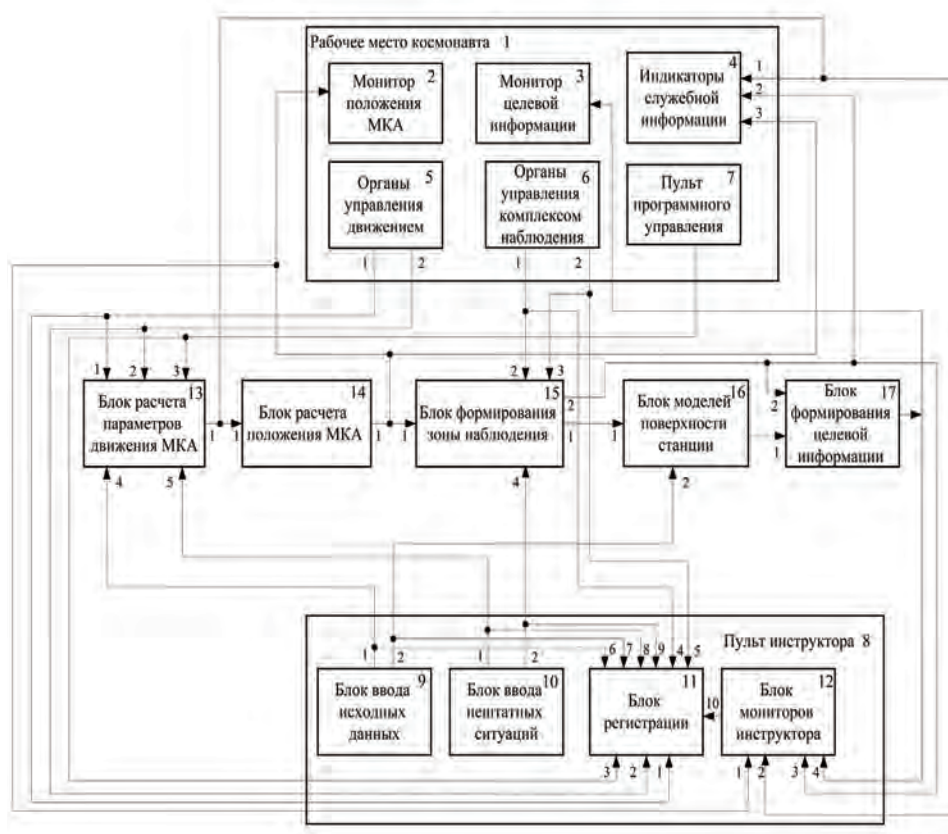


Рис. 5. Структурно-функциональная схема тренажера для подготовки космонавтов к управлению малым космическим аппаратом

Состав оборудования тренажера позволяет космонавту в процессе тренировки отработать управление всеми основными этапами полета МКА при выполнении задачи наблюдения за внешней поверхностью станции. Тренажер позволяет одновременно управлять движением МКА и комплексом наблюдения, установленным на нем, в точном соответствии с процедурами реальной деятельности, которые космонавт будет выполнять на борту орбитальной станции, что повышает качество и эффективность подготовки космонавтов.

Функционирование разработанного тренажера осуществляется следующим образом. Перед началом тренировки инструктор с блока ввода исходных данных 9 на пульте 8 вводит данные о начальном расположении станции и МКА, о характеристиках МКА, об используемом типе прибора наблюдения и требуемом изображении станции. Эти данные поступают на входы блока расчета параметров движения 13 МКА и на вход блока моделей поверхности станции 16.

Космонавт размещается на рабочем месте 1. В соответствии с заданием на тренировку космонавт с помощью пульта 7 вводит программу работы МКА – параметры его полета, требуемые зоны наблюдения поверхности станции. При ручном управлении работой МКА космонавт с помощью органов управления движением 5 выдает команды на срабатывание двигательной установки МКА, которые поступают в блок 13, где на основе исходных данных о параметрах спутника и управляющих действий космонавта рассчитываются параметры линейного и углового перемещения МКА относительно станции. Эти значения отображаются на индикаторах служебной информации 4 и в блоке 8 мониторов инструктора, а также поступают в блок 14, в котором определяется ориентация МКА относительно станции и расстояния между МКА и элементами станции на основе рассчитанных скоростей движения МКА относительно станции. Параметры ориентации и значения расстояний поступают на первый вход блока формирования зоны наблюдения 15, в котором на основе направления оптической оси прибора наблюдения и его поля зрения, заданных космонавтом, значений расстояний и параметров ориентации МКА относительно станции определяются координаты зоны, видимой в прибор наблюдения. Значения координат по первому выходу блока 15 поступают на первый вход блока моделей поверхности станции 16, происходит выбор требуемых изображений из базы данных или генерация электронных изображений требуемой зоны поверхности станции. Эти данные поступают в блок формирования целевой информации 17, где на основе данных об углах наблюдения, поданных на второй вход из блока 15, осуществляется преобразование изображения для обеспечения требуемого ракурса наблюдения. Сформированное изображение поступает на вход монитора целевой информации 3 для представления его космонавту. Одновременно это изображение отображается на блоке мониторов инструктора 12 и регистрируется в блоке 11.

Космонавт по изображению, выводимому на монитор 3, производит анализ состояния поверхности станции, выявляет участки, подлежащие детальному обследованию. Для более детального изучения требуемого участка поверхности космонавт через органы управления комплексом наблюдения 6 дает команды на разворот поля зрения комплекса наблюдения или на трансфокацию объектива прибора наблюдения для повышения детальности изображения. По этим сигналам в блоке 15 определяются измененное положение оптической оси и координаты новой области станции, видимой в комплекс наблюдения. Далее в блоке 16 выбираются или генерируются изображения требуемых участков поверхности станции, которые поступают в блок 17, преобразуются в соответствии с ракурсом наблюдения и представляются на мониторы 3 и 12.

По параметрам служебной информации на индикаторах 4 и по положению МКА относительно станции на мониторе 2 космонавт управляет движением МКА через органы управления движением 5 и подводит его к следующей требуемой точке, из которой необходимо осуществить наблюдение заданной области поверхности станции. Управляя комплексом наблюдения через органы управления 6, космонавт получает изображение необходимого участка поверхности станции требуемой детальности.

В процессе тренировки инструктор с пульта 8 через блок 10 вводит различные нештатные ситуации, связанные с отказом работоспособности служебных или целевых систем МКА.

Введенные отказы работоспособности системы управления движением МКА, системы ориентации и стабилизации поступают на вход блока 13, изменяют алгоритмы расчета параметров движения МКА, что проявляется при отработке космонавтом сигналов на срабатывание двигателей управления полетом МКА, его ориентации и стабилизации. Космонавт оценивает возникшую ситуацию по информации с монитора 2 и индикаторов 4, определяет возникшую нештатную ситуацию и изменяет свою стратегию действий по управлению движением МКА.

Отказы поворотной платформы и системы трансфокации объектива с блока 10 поступают на вход блока 15. По этим сигналам осуществляется изменение законов определения положения оптической оси комплекса наблюдения и изменения масштаба наблюдаемого изображения. Для устранения негативного влияния данных нештатных ситуаций космонавт изменяет управление движением МКА, подводит МКА к станции на более близкое расстояние, развороты осуществляет за счет системы ориентации, а не с помощью поворотной платформы.

После облета станции и получения изображений всех заданных участков ее поверхности космонавт, управляя полетом МКА, возвращает его к точке старта и обеспечивает механическую фиксацию МКА к поверхности станции.

Таким образом, в процессе тренировки на предлагаемом тренажере космонавт может отработать управление всеми основными этапами полета МКА при выполнении задачи наблюдения за внешней поверхностью станции. Тренажер позволяет одновременно управлять движением МКА и комплексом наблюдения, установленным на нем, в точном соответствии с процедурами реальной деятельности, которые космонавт будет выполнять на борту орбитальной станции, что повышает качество и эффективность подготовки космонавтов.

Тренажер позволит осуществлять подготовку космонавтов к управлению с борта орбитальной станции малыми космическими аппаратами для наблюдения за орбитальной станцией.

Выводы

На основе анализа задач выполненных выходов в открытый космос определено, что в настоящее время при осуществлении внекорабельной деятельности возросло количество операций по отбросу в космос отработанного оборудования и снаряжения, а также по запуску спутников с борта станции. Предложено операции отброса оборудования и запуска спутников с борта орбитальной станции осуществлять с помощью специального пускового устройства. Разработаны предложения по составу и структуре устройства, позволяющего осуществлять запуск МКА разной массы и габаритов с борта МКС в заданном направлении и с заданной скоростью, а также принимать МКА обратно на борт МКС после выполнения целевой задачи. Применение устройства для запуска МКА позволит повысить эффективность решения целевых задач МКА за счет их запуска с заданными параметрами орбиты, уменьшить массу оборудования, требуемого для выполнения всей программы работ и экспериментов с МКА.

Анализ опыта эксплуатации МКС показал, что количество фото- и видеосъемок в процессе ВКД увеличилось. Из циклограмм выходов в открытый космос следует, что завершающей операцией выполнения всех видов монтажных и ремонтно-восстановительных работ является фотографирование (видеосъемка) смонтированных блоков, кабелей, разъемов. Проводится фотографирование научной аппаратуры или ее отдельных блоков, установленных на внешней поверхности МКС. Кроме того, регулярно требуется оценивать состояние внешней поверхности станции, иллюминаторов, ЭВТИ и т.д. Разработано предложение по составу, структуре и использованию МКА для проведения работ по фото- и видеосъемке внешней поверхности орбитальной станции. Для подготовки космонавтов к использованию МКА на борту МКС разработаны предложения по составу и структуре тренажера для подготовки космонавтов к управлению всеми основными этапами полета МКА при выполнении задачи наблюдения за внешней поверхностью станции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анализ основных результатов внекорабельной деятельности экипажей МКС / Б.И. Крючков, А.А. Алтунин, П.П. Долгов, В.И. Ярополов, В.М. Усов, Е.Ю. Иродов, Д.И. Верба, В.С. Коренной // Пилотируемые полеты в космос. – № 1 (22). – 2017.
- [2] Подход к обоснованию задач робототехнических систем для работы в открытом космосе / П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов, В.С. Коренной // Пилотируемые полеты в космос. – № 3 (16). – 2015.
- [3] Новые направления робототехники в пилотируемой космонавтике / Крючков Б.И., Усов В.М. // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 1 (6). – С. 93–100.
- [4] Вопросы безопасности применения робототехнической системы космического назначения в процессе осуществления внекорабельной деятельности / В.С. Коренной, П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов // Пилотируемые полеты в космос. – № 1(18). – 2016.
- [5] Заменит ли робот космонавта в операциях внекорабельной деятельности / Цыганков О.С., Бабайцев Д.В. // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 2 (4). – С. 74–87.
- [6] Статистический анализ массогабаритных характеристик научной аппаратуры, устанавливаемой при ВКД / Иродов Е.Ю., Долгов П.П., Коренной В.С. // Пилотируемые полеты в космос. – 2015. – № 4(17).
- [7] Устройство для запуска малых космических аппаратов. [Текст]; пат. 153436 Росс. Федерация, МПК В64G 1/64 / Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С., заявитель и патентообладатель ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». – № 2015103959/11; заявл. 06.02.15; опубл. 20.07.15, Бюл. № 20. – 2 с.: илл.
- [8] Малый космический аппарат для наблюдения за космической станцией. [Текст]; пат. 157041 Росс. Федерация, МПК В64G 1/10 / Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С., Алтунин А.А., заявитель и патентообладатель ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». – № 2015103958/11; заявл. 06.02.15; опубл. 20.11.15, Бюл. № 32. – 2 с.: илл.
- [9] Тренажер для подготовки космонавтов к управлению малым космическим аппаратом. [Текст]; пат. 158082 Рос. Федерация, МПК G09B 9/08. / Долгов П.П., Иродов Е.Ю., Коренной В.С., заявитель и патентообладатель ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». – № 2015116944/11; заявл. 06.05.15; опубл. 20.12.15, Бюл. № 35. – 2 с.: илл.

REFERENCES

- [1] Main Results of EVA Performed by the ISS Crews / B.I. Kryuchkov, A.A. Altunin, P.P. Dolgov, V.I. Yaropolov, V.M. Usov, E.Yu. Irodov, D.I. Verba, V.S. Korennoy // Manned Space Flights – № 1 (22). – 2017.
- [2] Approach to the Grounding of the Tasks for Robotic Systems to Work in Open Space / P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov, V.S. Korennoy // Manned Space Flights. – № 3 (16). – 2015.
- [3] New Directions in Robotics for the Purposes of Manned Cosmonautics / Kryuchkov B.I., Usov V.M. // Manned Space Flights. – 2013. – № 1 (6). – 93–100 pp.
- [4] Safe Use of a Space Robotic System During Extravehicular Activity / V.S. Korennoy, P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov // Manned Space Flights. – № 1(18). – 2016.

- [5] Will a Robot Replace a Cosmonaut in Performing EVA Operations / Tsygankov O.S., Babaytsev D.V. // Manned Space Flights. – 2012. – № 2 (4). – 74–87 pp.
- [6] Statistical Analysis of Mass and Dimensions Parameters of Scientific Equipment Installed by Cosmonauts During Extravehicular Activity / Irodov E.Yu., Dolgov P.P., Korennoy V.S. // Manned space flights. – 2015. – № 4(17).
- [7] Hardware for Launching Small Space Vehicles. [Text]; Patent. 153436 Rus. Federation, МПК B64G 1/64 / Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korennoy V.S., Applicant and Patent Holder «Gagarin Research&Test CTC». – № 2015103959/11; applic. 06.02.15; publ. 20.07.15, Бюл. № 20. – 2 p.: il.
- [8] Small Space Vehicle for Monitoring the Space Station. [Text]; Patent 157041 Rus. Federation, МПК B64G 1/10 // Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korennoy V.S., Altunin A.A., Applicant and Patent Holder «Gagarin Research&Test CTC». – № 2015103958/11; applic. 06.02.15; publ. 20.11.15, Bulletin № 32. – 2 p.: il.
- [9] Simulator of Operating a Small Space Vehicle. [Text]; Patent 158082 Rus. Federation, МПК G09B 9/08. / Dolgov P.P., Irodov E.Yu., Korennoy V.S., Applicant and Patent Holder «Gagarin Research&Test CTC». – № 2015116944/11; applic. 06.05.15; publ. 20.12.15, Bulletin № 35. – 2 p.: il.

УДК 579.65

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИСЛОМОЛОЧНОГО ПРОБИОТИЧЕСКОГО ПРОДУКТА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ РИСКОВ ПОЛЕТОВ В ДАЛЬНИЙ КОСМОС

А.И. Кобатов

Канд. техн. наук, ст.н.с. А.И. Кобатов
(ФГУП «Гос.НИИ ОЧБ» ФМБА России, г. Санкт-Петербург)

В работе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием факторов космического полета на биологические характеристики микроорганизмов, входящих в состав экзомикрофлоры (микроорганизмы, присутствующие в атмосфере космического корабля) и эндомикрофлоры (микроорганизмы, заселяющие слизистые оболочки желудочно-кишечного тракта космонавта). Показано, что под влиянием повышенного радиационного фона на борту корабля микроорганизмы могут изменять свои свойства, вследствие чего создавать дополнительные технические и медицинские риски для членов экипажа корабля. Представлен подход к снижению уровня медицинских рисков посредством получения и использования на борту корабля кисломолочного пробиотического продукта, обладающего иммуномодулирующими свойствами.

Ключевые слова: экзомикрофлора, эндомикрофлора, ионизирующее излучение, медицинские риски, пробиотик, кисломолочный продукт, *Lactobacillus acidophilus*.

Reasoning of the Possibility to Use a Fermented Milk Probiotic Product for Mitigating Health Risks During Long-Term Space Missions. A.I. Kobatov

The paper discusses the issues relating to the influence of space flight factors on biological characteristics of microorganisms, the members of exomicroflora (microorganisms staying at the atmosphere inside the spacecraft) and of endomicroflora (microorganisms colonizing a cosmonaut gastrointestinal tract). It has been demonstrated that the microorganisms can change their characteristics in conditions of excessive radiation background aboard a space vehicle. This will produce extra technical and health risks for crew members. The paper presents an approach to mitigate health risks through production and use of acidophilic probiotic product, possessing an immunomodulatory effect, directly aboard a space vehicle.

Keywords: exomicroflora, endomicroflora, ionizing radiation, health risks, probiotic, acidophilic product, *Lactobacillus acidophilus*.

В своих ранних работах по космической философии основоположник современной космонавтики К.Э. Циолковский поставил ряд вопросов, пробудивших интерес к космическим исследованиям и во многом предопределивших ход развития современной космонавтики [15]. Так, для того, чтобы ответить на вопрос: «Какой бы смысл имела Вселенная, если бы не была заполнена органическим, разумным, чувствующим миром?», человечеству потребовалось в поисках «братьев по разуму» предпринять усилия по непосредственному запуску пилотируемых космических кораблей, вначале на близкую (околоземную) орбиту, имея ввиду, однако, что для ответа на данный вопрос необходимо, в перспективе, совершение длительных космических экспедиций к удаленным планетам.

В то же время уже сегодня, при совершении реальных полетов на околоземной орбите, удаленной от Земли на расстояние 400–450 км, специалистам, занятым в области практической космонавтики, приходится отвечать на другие, впервые возникшие вопросы, не ответив на которые невозможно планировать межпланетные путешествия. И главным здесь является вопрос: «Каким образом нивелировать неблагоприятные воздействия, оказываемые на организм человека факторами космического полета (ФКП), в процессе совершения длительной космической экспедиции?». В первую очередь, речь идет о влиянии повышенного радиационного фона на структуру и функции отдельных, жизненно важных органов и систем организма.

Известно, что за 12 месяцев полета на Международной космической станции (МКС) космонавты, по разным оценкам, получают максимальную эквивалентную дозу, равную приблизительно 100 мЗв [28]. В то же время датчик, установленный на борту *Curiosity*, в ходе полета к Марсу показал, что эквивалентная доза поглощенного радиационного облучения, полученная всего на протяжении 6 месяцев полета, равносильна примерно 1 году, проведенному на борту МКС [28]. Учитывая, что общая длительность экспедиции к Марсу должна составить около 500 суток, перспектива открывается не оптимистическая. Подобный пессимистический вывод делает и Ю. Паркер в работе «Как защитить космических путешественников» [11].

В связи с этим, в настоящее время интенсивно ведутся исследовательские работы по разработке инженерных способов, позволяющих снизить радиационный фон на борту пилотируемого космического корабля (ПКК). Одновременно с этим, специалистами в области биомедицины не прекращаются работы по поиску средств, позволяющих стимулировать естественный процесс восстановления биологических структур, поврежденных в результате воздействия ионизирующего излучения.

Известно, что в первую очередь при облучении поражаются клетки активно растущих тканей организма человека, так как они наиболее радиочувствительны в период деления и дифференцировки [20]. У человека это клетки кроветворной системы (время полного обновления клеток крови в норме составляет от 20 до 40 часов) и клетки слизистой, выстилающей

желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) (время обновления клеток кишечного эпителия – 2–6 суток) [16].

