

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.072.8:629.785:629.78-051

DOI 10.34131/MSF.21.3.43-60

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ КОСМОНАВТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ УСЛОВИЙ ВКД НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С УЧАСТИЕМ ЭКИПАЖЕЙ МКС

Б.И. Крючков, М.М. Харламов, П.П. Долгов, В.М. Усов,  
В.С. Коренной

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. экон. наук М.М. Харламов;  
канд. техн. наук, с.н.с. П.П. Долгов; докт. мед. наук, проф. В.М. Усов;  
канд. техн. наук, с.н.с. В.С. Коренной  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье исследуются возможности и качество выполнения космонавтами ряда типовых операций ВКД после длительного пребывания в реальных условиях космического полета на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС). Исследования осуществлялись на стенде обезвешивания, позволяющем моделировать гравитацию на Марсе и условия работы в скафандре на его поверхности. Проведено сравнительное оценивание операций внекорабельной деятельности (ВКД), выполняемых космонавтами в до- и послеполетных экспериментах.

**Ключевые слова:** космонавт, моделирование, внекорабельная деятельность, космический полет, эксперименты, качество выполнения операций.

### **Study of the Quality of Cosmonauts' Activities When Simulating the EVA Environment on the Martian Surface in the Experiments Involving the ISS Crews. B.I. Kryuchkov, M.M. Kharlamov, P.P. Dolgov, V.M. Usov, V.S. Korennoy**

The paper studies the possibilities and quality of performing a number of standard EVA operations by cosmonauts after a long-duration space mission aboard the ISS Russian Segment. Experiments have been conducted using the gravity offload stand that allows simulating the Martian gravity and conditions of spacesuited activity of cosmonauts on the planet surface. A comparative evaluation of the EVA operations performed by cosmonauts in pre- and post-flight experiments has been carried out.

**Keywords:** cosmonaut, simulation, extravehicular activity (EVA), space mission, experiments, quality of the performance of operations.

При проведении длительных околоземных полетов на орбитальных станциях наблюдается заметное изменение характеристик деятельности космонавтов в результате влияния множества экстремальных факторов. При полетах на Марс к таким факторам можно отнести радиацию, невесомость, неблагоприятные факторы искусственной среды обитания, психологические факторы и др. [1, 2, 4, 6, 7, 9, 10]. В результате суммарного воздействия эти факторы негативно влияют на работоспособность и здоровье космонавта в длительном полете, что в свою очередь отражается на качестве его деятельности. В целях исследования возможностей космонавта по выполнению внекорабельной деятельности (ВКД) на поверхности Марса проведена серия экспериментов на комплексе полунатурного моделирования, обеспечивающем воспроизведение условий работы на планете. Участниками экспериментов были космонавты, прошедшие подготовку и выполнившие длительные (от полугода до года) полеты на МКС [3, 8, 17].

ВКД относится к ключевым операциям полетной деятельности космонавтов. Она имеет важное значение как для полетов на околоземных орбитах, так и при организации миссий в дальний космос. Изучение и освоение Марса невозможно себе представить без выполнения работ космонавтами на его поверхности [11, 15, 16].

## 1. Постановка задачи

В интересах оценивания качества деятельности космонавтов при ВКД на поверхности Марса требуется разработать научные и технологические основы моделирования выполняемых операций, методику экспериментальных исследований, обосновать соответствующие показатели, способы их оценивания и интерпретации.

Согласно [5] понятие качества применимо к объектам любой природы. Под качеством операций ВКД, выполняемых космонавтами, будем понимать совокупность существенных свойств, обуславливающих пригодность применения по назначению реализуемых технологий ВКД. Качество операций ВКД определяется эксплуатационно-техническими характеристиками системы ВКД, условиями ее организации, профессиональными качествами космонавта, являющегося центральным звеном этой системы.

Для измерения (оценивания) показателя качества ВКД необходимо знать  $n$  показателей существенных свойств ВКД от  $y_1$  до  $y_n$ . Тогда, в общем виде, показатель качества ВКД можно представить в виде  $n$ -мерного вектора  $Y_{<n>}^{ВКД} = \langle y_1, y_2, \dots, y_n \rangle$ .

## 2. Методика исследований

### 2.1. Общая схема экспериментов

Для отработки типовых операций ВКД на поверхности Марса был выбран комплекс полунатурного моделирования, позволяющий исследовать возможности перемещения космонавта и выполнения им работ в скафандре (СК) в моделируемых условиях.

В основу исследований положена трехмодульная схема проведения экспериментов (рис. 1). «Модуль I» моделирует предполетные эксперименты. «Модуль II» формирует полетную часть эксперимента при выполнении полета экипажем МКС в условиях, близких к условиям марсианской экспедиции. «Модуль III» – модуль реализации экспериментов, выполняемых космонавтами после окончания длительной экспедиции на МКС.

«Аналитический блок» предназначен для формирования вероятных сценариев выполнения пилотируемых полетов, состава ключевых операций, обоснования характеристик моделирующего комплекса и выбора показателей оценки операторских качеств.



Рис. 1. Общая схема исследований

На рис. 2 представлен «Модуль предполетных экспериментов», проводимых в наземных условиях, который служит для получения фоновых значений контролируемых показателей.