В то же время, к активно делящимся относятся также и клетки микроорганизмов как присутствующие в атмосфере космического корабля (экзо-микробиота), так и заселяющие внутренние полости тела человека (эндо-микробиота), для удобства объединенные в данной работе общим понятием «микробиота». Так, в первом случае, период деления клеток микроорганизмов составляет 30–60 мин, во втором – микроорганизмы, заселяющие, например, слизистую поверхность тонкого кишечника и относящиеся к медленно размножающимся, делятся за 20–24 часа, что, в любом случае, сопоставимо с временем полного обновления клеток крови [12].

Таким образом, мы вправе ожидать, что микроорганизмы, сопровождающие человека в процессе выполнения им космического полета, будут являться в такой же степени чувствительными к воздействию ионизирующего излучения, как и активно делящиеся клетки организма человека (клетки кроветворной системы и клетки слизистой поверхности ЖКТ).

В данной работе рассмотрены вопросы, связанные с влиянием ФКП на характеристики микроорганизмов, входящих как в состав экзомикробиоты, так и эндомикробиоты, а также то, каким образом эти изменившиеся под влиянием ионизирующего излучения микроорганизмы могут влиять на здоровье космонавтов в процессе совершения длительных космических экспедиций.

Биологическое действие ионизирующего излучения и «парадоксы радиобиологии»

Первичное действие радиации на любой биологический объект, будь то клетки, входящие в состав сложно организованной ткани, например, в состав слизистой оболочки кишечника, либо присутствующие в атмосфере бактериальные клетки, начинается с поглощения энергии излучения, что сопровождается возбуждением молекул и их ионизацией. При ионизации молекул воды (косвенное действие излучения) в присутствии кислорода возникают активные радикалы: атом водорода, гидроксильный радикал и электрон (H^* , OH^* , e^- и др.), а также весьма реакционные молекулы перекиси водорода (H_2O_2), активно включающиеся затем в цепь химических реакций в клетке. При ионизации органических молекул (прямое действие излучения) также возникают свободные радикалы, которые, включаясь в протекающие в организме химические реакции, нарушают течение обмена веществ и способствуют возникновению несвойственных организму соединений, что, в свою очередь, также нарушает процессы жизнедеятельности (рис. 1) [2, 3].

Особенно чувствителен к облучению синтез дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК) в ядре интенсивно делящихся клеток. Помимо этого, в результате цепных реакций, возникающих при поглощении энергии излучения, изменяются и другие компоненты клетки. Так, наряду с макромолекулами

(ДНК, ферменты и др.) на ионизирующее излучение реагируют и сравнительно малые молекулы (аденозинтрифосфорная кислота, коферменты и др.). Все это приводит к нарушению ферментативных реакций, физиологических процессов и клеточных структур.

Однако наиболее серьезные повреждения в результате воздействия ионизирующего излучения возникают в ядре клетки с находящимся в нем генетическим материалом.

Как показано на рисунке 1, следствием как прямого действия излучения, так и косвенного, являются повреждения, нанесенные генетическому аппарату клетки, что может явиться причиной возникновения мутаций в процессе дальнейшего ее деления.



Рис. 1. Биологическое действие ионизирующего излучения

В связи с этим в радиобиологии были разработаны положения, объединенные общим термином «парадоксы радиобиологии», которые необходимо учитывать специалистам, работающим в области космической медицины [20].

1. Глубокие нарушения жизнедеятельности вызываются ничтожно малыми количествами поглощаемой энергии. Так, энергия, поглощенная телом человека при облучении смертельной дозой, при превращении в тепловую привела бы к нагреву тела всего примерно на 0,001 °С. То есть наблюдается несоответствие: «Доза–эффект».

2. Биологическое действие ионизирующего излучения не ограничивается подвергнутым облучению организмом, но может распространяться и на последующие поколения, что объясняется действием на наследственный аппарат организма.

3. Для биологического действия ионизирующего излучения характерен скрытый (латентный) период, то есть развитие лучевого поражения наблюдается не сразу. Продолжительность латентного периода может варьировать от нескольких минут до десятков лет в зависимости от дозы облучения, радиочувствительности организма и наблюдаемой функции.

4. Возникающие в облучаемых клетках изменения ведут к нарушениям в тканях, органах и жизнедеятельности всего организма. Особенно выражена реакция тканей, в которых отдельные клетки живут сравнительно недолго.

Эти «парадоксы радиобиологии», первоначально предложенные Н.В. Тимофеевым-Ресовским применительно к человеку, в равной мере могут быть, на наш взгляд, применимы и к «микромиру»: микроорганизмам в атмосфере обитаемых отсеков ПКК, а также входящим в состав микрофлоры, заселяющей слизистые оболочки тела человека.

Данная работа является попыткой ответить на вопрос: насколько глубоко изменит микрофлора свои характеристики под влиянием ионизирующего излучения и в какой степени эти изменения могут повлиять на безопасность полета, а также здоровье космонавтов при выполнении длительной космической экспедиции.

Экзомикрофлора на борту ПКК

Рассматривая условия, в которых находятся космонавты в процессе выполнения космического полета, можно сказать, что герметичный замкнутый отсек корабля с точки зрения микробиолога есть объект повышенного риска, в котором созданы оптимальные условия по температуре и влажности для роста и размножения присутствующей в атмосфере корабля микрофлоры.

Под влиянием ФКП, в первую очередь повышенного радиационного фона на борту корабля, микроорганизмы могут мутировать и приобретать новые, не характерные для них свойства. Наглядно это проявляется в изменении их пищевых пристрастий. Так, на борту ПКК в качестве пищевого субстрата они начинают использовать декоративно-отделочные и конструк-

ционные материалы интерьера и оборудования, образуя на них бактериально-грибные ассоциации, что отмечается в литературе [34]. При эксплуатации станции «Мир» на ее борту постоянно обнаруживались бактерии и грибы, особенно на конструкционных материалах внутренней отделки, а также на металлических поверхностях. Такого же рода явления наблюдаются в настоящее время и при эксплуатации МКС, в связи с чем в течение ряда лет эксплуатации МКС на ее борту постоянно проводятся исследования по определению количества и состава микрофлоры. В частности отмечается, что на борту МКС, несмотря на предпринимаемые меры по снижению уровня обсемененности, в воздухе обнаружено порядка 80 различных штаммов микроорганизмов, из которых 41 штамм представлял бактерии и 39 – грибы. В то же время следует отметить, что суммарные значения по обсемененности в 95 % собранных на борту МКС образцах оказались ниже предельно допустимых значений, приведенных в регламентирующих документах. Так, в отсеке корабля допускается до 1000 КОЕ/м³ воздуха для бактерий и менее 100 КОЕ/м³ для грибов (КОЕ – колониобразующие единицы) [34]. Что касается концентрации микроорганизмов, находящихся в составе биопленок, растущих на различных поверхностях в отсеке корабля, то для них допустимые предельные значения несколько ниже, хотя уже сегодня на поверхности отделки и оборудования существуют зоны, где концентрация бактерий и грибов достигает значений 10⁶ КОЕ/100 см².

Как уже отмечалось, эти микроорганизмы образуют на различных поверхностях бактериально-грибные ассоциации в виде биопленок, которые, заселяя поверхности материалов, создают, в первую очередь, технические риски для экипажей, выполняющих длительные космические экспедиции. Технические риски объясняются тем, что растущие бактериально-грибные ассоциации, колонизируя поверхности, разрушают различные структурные материалы, включая синтетические полимеры, и даже, как отмечается отдельными авторами, вызывают коррозию металлов [1]. Механические разрушения полимеров происходят благодаря проникновению грибного мицелия в структуру материалов, таким образом разрушая ее. В свою очередь, входящие в состав биопленки бактерии в процессе своей жизнедеятельности вырабатывают экзометаболиты, которые дополнительно способствуют разрушению различных материалов. Участие человеческих патогенов: грибов (*Aspergillus niger* и др.) и бактерий (*Pseudomonas aeruginosa*) в процессе образования биопленок и последующей биодеградации материалов может серьезно ухудшить ситуацию на борту, добавив к техническим рискам и медицинские. Помимо прямого разрушения полимерных материалов такие биопленки формируют токсичные летучие фрагменты, которые дополнительно загрязняют атмосферу отсеков.

Основываясь на результатах клинико-физиологических исследований космонавтов, В.К. Ильин с соавторами отмечали качественные изменения на уровне эндомикрофлоры космонавтов:

– появление у космонавтов внутрикишечных дисбактериозов (сокращение бифидо- и лактофлоры);

– активацию оппортунистического патогенного компонента микрофлоры в различных биотопах, в первую очередь, в области желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) космонавта. Так, отмечается рост *Staphylococcus aureus*, увеличенные титры *Clostridium sp.*, *Proteus sp.*, *Klebsiella sp.* и других оппортунистических патогенов [8].

В то же время показано, что иммунная система космонавта, находящегося в течение длительного времени в условиях микрогравитации, ослабляется. Так показано, что нахождение космонавта в течение 6 месяцев в условиях космического полета приводит к заметным перестройкам в работе иммунной системы, подавляя работу целого ряда иммунных клеток [25].

Выявленные изменения возможно связаны с биоконтаминацией внутреннего объема корабля экзомикрофлорой, изменяющей свои характеристики под влиянием ФКП.

Таким образом, основные принципы, направленные на минимизацию рисков на борту ПКК со стороны экзомикрофлоры при выполнении длительных космических экспедиций, могут быть сформулированы следующим образом: «Дальнейшие научные исследования, сконцентрированные на исследовании проблем контаминации, главным образом от бактериальной аэрозоли, а также на контроле существующих средств и мер, используемых для антимикробной защиты», позволят минимизировать риски, связанные с экзомикрофлорой [26].

Эндофлора ЖКТ и ее роль в поддержании здоровья человека

Экологическая система, сложившаяся в процессе эволюции между макроорганизмом и заселяющей его микрофлорой, уникальна и не до конца понята. Однако на сегодняшний день твердо доказано, что эндогенная микрофлора (эндофлора), присутствующая в нормальных условиях на внутренних оболочках тела человека, в первую очередь на слизистой оболочке ЖКТ, является одним из важнейших регуляторных механизмов, обеспечивающим гомеостаз организма хозяина. Гомеостаз – это способность открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия.

Чтобы оценить роль, которую выполняет эндофлора ЖКТ в обеспечении постоянства внутренней среды организма, обычно приводят следующий пример [14]. Так, если условно развернуть всю поверхность слизистой кишечника человека, мы получим площадь, равную 400 м². И вся эта площадь заселена плотным газоном растущих колоний микроорганизмов общим количеством около 100 миллиардов клеток, что на два порядка превышает суммарное количество клеток организма человека. И именно эти

микроорганизмы являются основным барьером на пути проникновения патогенов во внутреннюю среду организма, обеспечивая ее гомеостаз. В связи с этим даже было введено понятие «колонизационной резистентности». По общепринятому определению, «колонизационная резистентность – это резистентность, с которой сталкиваются потенциально патогенные микроорганизмы при попытке колонизировать места обитания на слизистой оболочке одного из трех трактов, имеющих открытое сообщение с внешним миром: дыхательного, мочеполового и пищеварительного» [8].

За счет многообразия клеточного метаболизма бактерий различных групп (всего в ЖКТ насчитывают порядка 500 различных типов микроорганизмов) и продуцируемых ими ферментов, витаминов, гормонов и других биологически активных соединений, эндомикрофлора принимает активное участие в функционировании многих систем организма и выполняет важные физиологические функции.

1. Осуществляет тренировку иммунной системы.

Эффективность работы слизистой оболочки кишечника зависит от заселения ее интактной микрофлорой [19]. Для обеспечения этого фактора эффективности М-клетки (специализированные клетки слизистой) перманентно принимают микробные антигены, «презентируют» (представляют) их Т- и В-лимфоцитам, осуществляя, таким образом, их транспорт. С помощью этого механизма реализуется контролируемое противостояние чужеродному для организма антигенному материалу, а также собственной кишечной микрофлоре, измененной под влиянием ФКП.

В экспериментах по гнотобиологии на стерильных животных (животных, у которых отсутствует собственная внутрикишечная микрофлора) доказано, что в отсутствие эндомикрофлоры невозможно создание функционального защитного механизма. Такие животные в течение нескольких дней погибали от банальных инфекций в нормальной, населенной микроорганизмами среде бытового помещения. То есть, без эндомикрофлоры невозможно существование защитной системы.

2. Осуществляет заселение желудочно-кишечного тракта.

Различные отделы ЖКТ заселены характерными для них сообществами микроорганизмов, существенно различающимися по родовой принадлежности, количеству и составу. Всего в ЖКТ, по разным оценкам, насчитывают до 500 различных видов микроорганизмов, причем около 40 % кишечной микрофлоры пока не изучено [14].

В желудке живут лишь некоторые устойчивые к кислоте микроорганизмы: стафилококки, молочнокислые бактерии и некоторые другие микроорганизмы общей концентрацией 10^1 – 10^3 КОЕ/г. В тонком кишечнике по мере удаления к дистальному отделу плотность микробного заселения возрастает и достигает 10^4 – 10^6 КОЕ/г. В тонком кишечнике доминируют аэробные и анаэробные, живущие в отсутствие кислорода, виды микроорганизмов. Среди них присутствуют молочнокислые бактерии, различные формы

Coli-бактерий, стрептококки, а также бифидо- и фузобактерии. Толстая кишка – один из самых плотно заселенных бактериями отделов ЖКТ, плотность микроорганизмов в данном случае достигает 10^{10} – 10^{12} КОЕ/г. Здесь доминируют анаэробные микроорганизмы, в том числе молочнокислые бациллы, бифидобактерии и эубактерии.

3. Формирует микробиологический барьер: форпост защитной системы.

Одной из наиболее важных функций непатогенной кишечной микрофлоры является создание микробиологического барьера, так называемой «колонизационной резистентности», которая «подключена» к мукозоассоциированной лимфоидной ткани ЖКТ. Создание «колонизационной резистентности» обеспечивается в первую очередь молочнокислыми бактериями, бифидобактериями и бактероидами. Этот барьер защищает от патогенных микроорганизмов, таких как сальмонеллы, энтеротоксичная *E.coli*, шигеллы или иерсинии, а также от факультативных патогенов, таких как кандиды или клостридии. Этот антагонистический эффект эндомикрофлоры по отношению к патогенам основан на различных механизмах, а именно:

– связывание с рецепторами кишечной слизистой оболочки и плотное заселение напластованного муцинового слоя кишечника;

– синтез и высвобождение веществ, обладающих бактерицидным или бактериостатическим эффектом, таких как сероводород, перекись водорода и антибиотики;

– конкурентная борьба за пищевой субстрат, витамины и ростовые факторы;

– снижение уровня pH посредством высвобождения кислых метаболитических продуктов, таких как молочная кислота и уксусная кислота.

Таким образом, эндомикрофлора поддерживает иммунный статус организма, а также участвует:

– в обменных процессах (продукция энзимов для метаболизма белков, липидов, нуклеиновых и желчных кислот), поддерживает водно-солевой баланс, участвует в синтезе витаминов групп В, К, Д;

– участвует в биохимических процессах пищеварения и регуляции газовой среды кишечника;

– участвует в инаktivации экзогенных и эндогенных токсических продуктов при помощи механизмов биотрансформации и биодеградации.

В связи с этим вся слизистая поверхность кишечника с находящимися на ее поверхности резидентными микроорганизмами эндомикрофлоры и прилегающей к ней диффузной лимфоидной тканью получила в настоящее время название «мукозо-ассоциированной лимфоидной ткани» [5, 19, 29].

Итак, учитывая то, какую роль играет эндомикрофлора в поддержании здоровья человека, можно говорить, что постоянство качественного и количественного состава эндомикрофлоры (внутрикишечный «гомеостаз») является обязательным и необходимым условием для успешного выполнения продолжительного космического полета.

Помимо этого следует добавить, что стали появляться данные, позволяющие по-новому взглянуть на роль эндомикрофлоры, выполняющей, помимо поддержания иммунитета, и другие, совершенно неожиданные функции жизнедеятельности организма. Так, в экспериментах на мышах было показано, что, искусственно изменяя состав внутрикишечной микрофлоры, можно влиять на поведение животных [13]. Данный факт пока еще в должной мере не привлек внимание специалистов, занимающихся вопросами обеспечения безопасности полетов. В то же время, в случае совершения полетов на более высоких орбитах, с выходом за пределы магнитосферы Земли, следует ожидать увеличения интенсивности ионизирующего излучения на борту корабля и, как следствие, увеличения числа мутировавших клеток со стороны эндомикрофлоры кишечника, что может повлечь за собой и изменение поведения космонавта.

В настоящее время известен только один способ, посредством которого микроорганизмам удается избежать негативных последствий, вызванных факторами космического полета – это нахождение их в состоянии анабиоза (нежизнедеятельном состоянии). Так, в экспериментах «Лактолен», проведенных на борту МКС в период с 2007 г. по 2012 г., было показано, что сухие клетки лактобацилл, искусственно переведенные в состояние анабиоза посредством их сублимационного высушивания, успешно перенесли 2-летнее нахождение на борту МКС, полностью сохранив все исходные характеристики [10].

Таким образом, на повестку дня был поставлен вопрос о необходимости разработки оригинального способа сохранения «гомеостаза» внутрикишечной микрофлоры в активном физиологическом состоянии.

Поддержание «гомеостаза» эндомикрофлоры – одно из условий, необходимых для успешного осуществления космической экспедиции

Микробиоценозы слизистых достаточно устойчивы, однако под влиянием различных факторов физической и химической природы в них могут происходить качественные и количественные изменения (дисбиоз). Следствием дисбиозов является снижение «колониционной резистентности», приводящее к возникновению различных инфекционных заболеваний. Показано, что в процессе космического полета у космонавтов возрастало количество биотопов с высоким содержанием условно-патогенных микроорганизмов, в то время как уровень содержания микрофлоры «защитных групп», в первую очередь молочнокислых и бифидобактерий, часто уменьшался до величин, не регистрируемых микробиологическими методами [26]. Подобного рода факты были обнаружены при обследовании космонавтов, находившихся в условиях микрогравитации в течение 96 суток. Также были отмечены дисбиотические сдвиги различной степени выраженности у всех членов

шечной микрофлоры под влиянием пробиотиков поддерживается не всеми исследователями [17, 18]. Не умаляя роли пробиотика в поддержании здоровья человека, данными авторами ему отводится, в первую очередь, роль антагониста по отношению к условно-патогенным и патогенным агентам, попавшим в организм человека с пищей, водой, воздухом. В связи с этим при изучении пробиотического потенциала того или иного препарата обычно указываются следующие характеристики [17]:

- биологическая активность препарата (количество КОЕ/г);
- антагонизм по отношению к условно-патогенным и патогенным микроорганизмам. Данная характеристика определяется в прямых экспериментах и указывается в паспорте на препарат;
- способность к кислотообразованию. Обычно определяется активная кислотность препарата – рН;
- антибиотикоустойчивость по отношению к определенным группам антибиотиков.

Как видим, в приведенных характеристиках отсутствует какое-либо указание на возможное участие пробиотика в функции восстановления и поддержания эндогенной микрофлоры.

Подобного же взгляда на роль пробиотиков придерживаются и специалисты медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна. Так, при выполнении экспериментальной работы по оценке эффективности действия пробиотика «Витафлор» на течение острой лучевой болезни (ОЛБ), искусственно вызванной у мышей воздействием гамма-лучей, показано, что полученный в эксперименте положительный эффект от действия пробиотика связан, в первую очередь, с его противоионной активностью [7].

В связи с этим мы можем предположить, что полученный положительный эффект от использования пробиотиков «Лактобактерин» и «Бифидобактерин» у космонавтов [8] также связан с их антагонистической активностью по отношению к патогенным микроорганизмам и никоим образом не характеризует влияние пробиотика на гомеостаз эндомикрофлоры.

Одновременно с этим следует отметить, что наряду с антагонистической активностью большинство штаммов микроорганизмов, входящих в состав различных пробиотиков, в первую очередь, молочнокислые бактерии, обладают иммунномодулирующей активностью [5, 14, 19, 22, 29]. Клетки лактобацилл, воздействуя на различные звенья иммунитета, стимулируют фагоцитарную активность макрофагов и нейтрофилов, усиливают активность клеток-киллеров, стимулируют производство иммуноглобулина А клетками слизистой оболочки усиливают Т-клеточный иммунитет. Все это позволяет отнести пробиотические препараты к классу иммуностимулирующих препаратов [14].

Однако положительное влияние, оказываемое на здоровье человека пробиотическими штаммами микроорганизмов, не исчерпывается их антагонистическими, по отношению к патогенам, и иммунномодулирующими

свойствами. Появившиеся в последнее время в литературе данные указывают на то, что отдельным штаммам пробиотических бактерий присущи антиму-тагенные свойства, что является крайне важным, так как одним из основных биологических действий, оказываемых на организм человека ионизирующим излучением, являются мутационные изменения в клетках быстро расту-щих тканей [20]. Авторами в работе [4] была проведена проверка антиму-тагенной активности более 70 штаммов молочнокислых бактерий, относя-щихся к родам *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Lactococcus* и *Bifidobacterium* и входящих в состав пробиотиков, которая показала, что:

- в наибольшей степени антимутагенной способностью обладают аци-дофильные лактобациллы;
- антимутагенная активность наиболее ярко проявляется у клеток *Lactobacillus acidophilus*, находящихся в активном физиологическом состоя-нии (в виде кисломолочного продукта) [22, 30, 31, 32].

Следует отметить, что наряду с пробиотическими препаратами для под-держания здоровья человека используют также и другие биологически ак-тивные добавки (БАД), так называемые пребиотики и синбиотики [6].

Пребиотики – это препараты, не содержащие в своем составе клеток микроорганизмов, а состоящие либо из продуктов метаболизма пробиотичес-ких бактерий, либо из природных полимеров, витаминов и вспомогаель-ных веществ.

Синбиотики – это препараты, представляющие из себя комплекс про-биотика с пребиотиком.

Рассматривая влияние данных видов БАДов на состояние эндомикро-флоры человека, ряд исследователей в последнее время активно продвигают мысль о том, что наибольшими способностями по поддержанию «гомеоста-за» внутрикишечной микрофлоры обладают препараты пребиотики [17, 18]. Так, работая с пребиотиками, в том числе с надосадочной жидкостью, со-стоящей из продуктов метаболизма пробиотических микроорганизмов *Lacto- bacillus plantarum*, они показали, что «наиболее выраженное положительное влияние на восстановление кишечной микробиоты конвенциональных бе-лых мышей и морских свинок с антибиотико-ассоциированным дисбакте-риозом оказывают пребиотики, в том числе метаболиты надосадочной жид-кости нативной культуры лактобактерий *L. plantarum*». Учитывая объем выполненных авторами экспериментальных работ, а также глубину прора-ботки вопроса, можно ожидать, что сделанный авторами вывод является дос-таточно обоснованным.

Выводы

Таким образом, имея ввиду, что основной задачей, сформулированной нами ранее, является защита здоровья человека, находящегося в неблагоприятных условиях жизнеобитания в процессе совершения длительного космического

полета, по-видимому, наиболее обоснованным будет выбор препарата синбиотика, совмещающего в себе свойства пробиотика и пребиотика.

В качестве такого препарата, на наш взгляд, может быть предложен кисломолочный пробиотический продукт, включающий в себя как живые клетки пробиотических микроорганизмов, так и продукты их метаболизма.

История использования человечеством кисломолочных продуктов насчитывает несколько тысячелетий. Впервые они были получены, по разным данным, либо на Ближнем Востоке, либо в Индии. В любом случае, благодаря присущим им полезным свойствам, кисломолочные продукты активно используются с тех пор вплоть до настоящего времени. В 1870 году Луи Пастер впервые связал полезные свойства кисломолочных продуктов с обнаруженными в их составе микроскопическими живыми частицами, позже названными им молочнокислыми бактериями. В 1907 году И.И. Мечников выдвинул гипотезу о пользе внутрикишечной замещающей терапии, связанной с профилактическим потреблением «болгарской закваски», кисломолочного продукта, содержащего штаммы *Lactobacillus bulgaricus*. В настоящее время при получении кисломолочных продуктов используется широкий спектр микроорганизмов: *L. acidophilus*, *L. lactis*, *L. casei*, *L. reuteri*, *Str. thermophilus*, *Bifidobacterium spp.*, однако показано, что в наивысшей степени пробиотическими свойствами обладает кисломолочный продукт, содержащий *L. acidophilus* [32]. В связи с этим, применительно к данному кисломолочному продукту авторами была разработана схема приема продукта в качестве лечебно-профилактического для поддержания здоровья человека. Так, рекомендуется 2 раза в год (весной и осенью) потреблять непрерывно в течение 2 недель такой объем кисломолочного продукта, который бы гарантировал поступление в организм не менее 10^9 живых клеток *L. acidophilus* ежедневно [32].

По-видимому, подобного рода схема, с некоторой корректировкой, учитывающей экстремальные условия, в которых находится космонавт при совершении длительного полета в условиях враждебной окружающей среды, может быть принята и в нашем случае. Однако для проведения аналогичных лечебно-профилактических мероприятий на борту ПКК необходимо постоянное наличие подобного рода кисломолочного продукта, содержащего живые клетки ацидофильных лактобацилл.

С этой целью в настоящее время в рамках реализации космического эксперимента «Пробиовит» проводится отработка упрощенной технологии, которая бы позволяла силами экипажа получать на борту ПКК кисломолочный продукт, содержащий живые клетки ацидофильных лактобацилл, обладающий пробиотическими и иммуномодулирующими свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комплексные исследования биофака МГУ им. М.В. Ломоносова в рамках федеральной космической программы («Пилотируемая космонавтика») на борту МКС / Алехова Т.А., Александрова А.В., Захарчук Л.М. и др. // Сб. тезисов «Научные исследования и эксперименты на МКС». – 9–11 апреля 2015 г. – М. – С. 107–108.
- [2] Барабой В.А. Популярная радиобиология. – Киев: Наукова думка, 1988. – С. 189.
- [3] Дертингер Г., Юнг Х. Молекулярная радиобиология. – М.: Атомиздат, 1973. – С. 14.
- [4] Воробьева Л.И., Абилов С.К. Антимутагенные свойства бактерий (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 2002. – Т. 38. – № 2. – С. 115–127.
- [5] Влияние бактерий рода *Lactobacillus* на продукцию цитокинов клетками Пейеровых бляшек экспериментальных животных / Зорина В.В., Николаева Т.Н., Наровлянский А.Н. // Иммунология. – 2004. – № 5. – С. 288–290.
- [6] Зрячкин Н.И. Новый подход к классификации пребиотиков, пробиотиков и синбиотиков // Фарматека. – 2007. – № 2. – С. 58–61.
- [7] Снижение опасности носительства условно-патогенной микрофлоры при радиационном поражении с помощью пробиотика «Витафлор» / Иванов А.А., Симбирцев А.С., Мальцев В.Н. и др. // Медицина экстремальных ситуаций. – 2013. – № 1(43). – С. 76–81.
- [8] Колонизационная резистентность организма в измененных условиях обитания / Ильин В.К., Воложин А.И., Виха Г.В. – М.: Наука, 2005. – С. 275.
- [9] Пробиотик «Витафлор» как возможное средство защиты космонавтов от негативных последствий воздействия ионизирующего излучения / Кобатов А.И., Вербицкая Н.Б., Добролеж О.В., Петров Л.Н. // Медицина экстремальных ситуаций. – 2007. – № 2 (20). – С. 72–79.
- [10] Итоги выполнения КЭ «Биоэмульсия» и «Лактолен» на РС МКС в период с 2007 г. по 2013 г. / Кобатов А.И., Евстигнеев В.И., Гуреева Е.А., Вербицкая Н.Б., Добролеж О.В. // Научные исследования и эксперименты на МКС: Сб. тезисов. – М., 2015. – С. 100–101.
- [11] Паркер Ю. Как защитить космических путешественников // В мире науки. – 2006. – № 6. – С. 15–20.
- [12] Пиневиц А.В. Микробиология. Биология прокариотов. Учебник в 3-х т. – Т. 2. – Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2007. – С. 330.
- [13] Резник Н.Л. Микробы, которые действуют на нервы // Химия и жизнь. – 2012. – № 6. – С. 40–42.
- [14] Руш К., Петерс У. Кишечник – центр управления иммунной системы // Биологическая медицина. – 2003. – № 3. – С. 4–8.
- [15] Циолковский К.Э. Философия космической эпохи. – М.: Академический проект, 2014. – С. 238.
- [16] Человек. Медико-биологические данные. – М.: Медицина, 1977. – С. 493.
- [17] Аутопробиотикотерапия / Чичерин И.Ю., Погорельский И.П., Лундовских И.А. и др. // Журнал инфектологии. – 2013. – Т. 5. – № 4. – С. 43–54.
- [18] Экспериментальный псевдотуберкулез: оценка возможности профилактики, лечения и коррекции дисбиотических нарушений кишечной микрофлоры / Чичерин И.Ю., Погорельский И.П., Лундовских И.А. и др. // Кишечная микрофлора: взгляд изнутри: Инновационный сборник научных статей. – 2013. – Выпуск № 2. – С. 124–129.

- [19] Хорошилова Н.В. Иммуномодулирующее и лечебное действие пробиотиков // Иммунология. – 2003. – № 6. – С. 352–356.
- [20] Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. – М.: Высшая школа, 2004. – С. 549.
- [21] Bodana A.R., Rao D.R. Antimutagenic Activity of Milk Fermented by *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus* // J. Dairy Sci. – 1990. – Vol. 73. – P. 3379–3384.
- [22] Dugas B., Mercenier A. Immunity and Probiotics // Trends Immunology Today. – 1999. – Vol. 20(9). – P. 387–390.
- [23] Hosoda M., Hashimoto H. Antimutagenicity of Milk Cultured with Lactic Acid Bacteria Against N-Methyl-N-Nitro-N-Nitrosoguanidine // J. Dairy Sci. – 1992. – V. 75. – P. 976–981.
- [24] <http://alcala.ru/medicinskaya/slovar-P/123619.shtml>.
- [25] <http://ria.ru/science/20150904/1229302695.html/>
- [26] <http://readings.gmik.ru/lecture/2001>
- [27] <http://www.horizonpress.com>.
- [28] <http://www.km.ru/front-projects/amerikanzi-nikogda-ne-letali-na-lunu/vyhe-24-000-km-nad-zemlei-radiatsiya-ubivaet-vse-zhivoe>
- [29] Kekkonen R. Immunomodulatory Effects of Probiotic Bacteria in Healthy Adults. Academic Dissertation, Helsinki, Finland. – 2008. – P. 119.
- [30] Matar Ch., Nadathur S.S. Antimutagenic Effects of Milk Fermented by *Lactobacillus helveticus* L 89 and a Protease-Deficient Derivative // J. Dairy Sci. – 1997. – V. 80. – P. 1965–1970.
- [31] Nadathur S.R., Gould S.J., Bakalinsky A.T. Antimutagenicity of Fermented Milk // J. Dairy Sci. – 1994. – Vol. 77. – P. 3287–3295.
- [32] NATO ASI Series. Vol. H 98 Lactic Acid Bacteria: Current Advances in Metabolism, Genetics and Applications. – Edited by F. Bozoglu and B. Ray: Springer. – Berlin. – 1996. – P. 1–136.
- [33] Ng S.C., Hart A.L., Kamm M.A. Mechanisms of Action of Probiotics: Recent Advances // Inflamm. Bowel Dis. – 2009. – Vol. 15(2). – P. 300–309.
- [34] Novikova N.D. Review of the Knowledge of Microbial Contamination of the Russian Manned Spacecraft // Microbial Ecology. – 2004. – Vol. 47. – Issue 2. – P. 127–132.

REFERENCES

- [1] Complex Research Performed by Faculty of Biology of M.V Lomonosov Moscow State University under the Federal Space Program («Manned Space Exploration») aboard the ISS / Alekhova T.A., Aleksandrova A.V., Zakharchuk L.M. and others. // Book of Abstracts «Scientific Researches and Experiments Aboard the ISS». – April 9–11, 2015. – M. – P. 107–108.
- [2] Baraboy V.A. Popular Radiobiology. – Kiev: Naukova Dumka, 1988. – P. 189.
- [3] Dertinger G., Yung H. Molecular Radiobiology. – M.: Atomizdat, 1973. – P. 14.
- [4] Vorobyova L.I., Abilev S.K. Antimutagenic Properties of Bacteria (Review)// Applied Biochemistry and Microbiology. – 2002. – V. 38. – № 2. – P. 115–127.
- [5] Effects of *Lactobacillus* Type Bacteria on the Production of Cytokines by Cells of Peyer's Patches of Experimental Animals / Zorina V.V., Nikolaeva T.N., Narovlyanskiy A.N. // Immunology. – 2004. – № 5. – P. 288–290.

- [6] Zryachkin N.I. A New Approach to the Classification of Prebiotics, Probiotics and Synbiotics // Pharmateka. – 2007. – № 2. – P. 58–61.
- [7] Using «Vitaflor» Probiotic to Reduce the risk of Opportunistic Microflora Carriage in Case of Radiation Injury / Ivanov A.A., Simbirtsev A.S., Maltsev V.N. and others. // Medicine of Extreme Situations. – 2013. – № 1(43). – P. 76–81.
- [8] Colonization Resistance of Organism Under Changed Habitat Conditions / Ilyin V.K., Volozhin A.I., Vikha G.V. – M.: Nauka, 2005. – P. 275.
- [9] Probiotic «Vitaflor» as a Possible Means of Protecting Cosmonauts From the Negative Consequences of Nuclear Radiation Effect / Kobatov A.I., Verbitskaya N.B., Dobrolezh O.V., Petrov L.N. // Medicine of Extreme Situations. – 2007. – № 2 (20). – P. 72–79.
- [10] Results of SE «Bioemulsiya» and SE «Laktolen» Aboard the ISS Russian Segment in the Period From 2007 to 2013. / Kobatov A.I., Evstigneev V.I., Gureeva E.A., Verbitskaya N.B., Dobrolezh O.V. // Scientific Researches and Experiments Aboard the ISS: Book of Abstracts. – M., 2015. – P. 100–101.
- [11] Parker Yu. How to Defend Space Explorers // In the World of Science. – 2006. – № 6. – P. 15–20.
- [12] Pinevich A.V. Microbiology. Biology of Prokaryotes. Textbook in 3 Volumes. – V. 2. – St. Petersburg University Press, 2007. – P. 330.
- [13] Reznik N.L. Microbes that Effect on Nerves // Chemistry and Life. – 2012. – № 6. – P. 40–42.
- [14] Rush K., Peters U. Intestine – the Control Center of Immune System // Biomedicine. – 2003. – № 3. – P. 4–8.
- [15] Tsyolkovskiy K.E. Philosophy of Space Age. – M.: Academic Project, 2014. – P. 238.
- [16] Human. Biomedical Data. – M.: Meditsina, 1977. – P. 493.
- [17] Autoprobiotic Therapy / Chicherin I.Yu., Pogorelskiy I.P., Lundovskikh I.A. and others. // Journal of Infectology. – 2013. – V. 5. – № 4. – P. 43–54.
- [18] Experimental Pseudotuberculosis: Evaluation of Possibility to Prevent and Treat Dysbiotic Disorders of Intestinal Microflora / Chicherin I.Yu., Pogorelskiy I.P., Lundovskikh I.A. and others. // Gut Flora From the Inside Out: Innovative Collection of Scientific Articles. – 2013. – Issue № 2. – P. 124–129.
- [19] Khoroshilova N.V. Immunomodulatory and therapeutic effects of probiotics // Immunology. – 2003. – № 6. – P. 352–356.
- [20] Yarmonenko S.P., Vaynson A.A. Radiobiology of Humans and Animals. – M.: Vysshaya Shkola, 2004. – P. 549.
- [21] Bodana A.R., Rao D.R. Antimutagenic Activity of Milk Fermented by *Streptococcus Thermophilus* and *Lactobacillus Bulgaricus* // J. Dairy Sci. – 1990. – Vol. 73. – P. 3379–3384.
- [22] Dugas B., Mercenier A. Immunity and Probiotics // Trends Immunology Today. – 1999. – Vol. 20(9). – P. 387–390.
- [23] Hosoda M., Hashimoto H. Antimutagenicity of Milk Cultured with Lactic Acid Bacteria Against N-Methyl-N-Nitro-N-Nitrosoguanidine // J. Dairy Sci. – 1992. – V. 75. – P. 976–981.
- [24] <http://alcala.ru/medicinskaya/slovar-P/123619.shtml>.
- [25] <http://ria.ru/science/20150904/1229302695.html/>
- [26] <http://readings.gmik.ru/lecture/2001>
- [27] <http://www.horizonpress.com>.

- [28] <http://www.km.ru/front-projects/amerikanzi-nikogda-ne-letali-na-lunu/vyhe-24-000-km-nad-zemlei-radiatsiya-ubivaet-vse-zhivoe>
- [29] Kekkonen R. Immunomodulatory Effects of Probiotic Bacteria in Healthy Adults. Academic Dissertation, Helsinki, Finland. – 2008. – P. 119.
- [30] Matar Ch., Nadathur S.S. Antimutagenic Effects of Milk Fermented by *Lactobacillus Helveticus* L 89 and a Protease-Deficient Derivative // J. Dairy Sci. – 1997. –V. 80. – P. 1965–1970.
- [31] Nadathur S.R., Gould S.J., Bakalinsky A.T. Antimutagenicity of Fermented Milk // J. Dairy Sci. – 1994. – Vol. 77. – P. 3287–3295.
- [32] NATO ASI Series. Vol. H 98 Lactic Acid Bacteria: Current Advances in Metabolism, Genetics and Applications. – Edited by F. Bozoglu and B. Ray: Springer. – Berlin. – 1996. – P. 1–136.
- [33] Ng S.C., Hart A.L., Kamm M.A. Mechanisms of Action of Probiotics: Recent Advances // Inflamm. Bowel Dis. – 2009. – Vol. 15(2). – P. 300–309.
- [34] Novikova N.D. Review of the Knowledge of Microbial Contamination of the Russian Manned Spacecraft // Microbial Ecology. – 2004. – Vol. 47. – Issue 2. – P. 127–132.