Предназначение этого модуля – получение исходных данных по операторским качествам космонавтов с целью использования их для сравнения с послеполетными результатами.

В этом модуле до полета космонавтов на МКС отрабатываются те же ключевые технологии, что и после полета в модуле III. Именно на этом принципе основан главный методический прием сравнительного анализа данных на нескольких временных срезах, которые при одинаковом составе моделей деятельности представлены разными условиями ее выполнения, что определяется либо составом факторов реальной деятельности (факторов полета), либо факторов, моделируемых в эксперименте.



Рис. 2. Структура и содержание предполетных исследований

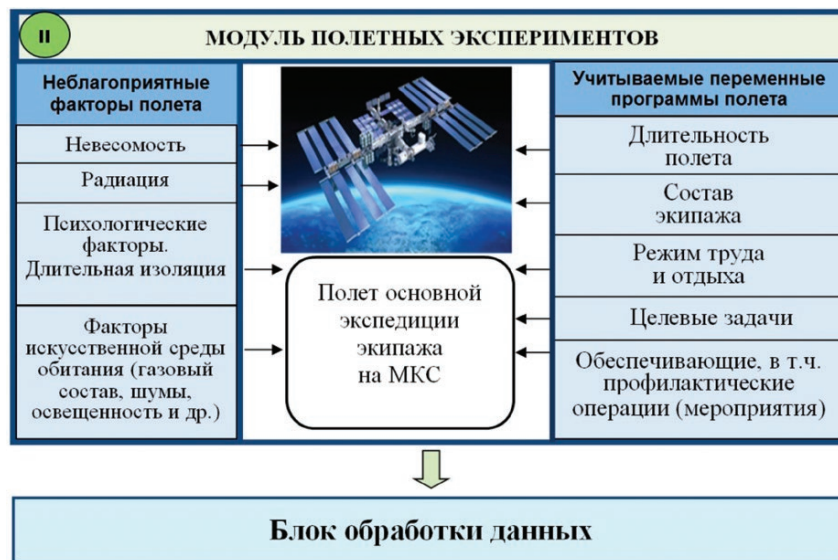


Рис. 3. Модель длительного полета на МКС как аналог полета на Марс

Предназначение «Модуля II» (рис. 3) состоит в реконструкции модели полета космонавта на Марс за счет выполнения реального длительного полета на МКС.

При проектировании дизайна «Модуля II» были систематизированы современные научные представления о «факторах космического полета» и их

влиянии на состояние и деятельность космонавта. При этом предполагается, что космонавты, с точки зрения циклограммы полетной деятельности, состава рабочих операций, режима труда и отдыха, психологического статуса экипажа, воздействия экстремальных факторов находятся в состоянии, близком к состоянию экипажа, выполняющего полет на Марс [1, 3, 17].

На рис. 4 представлены состав и структура «Модуля послеполетных экспериментов». Его использование позволяет получить новые данные по качествам деятельности космонавтов после выполнения ими длительного полета на МКС и соотнести их с выполнением первого выхода на поверхность Марса.

Слева на оси времени показан отсчет от времени от спуска штатного пилотируемого космического аппарата (ПКА) типа «Союз», начиная с которого выполнялся весь цикл подготовительных работ по постановке эксперимента. Правая часть схемы (рис. 4) посвящена описанию состава независимых переменных эксперимента, которые принимались во внимание при интерпретации результатов.

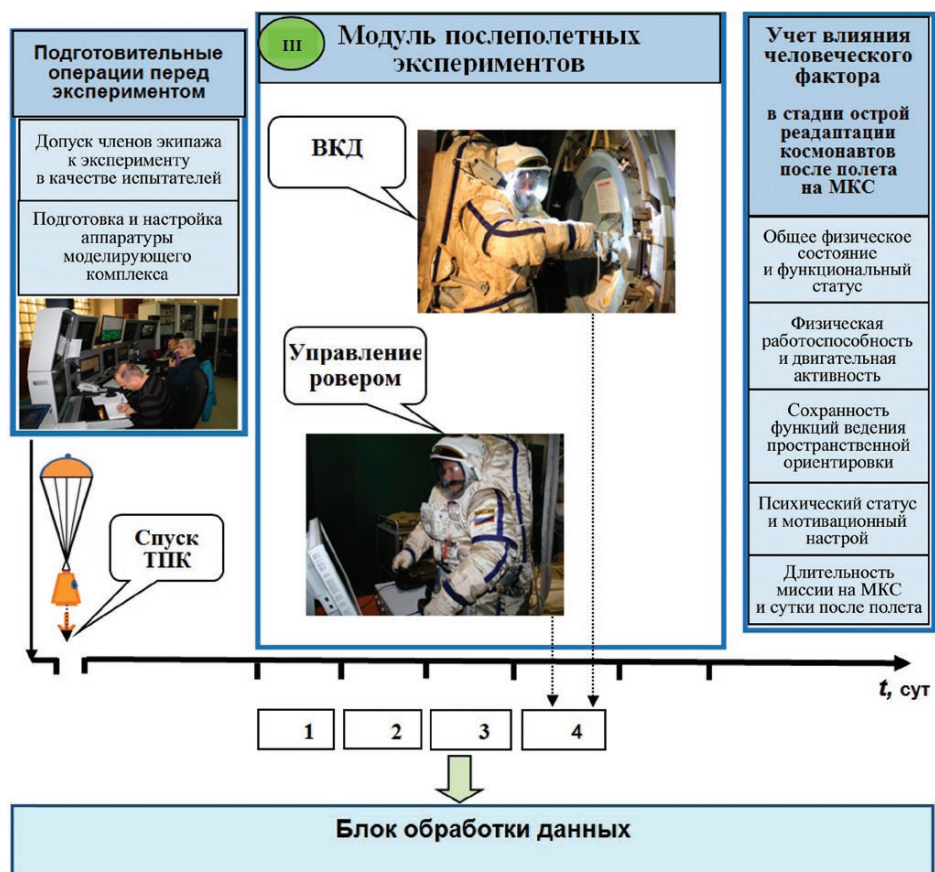


Рис. 4. Структура и содержание послеполетных исследований

Помимо использования уникальных данных полета на МКС, рассматриваемого в качестве наиболее реалистичной модели межпланетного полета, появляется уникальная возможность участия выполнившего полет космонавта в послеполетных экспериментах на моделирующих комплексах непосредственно после полета, когда сохраняются те изменения (сдвиги) состояния, которые определяют надежность человеческого фактора.

Такое участие подразумевает исполнение роли оператора межпланетного ПКА в период, возможно, самого ответственного этапа работ при высадке космонавтов из спускаемого аппарата на поверхность планеты.

«Модуль послеполетных экспериментов», состав и структура которого представлены на рис. 4, позволяет получить новые данные по операторским качествам космонавтов после выполнения ими длительного полета на МКС.

## 2.2. Моделирование условий ВКД. Циклограмма экспериментов

Эксперименты проводились на специализированном стенде «Выход-2», оснащенный силокомпенсирующей системой обезвешивания космонавта и скафандра для ВКД «Орлан-МКС». Стенд обеспечивал возможность горизонтальных и вертикальных перемещений оператора, наддува СК, имитацию работы его бортовых систем и системы шлюзования.

Моделирование условия ВКД на поверхности Марса обеспечивалось рядом факторов:

1) система обезвешивания позволяла частичную компенсацию веса космонавта в скафандре, что давало возможность имитировать гравитацию на Марсе, т.е. ускорение свободного падения  $g_m = 3,71 \text{ м/с}^2$ , составляющего  $0,35 g_z$ , где  $g_z$  – ускорение свободного падения на Земле;

2) приближение подвижности космонавта в СК «Орлан-МКС» к подвижности (гибкости) перспективного марсианского скафандра достигалось снижением в нем избыточного давления до  $0,1 \text{ кг/см}^2$  (по сравнению с избыточным давлением в штатном скафандре «Орлан-МКС», равным  $0,4 \text{ кг/см}^2$ );

3) имитировалась работа бортовых систем СК и системы шлюзования, что позволяло космонавту управлять ими в ходе ВКД;

4) медицинский контроль состояния здоровья космонавтов осуществлялся системой медконтроля, аналогичной применяемой на МКС;

5) осуществлялась имитация оперативного взаимодействия космонавта с ЦУПом (радиосвязь с оператором-инструктором, контроль медицинских параметров, контроль состояния бортовых систем скафандра);

6) в первом приближении имитировались неровности поверхности (рельефа) Марса за счет размещения на пути космонавта небольших ступеней;

7) время проведения эксперимента на 4-е сутки после полета экипажа на МКС выбиралось с учетом рекомендаций космонавтов, выполнявших длительные полеты в космос, по оценкам своей физической работоспособности; кроме того, как показывают послеполетные медицинские исследования [7], в этот период негативное влияние факторов длительного космического

полета на здоровье и работоспособность космонавта сохраняется, что подтверждает обоснованность данного срока проведения экспериментов;

8) допускалось, что профессиональный статус космонавта, его физическая работоспособность соответствовали тем, которые будут у него после полета по трассе «Земля–Марс» на момент ВКД на поверхности Марса. Иными словами, длительный полет космонавта на МКС рассматривался как аналог полета на Марс, поскольку он соответствует его возможной продолжительности и, в первом приближении, воздействию неблагоприятных факторов, а также режиму полетной деятельности экипажа экспедиционного марсианского комплекса (см. рис. 3 и работу [11]).

Циклограмма работ космонавтов была одинаковой в до- и послеполетных экспериментах. Она включала непрерывное выполнение 7 последовательных операций:

1. Операции шлюзования на начальном этапе ВКД (наддув СК до 0,12 атм, переход на автономное питание), открытие выходного люка (ОВЛ).

2. Перемещение к рабочему месту (перемещение с мягким фалом к площадке, подъем по ступеням на площадку, спуск с площадки, перемещение к лестнице. Фиксация мягкого фала к лестнице).

3. Перемещение за контейнером (подъем на площадку, спуск по ступеням, подход к контейнеру). Перемещение с контейнером на площадку, спуск с площадки, размещение контейнера на площадке.