ИСТОРИЯ. СОБЫТИЯ. ЛЮДИ

HISTORY. EVENTS. PEOPLE

УДК 612.017.2

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР В АВИАЦИИ И КОСМОНАВТИКЕ

Т.Б. Нестерович, А.А. Меденков, Н.М. Козлова

Т.Б. Нестерович (НИУ «Московский авиационный институт»)
Докт. мед. наук, канд. психол. наук, профессор А.А. Меденков
Канд. техн. наук, доцент Н.М. Козлова (НИУ «Московский авиационный институт»)

В статье анализируются материалы конференции «Человеческий фактор в авиации и космонавтике: становление и актуальность учета». Приводятся данные о направлениях и результатах психофизиологических исследований в отечественной авиационной медицине в довоенный и послевоенный периоды. Показано содержание исследований по медико-биологической подготовке первых космических полетов. Отмечается вклад отечественных специалистов в подготовку и осуществление космического полета Ю.А. Гагарина. Рассматриваются особенности развития методологии по направлениям учета психофизиологических возможностей человека в авиации и космонавтике. Определяются актуальные проблемы, подлежащие решению в интересах развития космонавтики и подготовки межпланетных экспедиций. **Ключевые слова:** человеческий фактор, космические полеты, эргономическое обеспечение, психология, функциональное состояние, психофизиологическая надежность.

Human Factors in Aviation and Space Exploration.

T.B. Nesterovich, A.A. Medenkov, N.M. Kozlova

The paper analyses materials of the conference “Human factors in aviation and space exploration: formation and importance of taking them into consideration” and provides information about the directions and results of psychophysiological studies in domestic aviation medicine in the pre- and post-war periods. Research data on biomedical training for the first space flights is given. The contribution made by national specialists in the preparation and implementation of the space flight of Yuri Gagarin is shown. The peculiarities of developing a methodology of taking into account the psychophysiological capabilities of a human in aviation and spaceflight are considered. The topical problems subject to resolve in the interests of further space exploration and preparation of interplanetary expeditions are identified.

Keywords: human factor, space flights, ergonomic software, psychology, functional status, psychophysiological reliability.

По инициативе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и Научно-технического общества авиационной и космической медицины под эгидой Российского фонда фундаментальных исследований 23–25 ноября 2017 года состоялась научная конференция «Человеческий фактор в авиации и космонавтике: становление и актуальность учета». Конференция проводилась на базе Научно-исследовательского испытательного центра (авиационно-космической медицины и военной эргономики). Она была посвящена 70-летию со дня создания Научно-исследовательского испытательного института авиационной медицины и 60-летию полета Лайки.

Пленарные сообщения на конференции касались истории становления отечественной авиационной медицины и учета психофизиологических возможностей летчика для повышения его профессиональной надежности и безопасности полетов, особенно на начальном этапе развития отечественной авиации, а также актуальных проблем развития авиации и космонавтики [1, 2, 3].

В сообщении И.М. Жданько с соавт. [9] освещались вопросы истории становления учета психофизиологических характеристик и возможностей человека в отечественной авиации и космонавтике. Оценивался вклад в развитие отечественной авиационной медицины Центральной психофизиологической лаборатории. Отмечалась важность создания в стране Института авиационной медицины, сотрудники которого успешно решали актуальные проблемы повышения боеспособности летчиков накануне и в период Великой Отечественной войны [17]. Основной акцент в сообщении был сделан на работах созданного в 1947 году Научно-исследовательского испытательного института авиационной медицины. После преобразования в 1959 году института в Государственный научно-исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины, его сотрудники совместно с Центральным научно-исследовательским авиационным госпиталем в рамках специальной научно-исследовательской работы обосновывали принципы отбора членов экипажей ракетных летательных аппаратов. Показано, что многие успехи послевоенного развития советской авиации были обеспечены эффективной работой сотрудников этого института. Особым достижением явилась подготовка и осуществление первого орбитального космического полета Ю.А. Гагарина. За вклад в подготовку и осуществление космического полета Ю.А. Гагарина Государственный научно-исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины был награжден орденом Красной Звезды, а 92 его сотрудника удостоены государственных наград.

После создания в 1963 году Института медико-биологических исследований и передачи ему космической тематики, сотрудники Государственного научно-исследовательского испытательного института авиационной и космической медицины сосредоточились на формировании системного меди-

ко-технического сопровождения разработок, испытаний и эксплуатации не только авиационных комплексов, но и пунктов и органов управления авиацией, командных пунктов и систем управления воздушным движением. В институте разрабатывались методология проведения таких исследований, методы, концептуальный аппарат и нормативные документы проведения системных, комплексных и экспертных исследований. Методологической основой исследований стал психофизиологический анализ профессиональной деятельности летного и инженерно-технического состава и оперативных расчетов командных пунктов и центров управления авиацией. Жизненно важным для отечественной авиации стало инженерно-психологическое направление исследований. Обосновывались и разрабатывались рекомендации по доработке, улучшению и совершенствованию органов управления и отображения информации, распределению функций между летчиком и бортовым комплексом, а также по автоматизации алгоритмов подготовки и принятия решений. Практически значимыми по своему результату были исследования по оценке функционального состояния летного состава в процессе работы в целях профилактики утомления, переутомления и предупреждения снижения в связи с этим психофизиологической надежности профессиональной деятельности. Рекомендации разрабатывались в интересах нормирования труда, оценки готовности к полетам, повышения устойчивости организма к воздействию факторов полета, восстановления функционального состояния после полетов и вынужденного приземления, а также в интересах продления летного долголетия [15, 16].

Повышенный интерес у участников конференции вызвали материалы сообщения А.А. Меденкова, Т.Б. Нестерович и С.Л. Рысаковой об Институте авиационной медицины [26]. После создания в 1935 году Авиационного научно-исследовательского санитарного института, в авиации открылись новые возможности проведения системных медико-психологических и психофизиологических исследований. Разрабатывались санитарно-гигиенические требования к рабочему месту летчика и системам жизнеобеспечения. В июне 1936 года Авиационный научно-исследовательский санитарный институт РККА переименовывается в Институт авиационной медицины ВВС РККА им. академика И.П. Павлова с подчинением начальнику Воздушных сил РККА. За время существования института его сотрудниками был заложен фундамент для развития отечественной авиационной медицины [6, 7]. При этом основными направлениями исследований являлись разработка норм медицинского отбора в авиации, обоснование практических рекомендаций по медицинскому обеспечению авиации, подготовка предложений по оборудованию кабины, организации обучения авиационных врачей и повышения их квалификации на курсах усовершенствования. Исследования в институте были нацелены на повышение боеготовности авиации и боеспособности летного состава за счет психофизиологического отбора и медицинского освидетельствования летного состава, обеспечения их функ-

циональной готовности и поддержания работоспособности во время полета [4]. Повышенное внимание уделялось улучшению условий деятельности: оборудованию кабины, приборной доски, средств отображения полетной информации и сигнализации. Основой разработки рекомендаций в этом направлении явились результаты выявления связи летных происшествий с ошибками восприятия и пространственной ориентировки. Результаты этих исследований имели практическую реализацию. Медицинские рекомендации и требования вошли в наставление по высотной подготовке ВВС. В частях была внедрена барокамерная тренировка летного состава, повышающая их устойчивость к гипоксии. Создана кислородная маска и жизненная аппаратура, обеспечивающая работоспособность при полетах в стратосфере. Установлены границы переносимости организмом летчика перегрузок в скоростном полете и рекомендованы мероприятия по повышению выносливости к перегрузкам. Разработаны нормы освещения кабины и авиаприборов при ночных полетах. Подготовлено расписание болезней по отбору кандидатов в летные училища и по переосвидетельствованию летно-технического состава. Установлены нормы питания летного состава на мирное и военное время. Специалисты института участвовали в обосновании решения правительства о строительстве санаториев и домов отдыха для летного состава. К началу войны на краткосрочных курсах институтом подготовлено около 1000 авиационных врачей. Изданы 4 тома трудов и учебник «Основы авиационной медицины» [21]. В научных журналах было опубликовано свыше 200 научных статей. Во время Великой Отечественной войны ведущее место в работе института до его расформирования в июле 1943 года заняла врачебно-летная экспертиза. В начале войны был подготовлен и введен в действие приказ начальника Главного военно-санитарного управления Красной Армии, регулирующий возвращение летчиков в строй после ранений и медицинский отбор в авиашколы в военное время. Издано руководство для врачебно-летных комиссий на военное время. Подготовлены изменения хирургических статей в расписании болезней, утвержденного в 1943 году. В отделе врачебно-летной экспертизы были подготовлены заключения по результатам обследования свыше 2000 летчиков [5].

В выступлении М.Н. Хоменко и сообщении А.А. Меденкова с соавт. [23] была представлена медико-биологическая подготовка полета человека в космос. В Научно-исследовательском испытательном институте авиационной медицины она осуществлялась под руководством В.И. Яздовского. Своим научным и организаторским вкладом в медико-биологическую подготовку первых пилотируемых космических полетов он навсегда вписал свое имя в историю человечества. В 1956 году по решению Министерства обороны в институте был образован научно-исследовательский отдел по исследованию и медицинскому обеспечению полетов в верхние слои атмосферы. В институте этим занимались В.И. Яздовский, О.Г. Газенко, А.М. Генин, А.Д. Серяпин, А.А. Гюрджиан, И.С. Балаховский и другие. Полет Лайки имел огромное

значение. Он подвел итог биологическим исследованиям, в результате которых были получены бесспорные научно-практические доказательства возможности жизнеобеспечения животных в орбитальных полетах. В 1959 году Научно-исследовательский испытательный институт авиационной медицины преобразовывается в Государственный научно-исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины. Ставится задача решить вопросы, связанные с медико-биологическим обеспечением космических полетов. 11 января 1960 года приказом Главнокомандующего ВВС для организации подготовки космонавтов был образован Центр подготовки космонавтов (ЦПК), начальником которого 24 февраля 1960 года был назначен Е.А. Карпов. В марте 1960 года Н.П. Каманин, Е.А. Карпов, В.И. Яздовский и В.Я. Клоков подобрали место для строительства ЦПК недалеко от г. Щелково в 40 км от Москвы. В ЦПК пришли специалисты в области гигиены и физиологии (А.А. Лебедев, А.С. Антощенко), отоларингологии (И.М. Аржанов), офтальмологии и физиологической оптики (В.А. Батуренко, Г.Ф. Хлебников, Н.Х. Ешанов), неврологии (Н.В. Кузнецов), биохимии (А.С. Красовский) и терапии (А.В. Никитин).

В связи с воздействием на космонавтов при старте и посадке ускорений важным элементом их подготовки являлись тренировки на центрифуге. Много времени отводилось полетам на специально оборудованных для создания кратковременной невесомости самолетах-лабораториях. Для этого сначала использовался учебный реактивный истребитель, а затем специально оборудованный самолет Ту-104. В этих полетах удавалось создавать невесомость в течение 35–40 с. Это давало возможность оценить реакции организма, изучить влияние невесомости на сердечно-сосудистую и дыхательную системы, зрение и речь при радиообмене, координацию движений и прием пищи. В результате был сделан вывод, что кратковременное воздействие невесомости на организм человека не вызывает неблагоприятных сенсорных реакций, не ухудшает общего самочувствия космонавтов, не нарушает координации движений, не влечет патологических реакций со стороны сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Сотрудники института под руководством В.И. Яздовского кроме исторического полета Ю.А. Гагарина совместно с Центром подготовки космонавтов и Центральным научно-исследовательским авиационным госпиталем занимались также медицинским обеспечением космических полетов Г.С. Титова, А.Г. Николаева, П.Р. Поповича, В.Ф. Быковского и В.Н. Терешковой.

На конференции много говорилось о становлении эргономики в авиации и космонавтике. В сообщении О.Н. Рыбникова с соавт. [24] отмечалось, что в Государственном научно-исследовательском испытательном институте авиационной и космической медицины получила развитие не только авиационная инженерная психология, но и зародилась и встала на ноги авиакосмическая эргономика как методологическая и организационная система учета психофизиологических характеристик и возможностей человека

при разработке и эксплуатации авиационной и космической техники. Основоположником отечественной авиационной эргономики был Г.М. Зараковский. Он обосновал и предложил для использования в целях психофизиологического анализа деятельности оригинальную гипотезу о психофизиологической структуре процесса переработки информации человеком-оператором, принципы и методы, позволяющие проводить инженерно-психологическую оценку систем управления, индикации, сигнализации и отображения информации. Такая оценка позволяла разрабатывать медико-технические требования к органам и средствам взаимодействия человека с техникой и обосновывать предложения по их оптимизации на ранних стадиях создания образцов авиакосмической техники [10]. Научно-методологический потенциал сотрудников отдела Г.М. Зараковского сыграл решающую роль в разработке методологии инженерно-психологического проектирования авиационной и космической техники. Эта методология была положена в основу сначала руководства по инженерной психологии ВВС, а затем и руководства по эргономическому обеспечению разработки и эксплуатации авиационной и космической техники.

В связи с тем, что при современном уровне развития авиационной техники исключить развитие опасной ситуации в полете невозможно, на конференции с интересом встретили сообщение М.В. Дворникова с соавт. [12] о новых подходах к обеспечению безопасности полетов. Исследования по изучению причин ошибочных и несвоевременных действий экипажей показали, что они могут быть следствием как недостатков информационной подготовки и принятия решений летчиком, так и ухудшения его функционального состояния в полете [18]. Все это побудило более пристально заняться проблемами подготовки, обучения и оценки готовности летного состава, инженерно-психологического проектирования средств отображения информации и органов управления, а также средств защиты и обеспечения работоспособности летчика при действии перегрузок и факторов высотного полета. Возникновению происшествий чаще всего предшествуют ситуации снижения работоспособности летчика, ошибочные или несвоевременные действия членов экипажа, руководителей полетами и лиц, обслуживающих авиационную технику. При этом преднамеренные действия или нарушения правил летной безопасности, инструкций, требований и рекомендаций, считающиеся проявлением так называемого «личного» фактора, безусловно, имеют место. Их предупреждение может обеспечиваться контролем состояния, мотивации и отношения личности к овладению и осуществлению профессиональной деятельности повышенной социальной ответственности. Традиционно считается, что система обучения, подготовки и тренировки летчика однозначно обеспечивает его профессиональную подготовку к выполнению полетного задания с учетом возможных и ожидаемых отклонений от плана полета. С помощью технических средств обучения и специальных тренажеров у летного состава формируются необходимые

навыки и отрабатываются алгоритмы действий в тех или иных ситуациях и обстоятельствах. Однако эффективность действий летчика в таких ситуациях во многом определяется адекватностью оценки складывающейся ситуации и последствий принимаемых им решений и предпринимаемых действий. Особенностью формирования такой оценки является то, что они должны быть включены в систему представлений летчика о пространственном положении самолета, в том числе и по отношению к земле, по результатам выполняемых им действий. В связи с этим при обучении и тренировке летного состава должны использоваться средства и специальные тренажеры формирования у летчика пространственных представлений. Эти, так называемые тренажеры пространственной ориентировки, обеспечивающие не только ситуационную осведомленность, но и представления летчика об изменении пространственного положения самолета, за рубежом стали эффективным средством сокращения авиационных происшествий в связи с потерей летчиком пространственной ориентировки в полете [11].

В целом, по мнению авторов сообщения, существующая система обеспечения безопасности полетов нуждается в уточнении и смещении акцентов на создание необходимых условий для современных действий летчика по распознаванию критических ситуаций в полете. При этом должны быть обеспечены ситуационная осведомленность и пространственная ориентировка летчика в полете и устойчивость его организма к действиям в новых условиях и обстоятельствах. Безопасность летчика в этом случае становится одним из приоритетных показателей оценки отечественной системы безопасности полетов [14].

На научных конференциях, проводимых Московским авиационным институтом под эгидой Российского фонда фундаментальных исследований, традиционно анализируется и оценивается научный вклад деятелей отечественной авиакосмической медицины, психофизиологии и психологии в их развитие. Специальные сообщения посвящались В.И. Яздовскому, Н.И. Фролову, Л.С. Хачатурьянцу, Н.Д. Заваловой, М.М. Власовой, А.П. Кузьминову, В.Г. Стеблецову и многим другим [28]. На данной конференции было представлено сообщение И.Б. Ушакова с соавт. о вкладе С.А. Бугрова в развитие отечественной авиакосмической медицины и эргономики. Государственный научно-исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины, который он возглавлял, стал центром отечественной авиационной эргономики. При нем состоялось несколько важных совещаний ученых института с руководителями самолетостроительных организаций по вопросам координации эргономических исследований на стадиях разработки эскизно-технических проектов перспективных образцов авиационной техники и в процессе их государственных и войсковых испытаний. Подготовленное специалистами института руководство по эргономическому обеспечению разработки и эксплуатации авиационной и космической техники стало нормативным документом в области учета

человеческого фактора в авиации. При институте функционировал Координационный научно-технический совет по эргономике, на заседаниях которого регулярно обсуждались методологические и практические проблемы учета человеческого фактора в авиации. Военно-научное (эргономическое) сопровождение создания, испытаний и эксплуатации авиационной и космической техники являлось разделом плана научно-исследовательской работы института. Став начальником Службы авиационной и космической медицины ВВС–заместителем начальника Главного военно-медицинского управления Министерства обороны, С.А. Бугров привлек к эргономическим исследованиям лечебно-профилактические учреждения Военно-воздушных сил. Он всячески поддерживал исследования, проводимые в интересах эргономической оптимизации летного труда, процессов, средств и условий деятельности оперативного состава командных пунктов управления авиацией, специалистов управления воздушным движением и лиц группы руководства полетами. В результате система медицинского обеспечения безопасности полетов работала без заметных сбоев. Летный состав, несмотря на трудности, сохранял высокий уровень работоспособности и профессиональной надежности. В авиационной медицине осуществлялись структурные и организационные перемены, направленные на ускорение внедрения научных рекомендаций и предложений в войсковую практику. Под руководством С.А. Бугрова разрабатывались новые теоретико-концептуальные подходы к обеспечению профессионального здоровья летного состава.

В сообщении П.И. Онищенко с соавт. всесторонне показан вклад С.А. Гозулова в развитие авиационной медицины. Доктор медицинских наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, генерал-майор медицинской службы С.А. Гозулов в 1974–1984 гг. возглавлял Государственный научно-исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины. Во многом благодаря ему коллектив института в атмосфере научного творчества решал задачи государственной важности по снижению аварийности, повышению эффективности авиации, эргономическому сопровождению создания и испытаний образцов военной авиационной и космической техники. Оценивая вклад С.А. Гозулова в авиационную медицину, авторы сообщения отметили его постоянное стремление вовлечь в интенсивный научный поиск весь коллектив возглавляемого им института.

Видным представителем плеяды первых отечественных специалистов в области космической медицины, высотной физиологии и эргономики был Л.Г. Головкин, кандидат медицинских наук, полковник медицинской службы. О.Л. Головкина с соавт. [8] в своем сообщении по-новому оценили его вклад в становление и развитие высотной физиологии и эргономики в авиации и космонавтике. В 1959 году была поставлена задача разработки системы жизнеобеспечения космонавта космического корабля «Восток» и первого космического скафандра СК-1, который необходимо было совместить с макетом катапультного кресла для покидания космического корабля.

Комплекс медицинских, физиолого-гигиенических исследований и испытаний, а также оценка эксплуатационных характеристик разрабатываемых скафандров и средств катапультирования для космического корабля «Восток» проводились на базе созданного в 1956 году филиала Научно-исследовательского испытательного института авиационной медицины в лаборатории, возглавляемой С.Г. Жаровым. В этих работах самое непосредственное участие принял Л.Г. Головкин. Космический скафандр СК-1 обеспечивал безопасность Ю.А. Гагарина во время первого в мире пилотируемого космического полета.