4. Установка антенны (открытие контейнера, извлечение антенны, перемещение с антенной к лестнице, подъем по лестнице, фиксация антенны на поручне лестницы, спуск с лестницы).

5. Стыковка электроразъемов (стыковка электроразъемов, укладка разъемов в фиксаторы).

6. Обратное перемещение с контейнером (подход к контейнеру, перемещение с контейнером на площадку, спуск с площадки, подход к месту размещения и установка контейнера).

7. Закрытие выходного люка (перемещение к выходному люку, закрытие выходного люка).

Таким образом, в проводимых экспериментах оценивался блок типовых операций, а не прототип полной штатной циклограммы работы космонавтов на поверхности Марса.

По своему характеру все 7 выполняемых операций можно разделить на два кластера. К первому относятся операции (№ 1, 5, 7), выполняемые на рабочем месте, когда перемещения космонавта не превышали 1 м. Ко второму – операции, связанные с перемещениями (№№ 2, 3, 4, 6).

В целях обеспечения безопасности работ при проведении экспериментов после длительного полета космонавту разрешалось по самочувствию самому определять темп выполнения операций ВКД, делать паузы (остановки) при необходимости, не выполнять какие-либо элементы операций или выполнять их с помощью инструктора, сопровождающего эксперимент.

В качестве второго этапа экспериментов по ВКД на поверхности Марса выполнялось управление виртуальным ровером (рис. 5). При этом космонавт находился в СК для ВКД под избыточным давлением. Давление в скафандре варьировалось от 0,12 до 0,36 кг/см<sup>2</sup>.

В ходе управления ровером космонавт использовал виртуальное окружение на мониторе, на котором отображаются путь передвижения по поверхности Марса (моделировалась область кратера Гусева), а также инструментальные данные на приборах, фиксирующих время передвижения, расход электроэнергии на управление и ошибочные действия космонавта. В качестве органов управления ровером использовались джойстики.

Продолжительность управления ровером составляла от 12 до 25 мин. Скорость перемещения выбиралась космонавтом, исходя из соображений безопасности движения и затрат времени достижения пункта назначения при заранее заданных ограничениях.



Рис. 5. Управление виртуальным ровером

До начала экспериментов все космонавты получали медицинский допуск и подписывали информированное согласие.

В ходе экспериментов непрерывно велась видеозапись ВКД и оперативный медицинский контроль состояния здоровья космонавтов по стандартным методикам, хронометрировалось выполнение всех операций и фиксировались все отклонения от нормы.

### 2.3. Показатели качества деятельности космонавтов

В числе основных показателей деятельности космонавтов по выполнению ВКД рассматривались следующие:

1) Трудозатраты на выполнение операции ВКД  $i$ -го типа.

Выполняемая космонавтом каждая  $j$ -я циклограмма ВКД содержит  $i$ -типов операций. Их последовательность определяется как  $[i = 1(1)l]$ , т.е. от 1 до  $l$  с шагом 1. Для  $i$ -й операции трудозатраты, дисперсия и среднеквадратическое отклонение при реализации  $j$ -циклограмм, соответственно, будут:



$$\left. \begin{aligned} M_{\hat{t}_i}^* &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k t_i, \\ D_{\hat{t}_i}^* &= \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (t_i - M_{\hat{t}_i}^*), \\ \sigma_{\hat{t}_i}^* &= k_{n-1} \sqrt{D_{\hat{t}_i}^*}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\hat{t}_i$  – значения времен (случайных величин), фиксируемых для каждой  $i$ -й операции;  $k$  – число космонавтов, участвующих в экспериментах (соответствует числу реализованных циклограмм);  $M_{\hat{t}_i}^*$  – математическое ожидание (среднее значение) трудозатрат; \* – символ статистической величины.

Поскольку в силу уникальности экспериментов проведение их большого числа не представляется возможным, приходится оперировать с выборками при  $k$  менее 50, когда между  $t$ -распределением (Стьюдента) и нормальным распределением имеются заметные расхождения, приводящие к смещению оценок более, чем на 2 %. В нашем случае при  $k = 9$  разница между значениями выборочной и генеральной дисперсии составляет 12,5 %, поэтому введение поправки в виде множителя  $k_{n-1}$  необходимо [12]. Расчеты, проводимые по формулам (1) в Excel, автоматически обеспечивают несмещенность оценок.

2) Трудозатраты на операции ВКД в кластере 1 или 2.

К кластеру 1 отнесены операции №№ 1, 5, 7, выполняемые на рабочем месте.

Тогда,

$$M_{\hat{t}_1}^* = \frac{1}{k} \sum_{m=1}^q t_m, \quad (2)$$

где  $M_{\hat{t}_1}^*$  – экспериментальное значение математического ожидания трудозатрат на операции кластера 1 (№№ 1, 5, 7);  $t_m$  – значения фиксируемого времени на  $m$ -ю операцию кластера 1 в соответствующих экспериментах, т.е. последовательность случайных величин  $t_m$ :  $\hat{t}_m [i = 1, 5, 7]$ .

Аналогично запишем для кластера 2, включающего операции перемещения (№№ 2, 3, 4, 6), т.е. для последовательности  $\hat{t}_r [i = 2, 3, 4, 6]$ :

$$M_{\hat{t}_2}^* = \frac{1}{k} \sum_{r=1}^d t_r, \quad (3)$$

где  $t_r$  – значения времени, фиксируемого на выполнение  $r$ -й операции кластера 2.

Средние квадратические отклонения для  $\hat{t}_1$  и  $\hat{t}_2$  вычисляются аналогично (1).

3) Средние трудозатраты на выполнение  $j$ -й циклограммы ВКД. Трудозатраты на выполнение  $j$ -й циклограммы ВКД можно представить в виде  $l$ -мерного случайного вектора:

$$\hat{T}_{<l>} = \langle \hat{t}_1, \hat{t}_2 \dots \hat{t}_l \rangle, \quad (4)$$

где  $\hat{t}_i$  – значения случайных трудозатрат на каждую  $i$ -ю операцию ВКД в соответствующих экспериментах, а  $\hat{t}_i[i = 1(1)l]$  – их последовательность от 1 до  $l$  с шагом 1.

Тогда трудозатраты на выполнение  $j$ -й циклограммы ВКД будут:

$$T_{\text{ц}}^{*j} = \sum_{i=1}^l t_{ij}, \quad (5)$$

где  $t_{ij}$  – значения случайных величин трудозатрат на  $i$ -ю операцию в  $j$ -й циклограмме ВКД.

Статистическое значение трудозатрат по всем  $j$ -циклограммам (экспериментам) будет:

$$T_{\text{ц}}^* = \sum_{j=1}^k T_{\text{ц}}^{*j} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^l t_{ij}. \quad (6)$$

4) Вероятность успешного выполнения циклограммы ВКД.

Статистическая вероятность успешного выполнения  $j$ -й циклограммы ВКД будет:

$$P_j^* = \frac{n_j^{\text{усп}}}{n_j}, \quad (7)$$

где  $n_j^{\text{усп}}$  – число успешно выполненных операций в  $j$ -й циклограмме;  $n_j$  – общее число операций в  $j$ -й циклограмме.

Успешной операцией будем считать любую из  $l$  операций, выполненных самостоятельно космонавтом от начала до конца. Ряд операций после полета в зависимости от физического состояния космонавтов может быть ими не выполнен, либо выполнен с помощью страхующего инструктора, находящегося рядом.

При проведении серии экспериментов, в которых участвуют  $k$ -космонавтов, вероятность успешного выполнения циклограммы ВКД будет:

$$P_{\text{ц}}^* = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_j^*. \quad (8)$$

5) Показатели качества деятельности при управлении виртуальным ровером.

- Средние трудозатраты на передвижение ровера  $T_p^*$  по установленному маршруту. Вычисляются аналогично (1) с учетом всех выполненных  $k$ -экспериментов.

- Средний расход энергии (аккумулятора  $Q_3^*$ ). Вычисляется аналогично (1) по результатам расхода энергии в  $k$ -экспериментах.

• Вероятность успешного управления ровером  $P_p^*$ . Вычисляется с использованием формул (7), (8). При этом вероятность безошибочного управления ровером в  $j$ -м эксперименте будет  $P_{jp}^*$ .

*Примечание:* все зависимости, представленные формулами (1)–(8), справедливы как для дополетных экспериментов, так и для послеполетных. Далее первые будем обозначать индексом «дп», вторые – «пп».

### 3. Результаты и обсуждение

1) Трудозатраты на выполнение ВКД.

• Средние трудозатраты на одну операцию вычислялись в соответствии с (1):

– среднее время на одну дополетную операцию составляет

$$T_i^{дп} = 87,9 \text{ с};$$

– среднее время на одну послеполетную операцию составляет

$$T_i^{пп} = 109,3 \text{ с}.$$

Таким образом, в среднем послеполетные трудозатраты на одну операцию ВКД превышают дополетные на 24,3 %, что можно объяснить влиянием на работоспособность космонавта экстремальных факторов длительного космического полета.

• Трудозатраты на операцию, выполняемую на рабочем месте (кластер 1 – операции №№ 1, 5, 7), в соответствии с (2):

– среднее время в дополетных экспериментах составляет  $T_1^{дп} = 85,3 \text{ с}$ ;

– среднее время в послеполетных экспериментах составляет  $T_1^{пп} = 96,7 \text{ с}$ .

Таким образом, в среднем трудозатраты на операцию, выполняемую на рабочем месте в послеполетных экспериментах, выше, чем в дополетных, на 13,4 %.

• Трудозатраты на операции перемещения (кластер 2 – операции №№ 2, 3, 4, 6) в до- и послеполетных экспериментах в соответствии с (3) составляли соответственно  $T_2^{дп} = 89,8 \text{ с}$  и  $T_2^{пп} = 118,7 \text{ с}$ . В данном случае послеполетные трудозатраты превышали дополетные на 32,2 %.

Сравнивая результаты по кластерам 1 и 2, можно сделать вывод, что физическая работоспособность космонавта при выполнении работ, связанных с перемещениями, снижается больше, чем при выполнении операций на рабочем месте (в 2,4 раза по кластеру 2 в сравнении с кластером 1).