Необходимость инновационного развития авиакосмической отрасли делала актуальной задачу учета ресурсов, психофизиологических характеристик и возможностей человека при разработке и эксплуатации авиационной техники. Значительный вклад в организацию практического учета ресурсов человека и психосоциальных рекомендаций в интересах повышения эффективности труда и профессиональной надежности летного состава и космонавтов внес профессор, доктор психологических наук, кандидат медицинских наук Г.М. Зараковский. Об этом говорилось в представленном на конференции сообщении А.А. Меденкова с соавт. По результатам обобщения и анализа содержания и структуры информационной подготовки и принятия решений с учетом объективных и субъективных аспектов преобразования информации человеком-оператором Г.М. Зараковский определил операции и логические условия, подлежащие выделению при анализе алгоритмов операторской деятельности и разработал метод психофизиологического анализа алгоритмов деятельности. Этот метод, позволяющий структурировать процесс преобразования информации человеком-оператором и выявляющий недостатки системы ее отображения и органов управления, использовался в интересах улучшения организации труда, технических средств деятельности и рабочих мест военных специалистов. В результате разработок Г.М. Зараковского и его сотрудников в 1980-х годах была обоснована методология системного учета ресурсов, характеристик и возможностей человека при проектировании его профессиональной деятельности в авиации и космонавтике. Развитием идей Г.М. Зараковского и его методологии психофизиологического анализа эффективно занимались сотрудники возглавляемой им научной школы. Применительно к деятельности специалистов командных пунктов, пунктов управления полетами и органов управления воздушным движением этим занимался А.А. Меденков, ученик и последователь Г.М. Зараковского.

Интерес участников конференции вызвало сообщение В.Н. Французова с соавт. [13] о вкладе Г.П. Овечкина в организацию подготовки авиационных врачей. Он был начальником курса на факультете подготовки авиационных врачей Военно-медицинской академии. Под его руководством в академии было подготовлено к выпуску 4 набора слушателей и курсантов. Возглавляемый им курс в 1977–1978 учебном году стал лучшим в академии и

занесен в ее исторический формуляр. Г.П. Овечкин всячески поощрял интерес слушателей к научным исследованиям, активно вовлекал их в Военно-научное общество академии, нацеливал на приобретение практических навыков научной и лечебно-профилактической работы в процессе обучения. Многие выпускники факультета подготовки авиационных врачей продолжили научные исследования в строевых частях, защитили кандидатские и докторские диссертации, стали известными специалистами в области теории и практики авиационной медицины. Среди выпускников 1974 года факультета подготовки врачей для ВВС Военно-медицинской академии (начальник курса Г.П. Овечкин) кандидатами и докторами наук стали В.О. Абрамов, Б.А. Алексеев, Ю.Н. Белый, С.В. Гришаков, М.В. Дворников, В.М. Духович, П.В. Загрядский, И.П. Левчук, Л.А. Гридин, В.Ф. Лысак, А.П. Козловский, А.А. Мاستрюков, А.А. Меденков, В.И. Нечипоренко, А.С. Свистов, В.С. Сидорин, П.С. Пашенко, В.Н. Французов, Г.М. Черняков, В.С. Шагов, П.М. Шалимов. На своем жизненном пути им, как и всем, приходилось встречаться с трудностями и проблемами. И в том, что они успешно справились с ними, преодолели, нашли правильные решения, во многом заслуга Г.П. Овечкина.

Среди известных ярких творческих личностей отечественной авиационной медицины есть ученые удивительной судьбы. К таким ученым в полной мере можно отнести В.И. Копанева, заслуженного деятеля науки РСФСР, члена-корреспондента Российской академии космонавтики, профессора, доктора медицинских наук, генерал-майора медицинской службы, начальника кафедры авиационной и космической медицины Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова. Сообщение о его вкладе в развитие авиационной медицины и подготовку авиационных врачей участникам конференции представил А.В. Шакула с соавт. На начальном этапе своих научных исследований В.И. Копанев занимался болезнью движения. Ему принадлежит приоритет в описании скрытой формы укачивания. Он участвовал в системных исследованиях статокINETической устойчивости человека в полете. Экспериментальные исследования по отработке космонавтами П.И. Беляевым и А.А. Леоновым элементов космической программы он проводил в условиях кратковременной невесомости на самолете-лаборатории и в макете корабля «Восход-2». Изучал физиологические механизмы адаптации к невесомости на основе медико-биологических исследований, выполненных в рамках осуществления программ «Джемини» и «Аполлон». В научных кругах В.И. Копанева помнят и по его уникальным экспериментам по определению влияния вида индикации авиагоризонта на пространственную ориентировку летчиков и планеристов.

С интересом участники конференции отнеслись к сообщению А.А. Обознова с соавт. о вкладе В.В. Лапы в разработку инженерно-психологического проектирования средств и алгоритмов работы летчика. В модельных и летных экспериментах он изучал состояние напряженности и эмоциональные

реакции летчиков и психологические особенности оценки ими обстановки в особых условиях полета, а также разрабатывал рекомендации по обеспечению их профессиональной надежности при возникновении аварийных ситуаций в полете. Эти исследования включали выявление психологической специфики умственных и двигательных навыков при переходе к пилотированию по директорным приборам. Под руководством В.В. Лапы был выполнен большой цикл исследований по изучению предметного содержания психического образа и оптимизации кодирования информации в интересах информационной подготовки и решения летчиком задач деятельности. Материалы этих исследований послужили основанием для инженерно-психологической оптимизации лицевых частей приборов и их расположения на приборной доске, повышения наглядности информации о положении самолета в пространстве, обобщенного и совмещенного представления параметров полета, выдачи директивной информации и обеспечения единства принципов индикации информации на приборах и средствах ее отображения. Под руководством В.В. Лапы проведены исследования в интересах подготовки к полетам отечественной многоцветной космической системы «Буран». В частности, изучались психофизиологические возможности летчика-космонавта по управлению «Бураном» на этапах атмосферного спуска и посадки. Для обеспечения его бездвигательной посадки в летных экспериментах на самолете-лаборатории Ту-22МЗ определялись показатели и критерии оценки формирования в ходе тренировок летчиков-космонавтов навыков захода на посадку и выполнения посадок с требуемым качеством. Для сохранения и поддержания у космонавтов в космическом полете навыков ручного управления был разработан бортовой автоматизированный тренажерный комплекс «Орбита», моделирующий управление спуском и посадкой многоцветной космической системой.

На конференции с воспоминаниями выступила И.Б. Соловьева. С 12 марта по ноябрь 1962 года она проходила космическую подготовку, а 1 декабря 1962 года была назначена на должность космонавта. До 25 мая 1963 года она готовилась к полету на космическом корабле «Восток-6» и была основным дублером В.В. Терешковой. Проходила также подготовку для 10–15-дневного полета на корабле «Восход-4» в составе многоместного женского экипажа для первого выхода в открытый космос женщины. Ее рассказ и пожелания молодым участникам конференции были восприняты с большим интересом. Студенты Московского авиационного института были рады общению с ней и поразились ее энтузиазму, задору и оптимизму.

Материалы конференции о разработках отечественных ученых и специалистов методологии системного учета психофизиологических характеристик человека при разработке и эксплуатации авиационной техники показали, что это направление исследований является составной частью обеспечения профессиональной надежности летного состава и космонавтов. Методы, способы и технологии учета человеческого фактора в авиации и

космонавтике позволяют обеспечивать психофизиологическую надежность профессиональной деятельности летного состава и космонавтов, продлевать их профессиональное долголетие и повышать безопасность полетов.

Выводы

В целом, прошедшая конференция показала, что инженерно-психологические и эргономические исследования ученых и специалистов Государственного научно-исследовательского испытательного института авиационной и космической медицины, проведенные в интересах создания, испытаний и эксплуатации летательных аппаратов и средств автоматизации управления авиацией, внесли существенный вклад в обеспечение боеготовности авиации и повышение профессиональной надежности летного состава [20, 27]. Опыт эргономического обеспечения создания и эксплуатации авиационной техники и результаты проведенных исследований в этом направлении могут и должны использоваться в современных условиях инновационного развития отечественной аэрокосмической отрасли [19, 22, 25].

По результатам работы конференции подготовлены предложения о повышении внимания к изучению истории становления отечественной авиации и космонавтики, инженерной психологии и эргономики и учета психологии и психофизиологии человека при разработке и эксплуатации авиакосмической техники и включении этих предметов в программы подготовки студентов аэрокосмических университетов. Обращено внимание на необходимость интенсификации исследований в интересах обеспечения профессиональной надежности летного состава и космонавтов и безопасности полетов. Составной частью этих исследований должны стать разработка и внедрение методов, способов и технологий учета психофизиологических возможностей летчика и космонавта при организации их профессиональной деятельности для сохранения работоспособности и функциональной надежности в течение всего времени полета. В связи с этим необходимо предусмотреть соответствующее развитие материально-технической и экспериментальной базы применительно к задачам создания новых образцов авиакосмической техники и специфики деятельности космонавтов при выполнении межпланетных полетов. Особого внимания требуют подготовка квалифицированных кадров, организация и координация профессиональной ориентации молодежи для участия в космической деятельности и повышение квалификации специалистов, в том числе в области инженерно-психологического, медико-технического и социально-психологического обеспечения профессиональной деятельности летного состава и космонавтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Восстановление функционального состояния после космических полетов / Баранов В.М., Меденков А.А., Нестерович Т.Б. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 52–62.
- [2] Об отдыхе космонавтов в полете / Бубеев Ю.А., Нестерович Т.Б., Меденков А.А. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 62–67.
- [3] Подготовка летного состава к маневренным и высотным полетам / Бухтияров И.В., Дворников М.В., Филатов В.Н., Хоменко М.Н. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 77–84.
- [4] Вклад ученых Института авиационной медицины в повышение боеспособности летного состава в годы Великой Отечественной войны / Васильев П.В., Денисова Т.В., Меденков А.А. // Авиационная и космическая медицина, психология и эргономика. Сб. тр. – М.: Полет, 1995. – С. 12–20.
- [5] Вклад ученых Института авиационной медицины в обеспечение боеспособности летного состава накануне Великой Отечественной войны / Васильев П.В., Меденков А.А., Рысакова С.Л., Денисова Т.В. // Тез. докл. 10-го Московского междунар. симпоз. по истории авиации и космонавтики, г. Москва, 20–27 июня 1995 г. – М.: ИИЕТ РАН, 1995. – С. 32–33.
- [6] Вопросы медицинского обеспечения авиации / Отв. ред. Г.Г. Куликовский. Сб. науч. тр. – Т. 1. – М.: Воениздат, 1939. – 224 с.
- [7] Вопросы медицинского обеспечения авиации / Отв. ред. С.И. Субботник. Сб. науч. тр. – Т. 2. – М.: Воениздат, 1939. – 176 с.
- [8] Вклад Л.Г. Головкина в становление и развитие высотной физиологии и эргономики в авиации и космонавтике (К 90-летию со дня рождения) / Головкина О.Л., Дворников М.В., Русалиев К.Я. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 16–22.
- [9] Учет психофизиологических характеристик и возможностей человека в отечественной авиации и космонавтике / Дворников М.В., Жданько И.М., Меденков А.А. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 8–13.
- [10] Инфраструктура эргономического обеспечения профессиональной деятельности / Дворников М.В., Меденков А.А., Нестерович Т.Б. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3. – С. 40–44.
- [11] Психофизиологические ресурсы и резервы повышения безопасности полетов / Дворников М.В., Меденков А.А., Нестерович Т.Б. // Воен.-мед. журн. – 2017. – № 3. – С. 51–58.
- [12] Дворников М.В., Меденков А.А., Оленев Н.И. Медико-техническое обеспечение безопасности полетов // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 31–37.
- [13] О вкладе Г.П. Овечкина в организацию подготовки авиационных врачей / Дворников М.В., Меденков А.А., Французов В.Н. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 36–38.
- [14] Развитие методологии обеспечения высотных полетов в авиации и космонавтике / Дворников М.В., Меденков А.А., Шишов А.А. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 52–58.

- [15] Развитие методологии психологического отбора в авиации / Зацарный Н.Н., Меденков А.А., Покровский Б.Л., Третьяков Н.В. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 62–68.
- [16] Управление развития психологии труда, инженерной психологии и эргономики в отечественной авиации / Звоников В.М., Меденков А.А., Фролов А.Я., Шалимов П.М. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 46–51.
- [17] Институт авиационной медицины и основные направления его исследований / Кибабшина М.А., Меденков А.А., Москвичева Н.Л., Нестерович Т.Б. // Актуальные проблемы авиационной и космической медицины. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2013 г. – СПб.: ВМедА, 2013. – С. 66–67.
- [18] Развитие методологии определения причин летных происшествий / Козлов В.В., Косолапов О.А., Федорук А.Г. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 68–72.
- [19] Актуальность учета человеческого фактора в авиации / Козлова Н.М., Дворников М.В., Меденков А.А., Нестерович Т.Б. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 47–52.
- [20] Особенности деятельности летного состава палубной авиации / Мастрюков А.А., Мельник С.Г., Плахов Н.Н. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/2. – С. 68–72.
- [21] Меденков А.А., Милованова М.А. Исследования Института авиационной медицины накануне Великой Отечественной войны // К.Э. Циолковский и инновационное развитие космонавтики. Материалы XLVIII научных чтений памяти К. Э. Циолковского, г. Калуга, 17–19 сент., 2013. – Калуга: Изд-во «Эйдос», 2013. – С. 130–131.
- [22] Актуальность учета психофизиологии человека в авиации / Меденков А.А., Дворников М.В., Нестерович Т.Б. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 1/1. – С. 59–63.
- [23] Медико-биологическая подготовка полета человека в космос / Меденков А.А., Кибабшина М.А., Каспранский Р.Р. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 18–26.
- [24] Становление отечественной эргономики в авиации и космонавтике / Меденков А.А., Малофеев А.А., Рыбников О.Н., Сапегин А.Н. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 26–31.
- [25] Актуальные медико-биологические проблемы пилотируемых космических полетов (по материалам международной конференции «Пилотируемое освоение космоса») / Меденков А.А., Нестерович Т.Б., Козлова Н.М. // Авиакосм. и эколог. мед. – 2017. – Т. 51, № 3. – С. 78–84.
- [26] История института авиационной медицины / Меденков А.А., Нестерович Т.Б., Рысакова С.Л. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 3/1. – С. 14–18.
- [27] Теория и практика учета человеческого фактора в авиации и космонавтике / Меденков А.А., Нестерович Т.Б., Степанов В.С. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 1/1. – С. 54–59.
- [28] Вклад Н.Д. Заваловой в развитие авиационной инженерной психологии / Меденков А.А., Обознов А.А., Нестерович Т.Б. // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. – 2017. – № 1/1. – С. 42–45.

REFERENCES

- [1] Recovery of functional status after space missions / Baranov V.M., Medenkov A.A., Nesterovich T.B. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 52–62.
- [2] About the rest of cosmonauts in flight / Bubeev Yu.A., Nesterovich T.B., Medenkov A.A. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 62–67.
- [3] Flight personnel training for maneuvering and altitude flights / Bukhtiyarov I.V., Dvornikov M.V., Filatov V.N., Khomenko M.N. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 77–84.
- [4] Contribution of scientists of the Institute of Aviation Medicine to improving combat capabilities of flight personnel during the Great Patriotic War. / Vasilyev P.V., Denisova T.V., Medenkov A.A. // Aviation and space medicine, psychology and ergonomics. Collected papers. – M.: Polyot, 1995. – pp. 12–20.
- [5] Contribution of scientists of the Institute of Aviation Medicine to ensuring combat capabilities of flight personnel prior to the Great Patriotic War / Vasiliev P.V., Medenkov A.A., Rysakova S.L., Denisova T.V. // Thesis report of the 10th Moscow International Conference. Simpos. on the History of Aviation and Cosmonautics, Moscow, June 20-27, 1995. – M.: IHST RAS, 1995. – pp. 32–33.
- [6] Issues of aviation medical support / Executive editor Kulikovskaya G.G. Collection of research papers. – V. 1. – M.: Voenizdat, 1939. – P. 224.
- [7] Issues of aviation medical support / Executive editor S.I. Subbotnik. Collection of research papers – V. 2. – M.: Voenizdat, 1939. – P.176.
- [8] L.G. Golovkin's contribution to the development of high-altitude physiology and ergonomics in aviation and cosmonautics (to the 90th anniversary of his birth) / Golovkina O.L., Dvornikov M.V., Rusaliev K.Ya. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 16–22.
- [9] Psychophysiological characteristics and human capabilities in terms of domestic aviation and cosmonautics / Dvornikov M.V., Zhdanko .I.M., Medenkov A.A. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 8–13.
- [10] Infrastructure for insuring ergonomics in the process of professional activity / Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Nesterovich T.B. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3. – pp. 40–44.
- [11] Psychophysiological resources and safety enhancement reserves of flights / Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Nesterovich T.B. // Military-medical Journal – 2017. – № 3. – pp. 51–58.
- [12] Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Olenev N.I. Medical and technical support of flight safety // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 31–37.
- [13] G.P. Ovechkin's contribution to the training of aviation physicians / Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Frantsuzov V.N. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 36–38.
- [14] Development of methodology for high-altitude flights in aviation and cosmonautics / Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Shishov A.A. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 52–58.

- [15] Development of methodology of psychological selection in aviation / Zatsarny N.N., Medenkov A.A., Pokrovsky B.L., Tretyakov N.V. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 62–68.
- [16] Managing the development of labor psychology, engineering psychology and ergonomics in domestic aviation. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 46–51.
- [17] The Institute of Aviation Medicine and the main directions of its research / Kibabshina M.A., Medenkov A.A., Moskvicheva N.L., Nesterovich T.B. // Current problems of aviation and space medicine. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, December 16–17, 2013 – SPb.: VMEDA, 2013. – pp. 66–67.
- [18] Development of methodology for determining the causes of flight accidents / Kozlov V.V., Kosolapov O.A., Fedoruk A.G. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 68–72.
- [19] Relevance of considering human factor in aviation / Kozlova N.M., Dvornikov M.V., Medenkov A.A., Nesterovich T.B. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 47–52.
- [20] Features of activity of deck aviation personnel / Mastryukov A.A., Melnik S.G., Plakhov N.N. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/2. – pp. 68–72.
- [21] Medenkov A.A., Milovanova M.A. Research of the Institute of Aviation Medicine in pre-war period. // K.E. Tsiolkovsky and innovative development of cosmonautics. Proceedings of the XLVIII Scientific readings in memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 17–19, 2013. – Kaluga: Eidos Publ., 2013. – pp. 130–131.
- [22] Relevance of considering human psychophysiology in aviation / Medenkov A.A., Dvornikov M.V., Nesterovich T.B. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 1/1. – pp. 59–63.
- [23] Biomedical training for manned space flights / Medenkov A.A., Kibabshina M.A., Kaspranskiy R.R. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 18–26.
- [24] Development of national ergonomics in aviation and cosmonautics / Medenkov A.A., Malofeev A.A., Rybnikov O.N., Sapegin A.N. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 26–31.
- [25] Current biomedical problems of manned space flights (based on the proceedings of the International Conference “Manned Space Exploration”) / Medenkov A.A., Nesterovich T.B., Kozlova N.M. // Aerospace. and Ecolog. Medicine. – 2017. – V. 51, № 3. – pp. 78–84.
- [26] History of the Institute of Aviation Medicine / Medenkov A.A., Nesterovich T.B., Rysakova S.L. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 3/1. – pp. 14–18.
- [27] Theory and practice of human factor in aviation and cosmonautics / Medenkov A.A., Nesterovich T.B., Stepanov V.S. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 1/1. – pp. 54–59.
- [28] N.D. Zavalova’s contribution to the development of aviation engineering psychology / Medenkov A.A., Oboznov A.A., Nesterovich T.B. // Human factor: the problems of psychology and ergonomics. – 2017. – № 1/1. – pp. 42–45.

НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ РАЗДЕЛ

SCIENTIFIC-INFORMATION SECTION

УДК 537.5

СОВМЕСТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ЕВРОПЕЙСКОГО КОСМИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА И РОСКОСМОСА «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-4» НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В.Е. Фортов, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев, А.В. Зобнин,
В.И. Молотков, М.Ю. Пустыльник, Х.М. Томас, М.Х. Тома,
Е.О. Серова, А.М. Самокутяев, Г.И. Падалка, О.Д. Кононенко,
А.Н. Овчинин, А.А. Иванишин, О.В. Новицкий, С. Кристофоретти

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 А.В. Зобнин; канд. тех. наук В.И. Молотков
(ФГБУН ОИВТ РАН)

Канд. физ.-мат. наук М.Ю. Пустыльник; докт. философии Х.М. Томас
(Лаборатория комплексной плазмы Германского космического агентства)

Докт. философии М.Х. Тома (Гиссенский университет им. Ю. Либиха)

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ Е.О. Серова;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ А.М. Самокутяев;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ Г.И. Падалка;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ О.Д. Кононенко;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ А.Н. Овчинин;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ А.А. Иванишин;

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт РФ О.В. Новицкий

(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»);

астронавт С. Кристофоретти (Европейский астронавтический центр)

Приведено описание нового космического эксперимента «Плазменный кристалл-4» (КЭ «ПК-4»), проводимого совместно Европейским космическим агентством (ЕКА) и Роскосмосом на борту Международной космической станции (МКС). КЭ «ПК-4» функционирует на борту МКС с июня 2015 года и предназначен для продолжения исследований фундаментальных свойств сильно неидеальных плазменно-пылевых систем в условиях невесомости и разработки новых технологических приложений. Регламент проведения экспериментов формулируется специальным Соглашением между ЕКА и Роскосмосом о совместном КЭ «ПК-4» в европейском лабораторном модуле «Колумбус». Описывается состав летной и наземной частей комплекса

научной аппаратуры (НА) «ПК-4», устройство газоразрядной экспериментальной камеры и основные физические параметры плазменно-пылевого эксперимента, методы управления проведением экспериментов на МКС, международное сотрудничество при выполнении программы КЭ «ПК-4» и первые результаты этой работы.

Ключевые слова: пылевая плазма, газовый разряд, плазменно-пылевые структуры, научная аппаратура.

The Joint ESA-Roscosmos “Plasma Cristall-4” Experiment On-Board the International Space Station.

V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev, A.V. Zobnin, V.I. Molotkov, M.Yu. Pustynnik, H.M. Thomas, M.H. Thoma, E.O. Serova, A.M. Samokutyaev, G.I. Padalka, O.D. Kononenko, A.N. Ovchinin, A.A. Ivanishin, O.V. Novitsky, S. Cristoforetti

The new “Plasma Cristall-4” space experiment (“PC-4” SE) jointly conducted by the European Space Agency (ESA) and Roscosmos on-board the International Space Station (ISS) is described. “PC-4” SE has been operating on-board the ISS since June 2015 and is intended to proceed with research of the fundamental properties of highly non-ideal plasma-dust systems under zero-gravity conditions and development of new technological applications. The conducting of experiments is regulated by a special Agreement between ESA and Roscosmos on the Joint “PC-4” SE in the “Columbus” European Laboratory Module. Content of the flight and ground parts of the “PC-4” scientific equipment (SE), design of the gas-discharge experimental chamber and main parameters of the dusty plasma experiment as well as scheme of controlling the performance of the experiment aboard the ISS, international cooperation while conducting “PC-4” SE and its first results from the orbit are presented.

Keywords: dusty plasma, gas discharge, dusty plasma structures, scientific equipment.

Объектом исследования в данной работе является пылевая плазма в условиях невесомости, получаемая на российско-европейской научной аппаратуре «Плазменный кристалл-4» (НА «ПК-4») на борту Международной космической станции в рамках одноименного Российско-европейского проекта. Целью работы является исследование фундаментальных физических свойств пылевой плазмы с последующим применением их в плазменных технологиях.

Пылевая или комплексная плазма представляет собой низкотемпературную плазму, в которой присутствуют мелкодисперсные пылевые частицы микронного размера. В плазме пылевые частицы быстро заряжаются до значительных величин (10^3 – 10^6 элементарных зарядов электрона) и начинают взаимодействовать друг с другом и с плазменными полями, участвуют в зарядовом балансе плазменных заряженных частиц, т. е. становятся полноправной плазменной компонентой. Отличительной особенностью этой компоненты является большой электрический заряд пылевой частицы и ее огромная масса по сравнению с массой атомов и молекул. Кроме того, в то

время как атомный ион сохраняет постоянный заряд в широком диапазоне плазменных параметров, заряд пылевой частицы плавно изменяется в зависимости от локальных плазменных параметров. Перечисленные особенности приводят к появлению новых физических явлений: специфических плазменно-пылевых неустойчивостей и упорядочиванию (кристаллизации) пылевой подсистемы.

Впервые присутствие пылевых частиц в газоразрядной плазме наблюдал И. Ленгмюр в 1929 году. Пылевые частицы рассматривались им как посторонняя (вредная) примесь, которая удалялась чисткой плазменной камеры. В конце XX века внимание к плазменно-пылевой компоненте значительно возросло в связи с развитием плазменно-технологических приложений. В частности, при исследовании причин, приводящих к появлению значительного числа бракованных микросхем, в начале 90-х годов в компании IBM было обнаружено, что брак обуславливался попаданием незаметных субмикронных пылевых частиц на поверхность микросхем, изготавливаемых методом плазменного травления. В ходе изучения данной проблемы было обнаружено, что пылевые частицы синтезировались уже в плазменной камере из сублимированного материала. После проведения специальных мер, направленных на непрерывное удаление вновь образующихся пылевых частиц, процент брака микросхем упал до обычных своих значений. Однако самым замечательным явлением стало экспериментальное наблюдение кристаллизации пылевой подсистемы из монодисперсных частиц одновременно и независимо друг от друга в 3 лабораториях – в Тайване [1], Германии [2] и Японии [3]. Такая кристаллизация стала возможной благодаря необычайно высокому значению параметра неидеальности в пылевой плазме – отношению потенциальной энергии взаимодействия пылевых частиц к их кинетической энергии. К этому времени уже были разработаны основные положения теории кристаллизации кулоновских систем, которые и нашли свое подтверждение в указанных экспериментах.

Открытие кристаллизации пылевой плазмы привлекло в эту новую область науки десятки научных групп по всему миру и стремительному росту числа публикаций. В частности, в 1996 году в Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) впервые наблюдалась кристаллизация пылевой подсистемы в разряде постоянного тока [4]. Во второй половине 90-х годов стало ясно, что полноценный плазменно-пылевой эксперимент возможен только в условиях невесомости. Обзор существующих методов получения невесомости: свободно падающая платформа, самолет-лаборатория, баллистическая ракета и космический аппарат – показал, что наиболее оптимальные условия для проведения экспериментов существуют на борту космических аппаратов. Первыми плазменно-пылевыми экспериментами на орбите стали 2 относительно простых российских космических эксперимента (КЭ): «Плазменный кристалл-1» [5] и «Плазменный кристалл-2» [6], проведенных на орбитальной станции «Мир»,

продемонстрировавшие их уникальные возможности в условиях микрогравитации. К сожалению, КЭ «ПК-2» был завершен досрочно в связи с затоплением ОС «Мир».

С учетом полученного опыта проведения плазменно-пылевых экспериментов на орбите в 2001 году была изготовлена и запущена на РС МКС новая НА «Плазменный кристалл-3 Нефедов» [7], а в 2006 году ее усовершенствованный вариант – НА «Плазменный кристалл-3 Плюс» [8]. В ходе выполнения этих 2 проектов в них участвовало 30 космонавтов и астронавтов, а по полученным экспериментальным результатам было написано более 100 статей в высоко рейтинговых международных журналах. В 2013 году НА «ПК-3 Плюс» исчерпала свой ресурс и была выведена из эксплуатации, а ее наземная модель заняла свое почетное место в постоянной экспозиции Музея космонавтики в г. Москве. В это время уже заканчивалось изготовление российско-европейской аппаратуры нового поколения – НА «Плазменный кристалл-4». Разработка ее велась совместно сотрудниками ОИВТ РАН и Института внеземной физики (ИВФ) Общества им. Макса Планка (Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik), а изготовление профинансировало Европейское космическое агентство (ЕКА). Совместная эксплуатация НА «ПК-4» регулируется рамочным Соглашением между ЕКА и Роскосмосом по проведению совместного КЭ «ПК-4».

Задачи космического эксперимента «ПК-4»

КЭ «ПК-4» предназначен для продолжения исследований фундаментальных структурных и динамических свойств сильно неидеальных плазменно-пылевых систем в условиях невесомости. Полученные знания найдут применение при разработке новых принципов управления пылевой компонентой в плазменных реакторах, например, в токамаках или плазменных реакторах для напыления электронных микросхем, при синтезе новых композиционных материалов и катализаторов, при защите космических аппаратов (КА) от пылевых частиц на Луне и Марсе. Основным отличием НА «ПК-4» от НА «ПК-3 Плюс» является использование разряда постоянного тока вместо высокочастотного емкостного и удлиненная форма разрядной камеры в виде стеклянной трубки, а также наличие разнообразных манипуляторов пылевой плазмы: электрического, термического, высокочастотного индукционного и лазерного. Удлиненная форма камеры дает возможность исследовать течение плазменно-пылевой жидкости, а комбинирование в пространстве и во времени разряда постоянного тока (ПТ) и 2 локальных радиочастотных разрядов индукционного типа (ВЧИ) позволяет создавать управляемый профиль электрического потенциала и тем самым манипулировать топологией исследуемых плазменно-пылевых образований. НА «ПК-4» имеет очень гибкую структуру и возможность независимого управления всеми ее элементами, что позволяет подбирать новые методы исследований для новых нео-

жиданных явлений. В этом смысле НА «ПК-4» скорее можно назвать не аппаратурой, а лабораторией. Задачами КЭ «ПК-4» текущего этапа, в частности, являются:

- исследование процессов самоорганизации протяженных плазменно-пылевых структур в однородном положительном столбе разряда ПТ при различных условиях;
- исследование неравновесных структурных переходов при взаимном проникновении пылевых облаков из микрочастиц различных размеров (lane formation);
- исследование сдвигового течения пылевой плазмы при воздействии мощного излучения манипуляционного лазера;
- исследование протекания плазменно-пылевой жидкости через потенциальное сопло Лавалья;
- экспериментальное определение дисперсионного соотношения для плазменно-пылевых волн и исследование плазменно-пылевых ударных волн при воздействии манипуляционным электродом;
- исследование условий формирования и распространения уединенных нелинейных диссипативных плазменно-пылевых волн;
- исследование электрореологических эффектов в плазменно-пылевом облаке в тлеющем разряде ПТ;
- измерение заряда пылевых частиц и силы ионного увлечения по установленным скоростям движения частиц в плазме;
- спектральная диагностика температуры электронов в пылевом облаке;
- сепарация пылевых частиц по размерам в постоянном электрическом поле и в газовом потоке, и многие другие.

Программа экспериментов постоянно обновляется в зависимости от полученных экспериментальных результатов.

Состав научной аппаратуры «Плазменный кристалл-4» (НА «ПК-4»)

Летная модель (ЛМ) НА «ПК-4» установлена на европейском лабораторном модуле «Колумбус» МКС. Состав ЛМ «ПК-4» приведен на рис. 1. Центральной частью аппаратуры является газоразрядная стеклянная трубка низкого давления, в которой создается и исследуется пылевая плазма. Все остальные узлы аппаратуры при проведении экспериментов выполняют вспомогательную роль. По требованиям безопасности полетов газоразрядная трубка помещена в герметичный контейнер (поз. 1 на рис. 1), наполненный азотом до давления $0,8 \text{ атм}$. В контейнере находятся также различные узлы, необходимые для обеспечения проведения экспериментов: регуляторы напуска и откачки рабочих газов, высоковольтные генераторы постоянного стабилизированного тока, ВЧ-генераторы для питания индукционных катушек, инжекторы пылевых частиц, лазер для освещения пылевых частиц, мощный

лазер для манипулирования пылевыми частицами, видеокamеры для регистрации пылевых частиц и излучения плазмы, спектрометр и другие компоненты. Контейнер интегрируется в стандартную стойку модуля «Колумбус» посредством адаптера (поз. 2 на рис. 1). Рабочие газы (неон, аргон и смесь неона с 24 % кислорода) содержатся в трех идентичных выносных баллонах объемом 1 литр и начальным давлением 130 атм (поз. 6–8 на рис. 1).

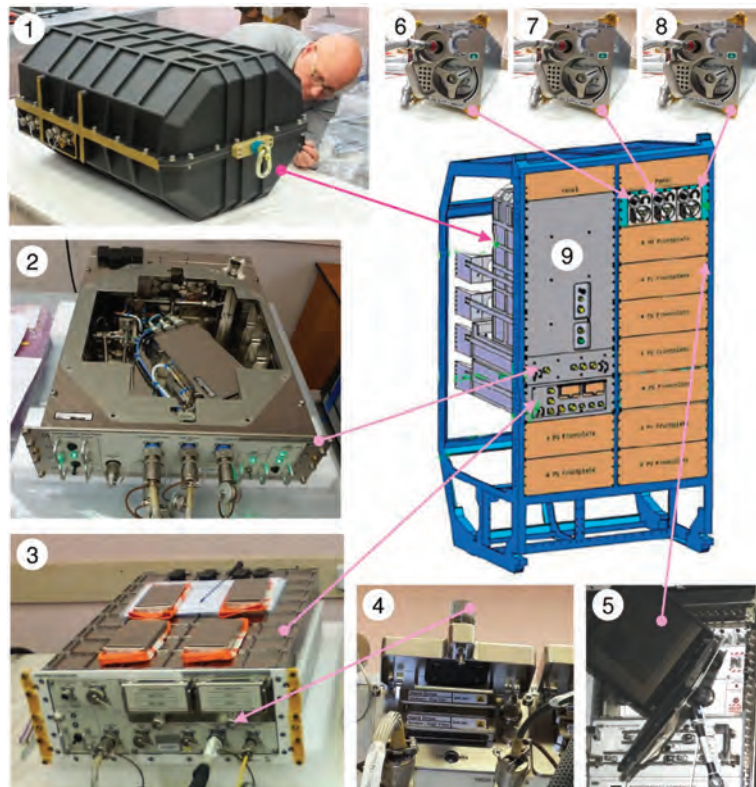


Рис. 1. Состав летной модели НА «ПК-4»:

- 1 – экспериментальный контейнер; 2 – адаптер экспериментального контейнера;
 3 – блок управления и записи информации; 4 – сменные носители информации;
 5 – четыре ноутбука для управления стойкой и экспериментом, видеонаблюдения и инструкций для оператора; 6, 7, 8 – сменные блоки со сжатыми рабочими газами;
 9 – приборная стойка лаборатории «Колумбус»

Использованные в эксперименте газы откачиваются из камеры турбонасосом и выбрасываются в забортный вакуум по соответствующей вакуумной магистрали «Колумбуса». Управление проведением экспериментов и запись полученных видеофайлов и экспериментальных параметров осуществляется с помощью блока управления и записи информации (поз. 3 на рис. 1). Все перечисленные блоки монтируются в одну стандартную стойку (поз. 9 на рис. 1) в европейской лаборатории «Колумбус». Перед запуском на орбиту



Рис. 2. Российско-германская команда разработчиков экспериментального блока НА «ПК-4» слева направо: М. Пустыльник (DLR), К. Рау, К. Дайзенрот, С. Албрехт (ИВФ), Х. Томас, М. Финк (ГКА), А. Липаев и А. Усачев (ОИВТ РАН) во время предстартовой подготовки на космодроме Байконур

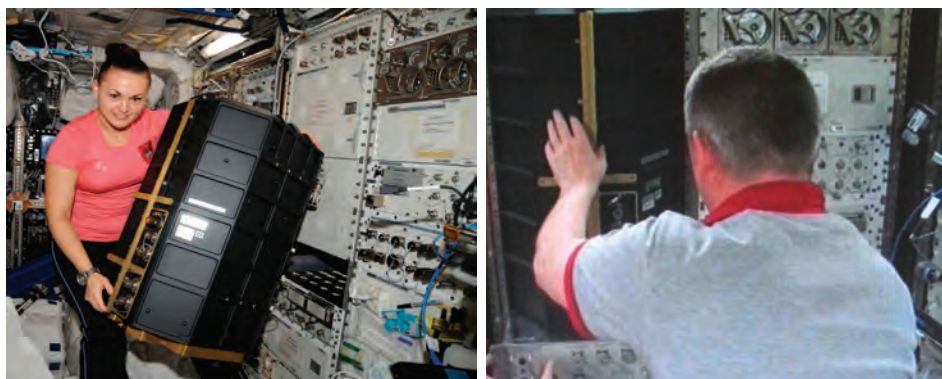


Рис. 3. Монтаж летной модели НА «ПК-4» в модуле «Колумбус» в ноябре 2014 года космонавтами А.М. Самокутяевым и Е.О. Серовой. Вес контейнера 105 кг

все блоки НА «ПК-4» проходили всестороннее предполетное тестирование на космодроме Байконур специалистами организаций-постановщиков эксперимента «ПК-4» и фирмы производителя ОНВ GmbH (рис. 2). 29 октября 2014 года НА «ПК-4» была доставлена на МКС транспортным кораблем «Прогресс М25-М», а в ноябре смонтирована в стойку европейского лабораторного модуля «Колумбус» российскими космонавтами Е.О. Серовой и А.М. Самокутяевым (рис. 3).

Для выполнения КЭ «ПК-4» было изготовлено 5 моделей НА «ПК-4» (рис. 4): летная модель (*flight model, FM*), установленная в модуле «Колумбус» на МКС для выполнения программы фундаментальных исследований в усло-

виях невесомости; инженерная модель (*ground model, GM*), установленная в Центре управления полезными нагрузками в г. Тулуза, Франция (*Centre d'Aide au Développement des activités en Micropesanteur et des Opérations Spatiales, CADMOS*) для окончательной проверки и утверждения экспериментальных процедур перед их передачей на борт МКС; тренировочная модель (*training model, TM*) в Европейском астронавтическом центре (*European Astronaut Centre, EAC*) в г. Кёльне, Германия, для практического обучения космонавтов работе с НА «ПК-4» и две научные модели (*Scientific Reference Models SRM-1 and SRM-2*), установленные, соответственно, в Германском космическом агентстве в г. Оберпфaffenхоффен, Германия (*Deutsches Zentrum für Luft - und Raumfahrt e.V., DLR*) и в ОИВТ РАН в г. Москве. Научные модели предназначены для разработки и практической отработки компьютерных кодов для управления экспериментальными процедурами на борту МКС.