Относительный прирост трудозатрат на выполнение операций перемещения по сравнению с операциями на рабочем месте составляет:

– для дополетных экспериментов – 10 %;

– для послеполетных экспериментов – 23 %.

Приведенные данные также подтверждают большее негативное влияние факторов длительного космического полета на работоспособность кос-

монавта при выполнении операций перемещения, чем при выполнении задач ВКД на рабочем месте.

Сопоставляя данные по трудозатратам на выполнение операции ВКД ( $T_i^{дп}$  и  $T_i^{пн}$ ) со средней суммарной длительностью полетов всех  $k$ -космонавтов-участников эксперимента, можно, в первом приближении, оценить, что каждый месяц полета на МКС дает в среднем прирост трудозатрат на операцию ВКД (а при их равнозначности и на циклограмму ВКД в целом) ~на 4 %.

- Средние трудозатраты на выполнение циклограммы ВКД:  
Вычисляются по формулам (5), (6):
  - среднее время выполнения циклограммы  $k$ -космонавтами до полета составляет 588,0 с;
  - среднее время выполнения циклограммы этими же  $k$ -космонавтами после полета составляет 714,9 с.

Таким образом, средние трудозатраты на выполнение циклограммы ВКД после длительного пребывания в космосе возрастали на 21,6 %.

#### 2) Отклонения от нормы при выполнении ВКД.

При выполнении послеполетных экспериментов отмечались некоторые отклонения от нормы в ходе выполнения космонавтами ВКД. Все отклонения классифицировались по 7 видам (рис. 6). Наибольшее их число 36,9 % и 26,4 % приходилось, соответственно, на «неполное выполнение операции ВКД» и на «выполнение операции ВКД с помощью инструктора». Наибольшее число отклонений от нормы на одного космонавта составляло 5, наименьшее – 1. В двух случаях из 9 в работе космонавтов отклонений от нормы не отмечалось.

В общую статистику по оцениванию ВКД не включались данные по одному из экспериментов, когда после полугодового полета с учетом самочувствия космонавта пришлось понижать действующую «гравитацию» с «марсианской» (0,38  $g_3$ ) сначала до «лунной» (0,17  $g_3$ ), а затем до величины (0,07  $g_3$ ).

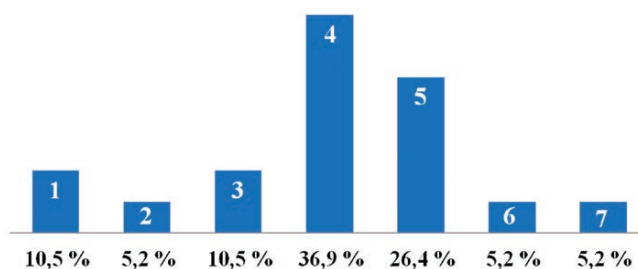


Рис. 6. Виды отклонений от нормы при моделировании ВКД:

- 1 – не выполнение операции ВКД; 2 – выполнение операции со второго раза;
- 3 – неоптимальное управление СОТР СК; 4 – неполное выполнение операции ВКД;
- 5 – выполнение операции ВКД с помощью инструктора;
- 6 – предоставление отдыха по медицинским показателям;
- 7 – вынужденное понижение давления в СК (менее 0,12 кг/см<sup>2</sup>)

Изменение режима моделирования гравитации за счет силокомпенсирующей системы обезвешивания космонавта позволило улучшить его работоспособность и в итоге выполнить все операции заданной циклограммы деятельности. Поскольку условия полета на МКС и условия проведения данного эксперимента не отличались от других, его результаты можно объяснить индивидуальными особенностями организма человека.

3) Вероятность успешного выполнения циклограммы ВКД.

Средняя вероятность выполнения заданной циклограммы без отклонений от нормы будет:

$$P_{\text{ц}}^{*\text{нп}} = 1 - Q_{\text{ц}}^{*\text{нп}} = 1 - \frac{1}{k} \sum_{q=1}^k P_q^* \quad (9)$$

где  $Q_{\text{ц}}^{*\text{нп}}$  – средняя вероятность отклонений от нормы при выполнении циклограммы ВКД;  $P_{\text{ц}}^{*\text{нп}}$  – вероятность отклонений от нормы в  $j$ -й циклограмме.

В нашем случае  $Q_{\text{ц}}^{*\text{нп}} = 0,302$  и, соответственно,  $P_{\text{ц}}^{*\text{нп}} \approx 0,7$ .

4) Основные результаты, эксперимента по управлению виртуальным ровером.

- Во время послеполетной сессии космонавтами преодолевался меньший отрезок маршрута с затратой большего объема рабочего тела (превышение до 31 %).

- Повышение давления в скафандре с 0,12 до 0,36 атм приводило к увеличению времени перемещения в 3,2–3,8 раза и снижению качества управления до 60 %.

- В ряде случаев отмечалось превышение, по сравнению с фоновыми значениями, времени передвижения до заданного пункта назначения, а также выявлялись и некоторые отклонения от установленного маршрута движения.

- Зафиксированы трудности выполнения управляющих движений в перчатках скафандра и восприятия приборной информации через остекление шлема скафандра, в связи с чем предстоит дополнительно уточнять требования к эргономике органов управления ровером, индикации навигационных параметров пульта управления и др.

Космонавтом, выполнившим годовой полет на МКС, отмечались заметные физические нагрузки при управлении ровером в снаряжении из-за большой массы СК (его вес в земных условиях достигает 100 кг).

#### 4. Сопоставление экспериментов по ВКД и РУС

По видам операторской деятельности модельные эксперименты по ВКД, рассматриваемые в настоящей статье, и эксперименты по ручному управляемому спуску (РУС) при посадке ПКА на поверхность Марса [12] существенно отличаются. Первые определяют работу в СК для ВКД на поверхности Марса, когда космонавты, в основном, осуществляют «механические» действия (перемещения, ручные операции разной сложности). При их

выполнении все основные функции космонавта связаны, в основном, с его физической работоспособностью. Вторые – выполняются в спасательном (более легком) скафандре на ЦФ под действием перегрузок и предусматривают сложные управленческие функции, в том числе прогнозные расчеты по траекториям спуска, месту посадки и величине перегрузок. В экспериментах по РУС на первое место выходит когнитивная (умственная, основанная на полученных знаниях при подготовке к полетам) деятельность космонавта на фоне некоторой физической напряженности, связанной с дискомфортом размещения в скафандре в кресле спускаемого корабля, а также действием перегрузок (как правило до 4 ед). Когнитивные процессы в данном случае обеспечивают информационную обработку сведений, получаемых космонавтом с пультов управления корабля, и адекватное им управление собственно режимом РУС.

В то же время, как следует из результатов до- и послеполетных экспериментов по моделированию деятельности экипажей марсианских экспедиций, между режимами ВКД и РУС имеется определенное сходство.

В обоих случаях отмечается одинаковое негативное влияние длительного нахождения человека в космосе на качество операторской деятельности. Размах выборок  $\hat{W}(n) = \hat{X}_{(max)} - \hat{X}_{(min)}$  (разностей между наибольшими и наименьшими их элементами) всегда больше для послеполетных экспериментов, чем дополетных. Вероятность безошибочных действий космонавтов для послеполетных экспериментов всегда меньше, чем для дополетных. Разброс любых показателей, характеризующих качество деятельности космонавта (математических ожиданий  $M_{n_x}^*$ ,  $M_{L_k}^*$  параметров спуска  $n_x$  и  $L_k$ ), их средних квадратических отклонений  $\sigma_{n_x}^*$ ,  $\sigma_{L_k}^*$  [12], трудозатрат на выполнение операций ВКД  $T_i$  и циклограмм ВКД в целом  $T_{ц}$ , вероятностей успешного выполнения режимов РУС  $P_{n_x}^*$  по  $n_x$  и по параметру  $L_k - P_{L_k}^*$ , вероятности отклонений от нормы при выполнении циклограммы ВКД, ресурсов на управление виртуальным ровером и др., всегда выше в послеполетных экспериментах, чем в дополетных.

Результаты выполненных экспериментов приводят к необходимости разработки, в интересах осуществления полетов к Марсу, ряда конструкторско-технологических, медико-технических, организационно-методических и др. мероприятий. В ряде случаев такие мероприятия могут носить общий для всех видов деятельности космонавтов характер (например, защита от вредных факторов космического полета, создание эффективных способов и средств поддержания работоспособности экипажей марсианских экспедиций) и др. В других, частный – например, для обеспечения эффективных режимов РУС при посадке на Марс, необходима разработка новых подходов к созданию человеко-машинных интерфейсов, обеспечивающих максимальную гарантируемую вероятность  $P^r$  успешной посадки пилотируемого аппарата на поверхность планеты.

Способы пролонгации результатов, полученных по типовым операциям ВКД, на полную циклограмму деятельности космонавтов на поверхности Марса (с большим количеством операций и продолжительностью) будут рассмотрены отдельно.

## 5. Возможности использования полученных результатов в математических моделях

Результаты моделирования ВКД, полученные в данной работе, могут быть использованы в проектных имитационных математических моделях в интересах построения эффективных систем ВКД для работы на поверхности Марса. Основой имитационного моделирования (ИМ) является метод статистических испытаний (метод Монте Карло) [13], позволяющий за счет многократной имитации исследуемых процессов получить статистически устойчивые результаты, отражающие основные свойства ВКД. При этом для формирования исходных данных и имитации процедур ВКД нет необходимости использовать аналитические зависимости, которые, к тому же, проблематично получить из-за стохастичности процессов. Для ИМ могут быть использованы статистические функции распределения, например, длительности циклограмм ВКД  $F_{\hat{\tau}_{\text{ВКД}}}^*(\tau)$  (где  $\hat{\tau}_{\text{ВКД}}$  – случайное значение времени нахождения космонавтов в открытом космосе), показатели ВКД, представляемые в векторной форме, например, длительность  $i$ -й операции ВКД для любой  $j$ -й циклограммы  $\langle \hat{t}_{i1}, \hat{t}_{i2} \dots \hat{t}_{ij} \rangle$ , вероятностные данные с учетом отклонений от нормы, типа  $P_{\text{ц}}^*$ ,  $Q_{\text{ц}}^*$  и др. Способы построения гистограмм, функций распределения и их теоретического описания для ВКД по результатам работы экипажей МКС представлены нами в [14]. В частности, показано, что для описания  $\hat{\tau}_{\text{ВКД}}$  может быть использовано двухпараметрическое распределение Вейбулла  $F_{\hat{\tau}_{\text{ВКД}}}^*(\tau) = (1 - e^{-\frac{\tau}{\lambda}})^k$ , где  $\lambda$  – коэффициент масштаба ( $\lambda \approx 1$ ), а  $k > 1$  – коэффициент формы. За счет подбора коэффициентов  $\lambda$  и  $k$  данное распределение может быть адаптировано к задачам ВКД на Марсе.