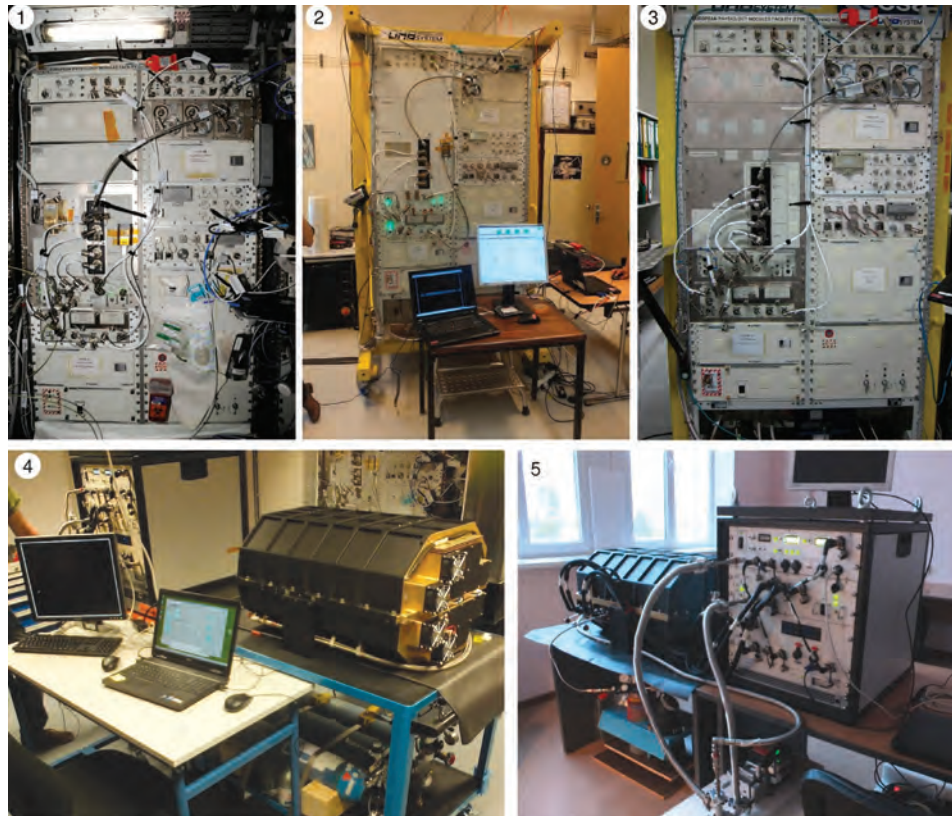


Рис. 4. Пять моделей НА «ПК-4»:

- 1 – летная модель в модуле «Колумбус» на МКС;
- 2 – инженерная модель в Центре управления полезными нагрузками в г. Тулузе, Франция;
- 3 – тренировочная модель в Европейском астронавтическом центре в г. Кёльне, Германия;
- 4 – научная модель № 1 DLR в г. Оберпфaffenхоффен, Германия;
- 5 – научная модель № 2 в ОИВТ РАН

Устройство и функциональные возможности газоразрядной камеры НА «ПК-4»

Центральной функциональной частью НА «ПК-4» является П-образная газоразрядная стеклянная трубка с внутренним диаметром 30 мм и общей длиной около 75 см. Схема трубки представлена на рис. 5. На концах трубки имеются цилиндрические электроды: активный электрод HV-A и пассивный (заземленный) электрод HV-P. На активный электрод подается высокое напряжение питания разряда постоянного тока, которое может менять свою полярность. Изменение полярности с достаточной частотой (100–500 Гц) предназначено для локализации пылевого облака в газоразрядной трубке.

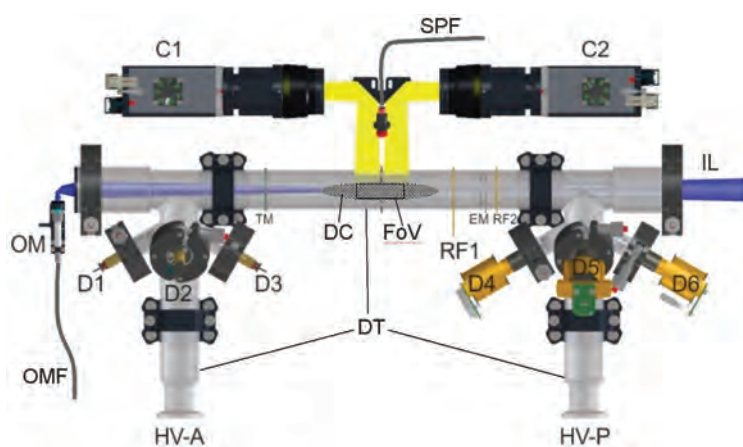


Рис. 5. Схема газоразрядной камеры НА «ПК-4»:

- DT – вакуумная стеклянная трубка низкого давления; DC – плазменно-пылевое облако;
- HV-A – электровакуумный порт для подключения активного электрода постоянного тока и системы напуска рабочего газа; HV-P – электровакуумный порт для подключения пассивного электрода постоянного тока и системы откачки рабочего газа;
- D1–D3 – три инжектора пылевых частиц пневматического типа;
- D4–D6 – три инжектора пылевых частиц пневматического типа;
- C1 и C2 – видеокameraы высокого разрешения;
- FoV – поле зрения 2 видеокameraы высокого разрешения; SPF – световод к спектрометру;
- OM – система формирования луча манипуляционного лазера высокой мощности;
- OMF – световод для мощного лазера; IL – лазерный «нож» для освещения пылевых частиц;
- RF1 и RF2 – подвижный и неподвижный высокочастотные индукторы;
- TM и EM – локальный нагреватель и кольцевой электрод, соответственно

Помимо разряда постоянного тока в НА «ПК-4» предусмотрена возможность создания 2 локальных индукционных разрядов с помощью ВЧ-индукторов. Комбинация разрядов постоянного тока и индукционных позволяет манипулировать пылевыми облаками и локализовать их. В качестве пылевых частиц в НА «ПК-4» используются специальные калиброванные монодисперсные сферические пластиковые сферы из меламин-формальдегида 5 разных диаметров. Пылевые частицы инжектируются в разряд с помощью 3 инжек-

торов пневматического типа (слева на рис. 5) и 3 инжекторов механического типа. После инъекции в плазму пылевые частицы транспортируются электрическим полем в центральную часть газоразрядной трубки, где и проводятся все исследования пылевой плазмы на НА «ПК-4». Чтобы пылевые частицы не улетели в сторону анода, в НА «ПК-4» впервые применен метод переключения полярности разряда ПТ, который заключается в изменении полярности разряда с частотой 0.1–3 кГц (обычно в диапазоне 100–500 Гц). В случае симметричной эпюры тока разряда пылевые частицы находятся в равновесии в центральной области трубки. Для придания частицам движения, симметрия эпюры тока изменяется. Для визуализации пылевых частиц последние подсвечиваются специально сформированным плоским лучом лазера шириной около 100 мкм (лазерным «ножом») и регистрируются 2 видеокамерами с пространственным разрешением 1600×1200 пикселей. Суммарное поле зрения 2 видеокамер составляет 44.8×16.8 мм². Имеется возможность перемещать видеокамеры вдоль оси трубки на 100 мм от ее центра. Выбранные видеофайлы записываются на внешние жесткие диски и возвращаются на Землю.

Основные физические параметры НА «ПК-4»:

- глубина вакуумной откачки – 0.002 Па;
- рабочие газы – неон, аргон, неон с 20 % кислорода;
- давление рабочих газов в разрядной камере – 5–256 Па;
- напряжение на электродах – до 2.7 кВ;
- разрядный ток – 0.5–3.1 мА;
- частота переключения полярности разряда постоянного тока – 0–3 кГц;
- форма переключаемого напряжения с регулируемой скважностью – прямоугольная, треугольная, синусоидальная;
- частота индукционного разряда – 82 МГц;
- мощность индукционного разряда – 0–5 Вт;
- диаметры монодисперсных пластиковых сферических пылевых частиц в различных инжекторах D: D1 – 10.41 ± 0.13 мкм, D2 – 2.64 ± 0.05 мкм, D3 – 3.38 ± 0.07 мкм, D4 – 1.31 ± 0.04 мкм, D5 – 3.38 ± 0.07 мкм, D6 – 6.86 ± 0.12 мкм;
- длина волны и мощность манипуляционного лазера – 808 нм и 0–20 Вт, соответственно.

Более подробно устройство и функционирование НА «ПК-4» описано в [9].

Управление проведением КЭ «ПК-4»

Управление проведением КЭ «ПК-4» может проводиться как космонавтом-оператором на борту МКС, так и в дистанционном режиме из центра CADMOS. Главный недостаток дистанционного режима – задержка сигнала-реакции величиной около 6 секунд по отношению к посланной команде управления. Выбор режима управления зависит от типа выполняемой экспериментальной процедуры. В ряде случаев необходимо быстро (время задержки не больше

1 секунды) среагировать на ту или иную физическую ситуацию, например, когда облако достигло манипуляционного электрода или два облака коснулись одно другого, и в этот момент нужно поменять режим разряда. В этом случае экспериментом управляет космонавт.

Поскольку для управления НА «ПК-4» нужно задавать и следить за величиной сотен параметров: режим откачки и подачи рабочего газа, параметры разряда, режим инжекции пылевых частиц, режим видеорегистрации тремя камерами и режим работы спектрометра и т.д., то вся экспериментальная аппаратура управляется с помощью программы «PK4 HCI SW» (*PK4 Human Computer Interface*), установленной на ноутбуке с операционной системой Windows XP. Программа «PK4 HCI SW» позволяет запускать и исполнять специальные экспериментальные коды-процедуры, предварительно написанные и отработанные на наземных моделях НА «ПК-4». Главная панель «03-Operation» программы «PK4 HCI SW» представлена на рис. 6.

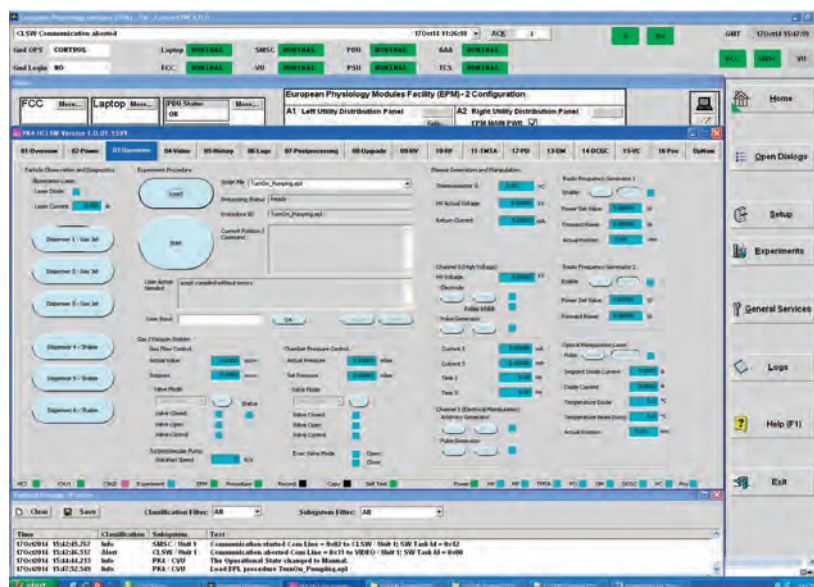


Рис. 6. Главная панель «03-Operation» управляющей программы «PK4 HCI SW»

Для запуска экспериментальной процедуры космонавт-оператор в окне «Script file» из выпадающего списка имеющихся скриптов выбирает требуемый и нажимает мышью кнопку «Load», а затем кнопку «Start». С этого момента программный скрипт запускается на исполнение, а в окне «Current position/Comment» отображаются главные текущие действия и параметры ЛМ «ПК-4». По мере необходимости, в окне «User Action Needed» появляются приглашения оператору выполнить то или иное действие, например, при появлении облака в поле зрения камеры высокого разрешения нажать кнопку «Start». Другие эксперименты не требуют столь быстрой реакции и

позволяют исполнять экспериментальную процедуру в полном объеме из центра CADMOS в г. Тулузе. Там установлен аналогичный компьютерный интерфейс «PK4 HCI SW», который через Col-CC (*Columbus Control Center at Oberpfaffenhofen/Germany*) позволяет обращаться к ЛМ «ПК-4» на МКС. В нижнем окне интерфейса «Payload Message Window» отображается текущая системная активность НА «ПК-4». Помимо приведенной на рис. 6 главной панели «03-Operation» интерфейс «PK4 HCI SW» дает возможность работать еще с 15 панелями, на которых отображаются параметры всех текущих процессов, а также возможность откорректировать их вручную. Управление экспериментальной серией осуществляется штатным оператором CADMOS и ассистирующими ему двумя учеными-постановщиками эксперимента. Помимо CADMOS, за ходом эксперимента можно наблюдать из офиса Европейского космического агентства в ЦУПе г. Королёва. Рабочее место в офисе ЕКА в ЦУПе состоит из 4 основных мониторов (рис. 7): монитора трансляции видео с пылевой плазмой с МКС; монитора NASA OPTIMIS Viewer, отображающего график работ на МКС и состояние спутниковой связи TDRS; монитора управления голосовой связью с CADMOS и монитора управляющей программы «PK4 HCI SW» в пассивном режиме. Имеется постоянная голосовая связь между группами в CADMOS и в ЦУПе, а также актуальное видео летной модели НА «ПК-4» и космонавта. Таким образом, оборудование офиса ЕКА в г. Королёве позволяет сотрудникам ОИВТ РАН полноценно участвовать в проведении орбитальных экспериментов на НА «ПК-4», находясь в ЦУПе.

Проведение экспериментов

Выполнение КЭ «ПК-4» проводится в виде экспериментальных серий: 2–3 раза в год летная модель НА «ПК-4» переводится в активное состояние на 6 дней. Типичная последовательность работ в течение одной экспериментальной серии в модуле «Колумбус» выглядит так:

День 1: подключение требуемого газового баллона к экспериментальному контейнеру с помощью съемного вакуумного шланга; включение тумблера питания блока управления и записи информации, установка сменного жесткого диска; загрузка программного обеспечения, инициализация и тестирование НА «ПК-4»; начало вакуумной откачки.

День 2: откачка вакуумной камеры и балластных объемов НА «ПК-4» (без участия космонавта).

День 3: смена рабочего газа (если предусмотрено); монтаж на стойке ЕРМ и подключение к стойке 3 ноутбуков (управляющего ноутбука, ноутбука-видеомонитора, ноутбука с инструкциями); **проведение экспериментов** (3–6 часов); копирование видеофайлов (на ночь).

День 4: смена жестких дисков, смена рабочего газа (если предусмотрено); **проведение экспериментов** (3–6 часов); копирование видеофайлов.



Рис. 7. Рабочее место участников КЭ «ПК-4» в офисе ЕКА в ЦУПе ЦНИИмаша: 1 – монитор трансляции видео с МКС; 2 – монитор NASA OPTIMIS Viewer, отображающего график работ на МКС и состояние спутниковой связи TDRS; 3 – монитор управления голосовой связью с CADMOS; 4 – монитор управляющей программы НА «ПК-4» в пассивном режиме

День 5: смена жестких дисков, смена рабочего газа (если предусмотрено); **проведение экспериментов** (3–6 часов); демонтаж мониторов; отсоединение вакуумного шланга; копирование видеофайлов.

День 6: удаление жестких дисков, выключение НА «ПК-4». Упаковка дисков для их возвращения на Землю.

Полное время занятости экипажа за экспериментальную серию составляет от 3 до 12 часов в зависимости от содержания проводимых экспериментов.

Программа экспериментов КЭ «ПК-4» разрабатывается и принимается на заседаниях Международной научно-технической группы (*PK-4 Facility Science Team*), состоящей из специалистов из России, Германии, США, Франции, Италии, Швеции, Японии и Китая (рис. 8). Группа встречается в полном составе не реже 1 раза в год. Выбранные эксперименты передаются на детальную проработку в российско-германскую научно-техническую группу, состоящую из специалистов ОИВТ РАН и Лаборатории комплексной плазмы ГКА, для разработки экспериментальных процедур, написанию экспериментальных скриптов и их проверки на научных моделях SRM-1 и SRM-2. Разработанные скрипты не менее чем за месяц до начала очередной экспериментальной серии передаются в CADMOS для окончательной проверки на наземной модели НА «ПК-4», и затем передаются по электронным каналам связи на МКС. Таким образом, перед началом экспериментальной серии на ЛМ НА «ПК-4» все необходимые скрипты и инструкция по проведению экспериментов доступны для космонавта-оператора.



Рис. 8. Заседание Международной научно-технической группы по эксплуатации НА «ПК-4» 22 ноября 2016 года в г. Оберпфaffenхоффен, Германское космическое агентство

Первые результаты КЭ «ПК-4»

Приемо-сдаточные испытания летной модели НА «ПК-4» провел космонавт Геннадий Падалка в июне 2015 года (рис. 9). Эти испытания показали работоспособность летной модели НА «ПК-4», возможность управления экспериментом как с Земли, так и в ручном режиме космонавтом-оператором [9].



Рис. 9. Проведение приемо-сдаточных испытаний ЛМ НА «ПК-4». Слева – операторы в CADMOS, справа – оператор космонавт Г.И. Падалка на МКС

В первом же эксперименте была обнаружена поперечная ионизационная неустойчивость. Эта впервые наблюдавшаяся неустойчивость выражается в согласованной осцилляции всех микрочастиц в плазменно-пылевом облаке перпендикулярно оси разрядной трубки с частотой 24 Гц и амплитудой 0.2 мм [10]. В рамках предложенной модели был исследован критерий потери устойчивости симметричной конфигурации разряда. Предполагалось,

что скорость ионизации пропорциональна квадрату концентрации электронов. Установлено, что при превышении определенного размера пылевого облака относительно размера плазмы малые смещения облака с центрального положения ведут к возникновению колебаний (рис. 10). Найденная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными.

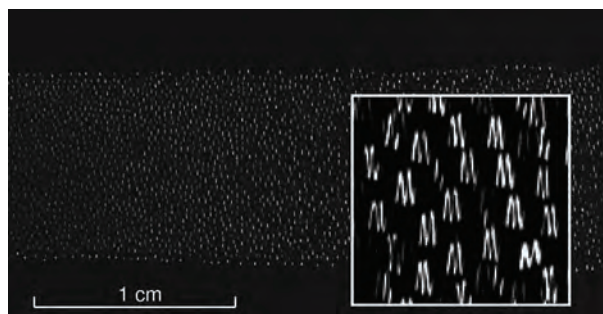


Рис. 10. Поперечная ионизационная неустойчивость в положительном столбе [10]

В дальнейшем было проведено 4 экспериментальные серии КЭ «ПК-4» (рис. 11):

- 1-я: 25–30 октября 2015 года, оператор космонавт Олег Кононенко;
- 2-я: 10–17 июля 2016 года, оператор космонавт Алексей Овчинин;
- 3-я: 9–14 октября 2016 года, оператор космонавт Анатолий Иванишин;
- 4-я: 12–17 февраля 2017 года, оператор космонавт Олег Новицкий.

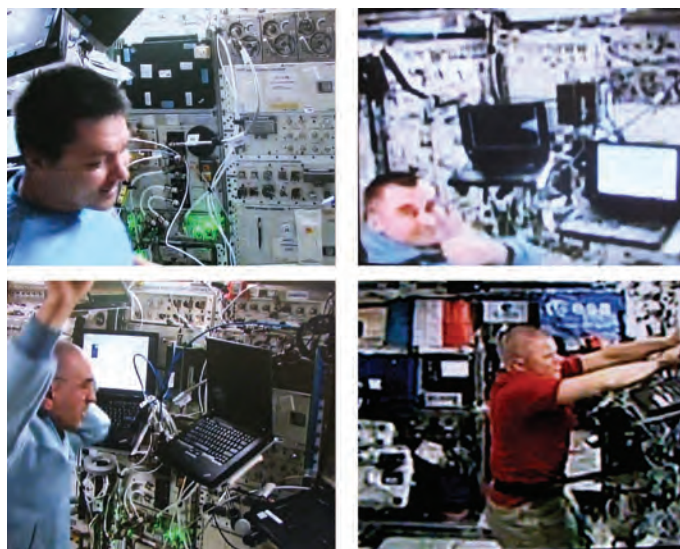


Рис. 11. Проведение экспериментов на ЛМ НА «ПК-4» космонавтами (слева направо): О.Д. Кононенко, А.Н. Овчинин, А.А. Иванишин, О.В. Новицкий

После проведения экспериментов вся полученная цифровая информация была в полном объеме скопирована на съемные носители цифровой информации, которые были доставлены на Землю спускаемым аппаратом «Союз». Проведенные эксперименты охватывают широкий спектр исследований физики пылевой плазмы в газовом разряде постоянного тока, высокочастотном разряде индукционного типа и комбинированном разряде. В частности, с помощью спектральных данных обнаружено увеличение температуры электронов в протяженном плазменно-пылевом облаке [11]. Получены первые оценки сдвиговой вязкости пылевой компоненты по профилю течения плазменно-пылевой жидкости под воздействием мощного лазерного луча. Обнаружены электрореологические эффекты в пылевой плазме, выражающиеся в упорядочивании пылевых частиц в виде очень длинных цепочек длиной до нескольких сантиметров. Полученный большой объем экспериментальных данных в настоящее время обрабатывается, анализируется и готовится к опубликованию.

Выводы

Российско-европейский космический эксперимент «Плазменный кристалл-4» является новым этапом в исследованиях пылевой плазмы. В центре внимания на данном этапе – исследование гидродинамических явлений в сильно неидеальной плазменно-пылевой жидкости. Приемо-сдаточные испытания летной модели НА «ПК-4» и проведенные 4 экспериментальные серии показали работоспособность аппаратуры и правильность выбранных принципов ее функционирования, гибкость в управлении проведением экспериментов. Получена новая научная информация, в частности, о вязкости пылевой подсистемы. Вокруг проекта «Плазменный кристалл-4» сложилась широкая международная научная и техническая кооперация работ, позволяющая проводить исследования на передовом научном и техническом уровне.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность ЕКА и Роскосмосу за всестороннюю поддержку при проведении совместного космического эксперимента «Плазменный Кристалл-4» на борту МКС и рецензировавшему рукопись космонавту-исследователю Герою Российской Федерации Ю.М. Батурину за ряд ценных замечаний, способствовавших улучшению нашей рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chu J.H., Lin I. Direct Observation of Coulomb Crystals and Liquids in Strongly Coupled Rf Dusty Plasmas // *Physical Review Letters*. – 1994. – Vol. 72. – No. 25. – P. 4009–4012.
- [2] Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Mohlmann D. Plasma Crystal - Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma // *Physical Review Letters*. – 1994. – Vol. 73. – No. 5. – P. 652-655.

- [3] Hayashi Y., Tachibana K. Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma // *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-letters*. – 1994. – Vol. 33. – No. 6A. – P. L804-L806.
- [4] Фортков В.Е., Неведов А.П., Торчинский В.М., Молотков В.И., Храпак А.Г., Петров О.Ф., Вольхин К.Ф. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // *Письма в ЖЭТФ* – 1996. – Т. 64. – № 2. – С. 89-91.
- [5] Фортков В.Е., Неведов А.П., Ваулина О.С., Липаев А.М., Молотков В.И., Самарян А.А., Никитский В.П., Иванов А.И., Савин С.Ф., Калмыков А.В., Соловьев А.Я., Виноградов П.В. Пылевая плазма, индуцированная солнечным излучением, в условиях микрогравитации: эксперимент на борту орбитальной станции «Мир» // *ЖЭТФ*. – 1998. – Т. 114. – № 6(12). – С. 2004-2021.
- [6] Nefedov A.P., Vaulina O.S., Petrov O.F., Molotkov V. I., Torchinskii V.M., Fortov V.E., Chernyshev A.V., Lipaev A.M., Ivanov A.I., Kaleri A.Y., Semenov Y.P., Zaletin S.V. The Dynamics of Macroparticles in a Direct Current Glow Discharge Plasma Under Micro-Gravity Conditions // *New Journal of Physics*. – 2003. – Vol. 5. – P. 108.
- [7] Nefedov A.P., Morfill G.E., Fortov V.E., Thomas H.M., Rothermel H., Hagl T., Ivlev A.V., Zuzic M., Klumov B.A., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F., Gidzenko Y.P., Krikalev S.K., Shepherd W., Ivanov A.I., Roth M., Binnenbruck H., Goree J.A., Semenov Y.P. PKE-Nefedov: Plasma Crystal Experiments on the ISS // *New Journal of Physics*. – 2003. – Vol. 5 – P. 33.
- [8] Thomas H.M., Morfill G.E., Fortov V.E., Ivlev A.V., Molotkov V.I., Lipaev A.M., Hagl T., Rothermel H., Khrapak S.A., Suetterlin R.K., Rubin-Zuzic M., Petrov O.F., Tokarev V.I., Krikalev S.K. Complex Plasma Laboratory PK-3 Plus on the International Space Station // *New Journal of Physics*. – 2008. – Vol. 10 – P. 033036.
- [9] Pustyl'nik M.Y., Fink M.A., Nosenko V., Antonova T., Hagl T., Thomas H.M., Zobnin A.V., Lipaev A.M., Usachev A.D., Molotkov V.I., Petrov O.F., Fortov V.E., Rau C., Deysenroth C., Albrecht S., Kretschmer M., Thoma M.H., Morfill G.E., Seurig R., Stettner A., Alyamovskaya V.A., Orr A., Kufner E., Lavrenko E.G., Padalka G.I., Serova E.O., Samokutyayev A.M., Christoforetti S. Plasmakristall-4: New Complex (Dusty) Plasma Laboratory on Board the International Space Station // *Review of scientific instruments*. – 2016. – Vol. 87. – No. 9. – P. 093505.
- [10] Zobnin A.V., Usachev A.D., Lipaev A.M., Petrov O.F., Fortov V.E., Pustyl'nik M.Y., Thomas H.M., Fink M.A., Thoma M.H., Padalka G.I. Transverse Ionization Instability of the Elongated Dust Cloud in the Gas Discharge Uniform Positive Column Under Microgravity Conditions // *Journal of Physics Conference Series: XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2016)*. – 2016. – Vol. 774. – P. 012174.
- [11] Usachev A.D., Zobnin A.V., Shonenkov A.V., Lipaev A.M., Petrov O.F., Fortov V.E., Pustyl'nik M.Y., Fink M.A., Thoma M.H., Thomas H.M. and Padalka G.I. Influence of Dust Particles on the Neon Spectral Line Intensities at the Uniform Positive Column of dc Discharge at the Space Apparatus «Plasma Kristall-4» // *Journal of Physics Conference Series: XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2017)* – 2018. – Vol. 946. – P. 012143.

REFERENCES

- [1] Chu J.H., Lin I. Direct Observation of Coulomb Crystals and Liquids in Strongly Coupled rf Dusty Plasmas // *Physical Review Letters*. – 1994. – Vol. 72. – No 25. – P. 4009–4012.

- [2] Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Mohlmann D. Plasma Crystal-Coulomb Crystallization in a Dusty Plasma // *Physical Review Letters*. – 1994. – Vol. 73. – No 5. – P. 652–655.
- [3] Hayashi Y., Tachibana K. Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma // *Japanese Journal of Applied Physics part 2-letters*. – 1994. – Vol. 33. – No 6A. – P. L804–L806.
- [4] Fortov V.Ye., Nefedov A.P., Torchinsky V.M., Molotkov V.I., Khrapak A.G., Petrov O.F., Volykhin K.F. Dusty Plasma Crystallization in the Positive Glow // *JETP Letters* – 1996. – V. 64. – № 2. – 89–91 p.
- [5] Fortov V.Ye., Nefedov A.P., Vaulin O.S., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Samaryan A.A., Nikitsky V.P., Ivanov A.I., Savin S.F., Kalmykov A.V., Solovyov A.Ya., Vinogradov P.V. Dusty Plasma, Induced by Solar Radiation, Under Micro Gravity Conditions: an Experiment Aboard the «Mir» Station // *JEPT*. – 1998. – V. 114. – № 6(12). – 2004–2021 p.
- [6] Nefedov A.P., Vaulina O.S., Petrov O.F., Molotkov V., Torchinskii V.M., Fortov V.E., Chernyshev A.V., Lipaev A.M., Ivanov A.I., Kaleri A.Y., Semenov Y.P., Zaletin S.V. The Dynamics of Macroparticles in a Direct Current Glow Discharge Plasma Under Micro-Gravity Conditions // *New Journal of Physics*. – 2003. – Vol. 5. – P. 108.
- [7] Nefedov A.P., Morfill G.E., Fortov V.E., Thomas H.M., Rothermel H., Hagl T., Ivlev A.V., Zuzic M., Klumov B.A., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F., Gidzenko Y.P., Krikalev S.K., Shepherd W., Ivanov A.I., Roth M., Binnenbruck H., Goree J.A., Semenov Y.P. PKE-Nefedov: Plasma Crystal Experiments on the ISS // *New Journal of Physics*. – 2003. – Vol. 5. – P. 33.
- [8] Thomas H.M., Morfill G.E., Fortov V.E., Ivlev A.V., Molotkov V.I., Lipaev A.M., Hagl T., Rothermel H., Khrapak S.A., Suetterlin R.K., Rubin-Zuzic M., Petrov O.F., Tokarev V.I., Krikalev S.K. Complex Plasma Laboratory PK-3 Plus on the International Space Station // *New Journal of Physics*. – 2008. – Vol. 10 – P. 033036.
- [9] Pustyl'nik M.Y., Fink M.A., Nosenko V., Antonova T., Hagl T., Thomas H.M., Zobnin A.V., Lipaev A.M., Usachev A.D., Molotkov V.I., Petrov O.F., Fortov V.E., Rau C., Deysenroth C., Albrecht S., Kretschmer M., Thoma M.H., Morfill G.E., Seurig R., Stettner A., Alyamovskaya V.A., Orr A., Kufner E., Lavrenko E.G., Padalka G.I., Serova E.O., Samokutyayev A.M., Christoforetti S. Plasmakristall-4: New Complex (Dusty) Plasma Laboratory on Board the International Space Station // *Review of Scientific Instruments*. – 2016. – Vol. 87. – No 9. – P. 093505.
- [10] Zobnin A.V., Usachev A.D., Lipaev A.M., Petrov O.F., Fortov V.E., Pustyl'nik M.Y., Thomas H.M., Fink M.A., Thoma M.H., Padalka G.I. Transverse Ionization Instability of the Elongated Dust Cloud in the Gas Discharge Uniform Positive Column Under Microgravity Conditions // *Journal of Physics Conference Series: XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2016)*. – 2016. – Vol. 774. – P. 012174.
- [11] Usachev A.D., Zobnin A.V., Shonenkov A.V., Lipaev A.M., Petrov O.F., Fortov V.E., Pustyl'nik M.Y., Fink M.A., Thoma M.H., Thomas H.M. and Padalka G.I. Influence of Dust Particles on the Neon Spectral Line Intensities at the Uniform Positive Column of dc Discharge at the Space Apparatus «Plasma Kristall-4» // *Journal of Physics Conference Series: XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2017)*. – 2018. – Vol. 946. – P. 012143.

**БАЗА ДАННЫХ
«ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЭКИПАЖЕЙ РС МКС
ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ДОСТАВЛЯЕМЫХ,
ВОЗВРАЩАЕМЫХ И УДАЛЯЕМЫХ ГРУЗОВ»**

Б.И. Крючков, В.И. Ярополов, В.И. Горлова

**THE DATABASE “ACTIVITIES OF THE ISS RS’S CREWS
FOR THE MAINTENANCE OF DELIVERED,
RETURN AND DISPOSABLE CARGO”**

B.I. Kryuchkov, V.I. Yaropolov, V.I. Gorlova

В ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» разработана и зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности база данных «Деятельность экипажей РС МКС по обслуживанию доставляемых, возвращаемых и удаляемых грузов». Свидетельство о государственной регистрации № 2018620298 от 16 февраля 2018 года. Разработанная база данных предназначена для хранения в систематизированном виде:

информации о составе грузов, доставляемых на РС МКС транспортными и пилотируемыми кораблями;

информации о датах запусков и времени пребывания в составе МКС различных грузовых кораблей;

хронологического перечня конкретных операций, выполняемых космонавтами РС МКС, с присвоением соответствующих идентификаторов по типам операций и должности космонавта, работающего с грузами;

данных о трудозатратах космонавтов РС МКС на выполнение конкретных операций.

База данных построена с использованием СУБД Access 2007.

Все материалы, вносимые в базу данных, делятся на следующие категории, представленные на рис. 1.

Использование базы данных позволяет:

выполнять анализ структуры и содержания грузов по подсистемам РС МКС с учетом их массовых характеристик;

анализировать статистические характеристики (функции распределения, гистограммы) времени нахождения грузовых кораблей в составе РС МКС, времени между их стартами, трудозатрат на различные виды обслуживания грузов (рис. 2, 3);

анализировать динамику ежемесячных (полугодовых, годовых и др.) трудозатрат экипажей РС МКС на работы с грузами и грузовыми кораблями.

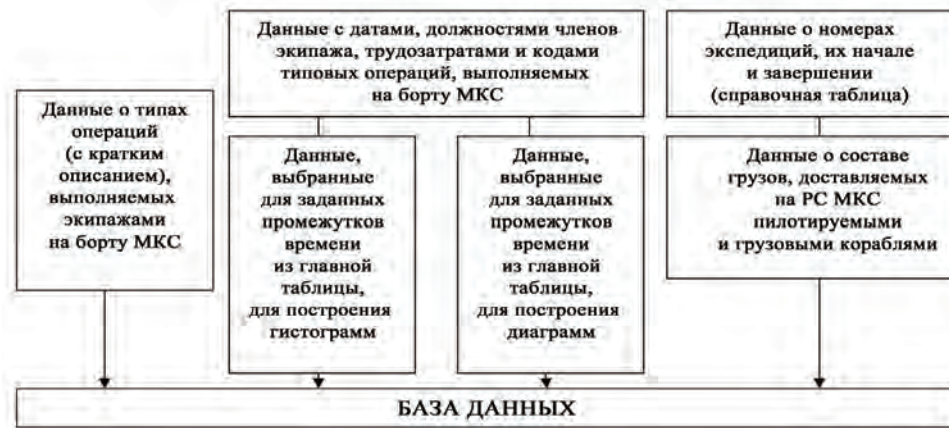


Рис. 1. Категории вводимых данных

Примеры формирования гистограмм

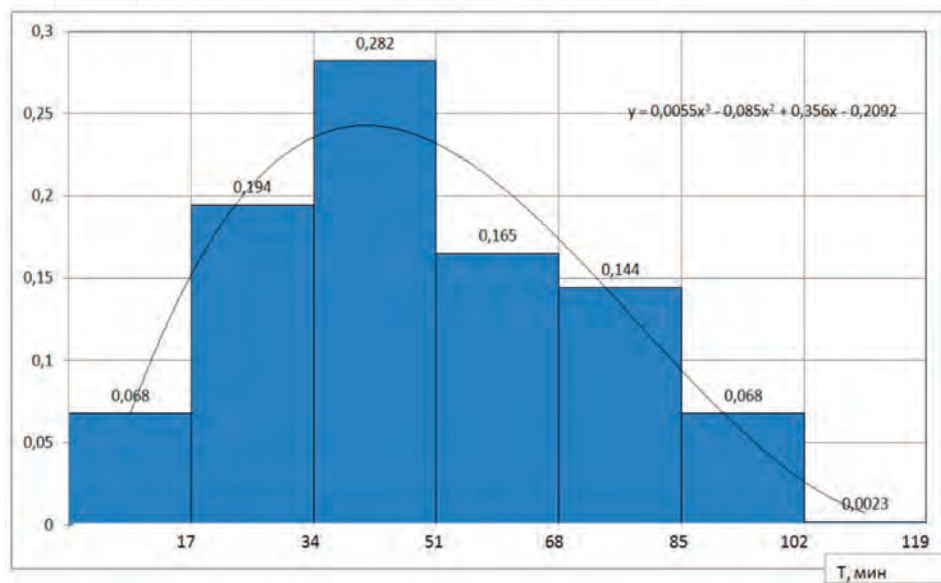


Рис. 2. Гистограмма распределения трудозатрат на разгрузочно-погрузочные операции ТК и ТПК экипажами РС МКС

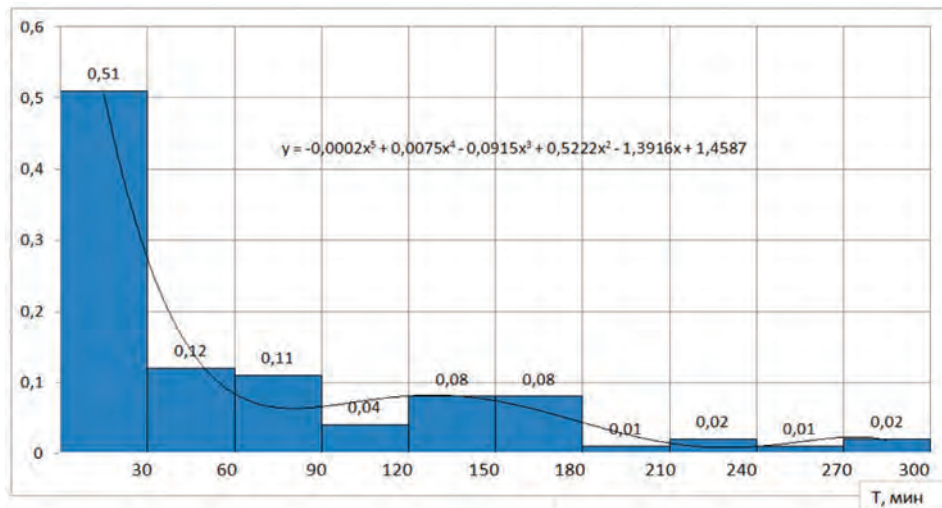


Рис. 3. Гистограмма распределения трудозатрат экипажа РС МКС на работы с грузами и грузовыми кораблями

Редактирование, удаление и внесение новых записей осуществляет администратор базы.

**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 04.06.18.

Формат 70x108/16. Бумага ксероксная.

Усл. печ. л. 11,90. Тираж 120 экз. Зак. 273-18.

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