Блок-схема имитационной модели исследования эффективности (задача анализа) ВКД на поверхности Марса включает следующие основные блоки:

I – ввода исходных данных (численность экипажа, длительность полета от Земли до Марса, число выходов на поверхность Марса и др.);

II – блок надежности системы «человек–комплекс ВКД» (характеристики надежности, типы и частота отклонений от нормы при проведении ВКД, характеристики уровней подготовленности экипажей и др.);

III – блок формирования комплекса ВКД (варианты структурного состава и технических характеристик, включая СК, СШО, транспортные средства, полезную нагрузку, вспомогательное оборудование);

IV – блок оценивания эффективности и качества ВКД (оцениваются выбранные показатели эффективности и качества ВКД, выполняются расчет и оценка критических состояний в интересах анализа безопасности ВКД);

V – блок управления (упорядочивания расчетов по разработанным алгоритмам, сбор и обработка результатов ИМ с формированием выходных показателей).

При решении задачи оптимизации ВКД возможны два варианта:

1) в дополнение к рассмотренным блокам в модель встраивается блок оптимизации, который реализует соответствующий алгоритм оптимизации проектных характеристик ВКД;

2) задача оптимизации ВКД решается методом «перебора вариантов» при анализе ВКД (по рассмотренной выше блок-схеме).

## Выводы

Разработана технология исследования качества работы космонавтов по выполнению ВКД в интересах перспективных полетов на Марс, включающая метод полунатурного моделирования, средства и способы обеспечения условий деятельности космонавтов, близкие к марсианским, систему показателей качества деятельности космонавтов.

Получены новые знания и экспериментальные результаты, содержащие сведения о работоспособности космонавтов по выполнению ВКД в моделируемых экстремальных условиях на поверхности Марса после длительных полетов на МКС, которые рассматриваются как аналог полета на Марс.

Полученные результаты могут быть использованы в предпроектных и проектных исследованиях по ВКД на Марсе, в частности при формировании циклограмм работы космонавтов на поверхности планеты, разработке методов и средств подготовки космонавтов и обучению человека жизнедеятельности в чужом мире. Экспериментальные данные могут быть использованы в имитационных математических моделях, создаваемых для решения задач анализа и синтеза эффективных операций ВКД в интересах будущих пилотируемых миссий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] К первым итогам международного мегапроекта «Марс-500» / Григорьев А.И., Ушаков И.Б., Моруков Б.В. // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1(3). – С. 5–14.
- [2] Шибанов Г.П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека. – М.: Машиностроение, 2007. – 544 с.
- [3] Пилотируемые полеты к Марсу: перспективы и результаты моделирования с участием экипажей МКС / Крикалев С.К., Крючков Б.И., Курицын А.А., Харламов М.М. // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. Казань, Дайтона бич. – 2014. – № 1(38). – Т. 9. – С. 1–21.
- [4] Ярополов В.И. Анализ особенностей марсианской экспедиции и разработка предложений по обеспечению безопасности экипажа при выполнении миссий к Марсу // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 2(7). – С. 43–71.
- [5] Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. – Ч. 1. – МО СССР, 1989. – 660 с.



- [6] Fitts R.H., Colloton P.A. et al. Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles // *Appl. Physiol.* – 2013. – V. 115. – pp. 667–679.
- [7] Фомина Е.В., Кукоба Т.Б. Восстановление силы мышц ног космонавта после длительного космического полета с использованием силового тренажера для частичной компенсации гравитационной нагрузки // *Аэрокосмическая и экологическая медицина.* – 2019. – Т. 53. – № 5. – С. 11–15.
- [8] Kharlamov M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Kukova T.B., Bubeev Y.A., Fomina E.V. ISS – the prediction platform for exploration missions EVA performance // *Aerospace and Environmental Medicine.* – 2021. – V. 55. No 1/1 special issue. – p. 53.
- [9] Предварительные результаты измерения поглощенных доз по данным системы радиационного контроля российского сегмента Международной космической станции / Лягушин В.И., Волков А.Н., Александрин А.П. и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.* – 2002. – Вып. 4. – С. 22–25.
- [10] Митрикас В.Г. Оценка эффективных доз ионизирующей радиации у экипажей Международной космической станции методом расчетного моделирования // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* – 2015. – Т. 49. – № 3. – С. 5–11.
- [11] Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А.С. Коротева. – М.: РАКЦ им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.
- [12] Крючков Б.И., Кондратьев А.С. Статистическое описание экспериментов по моделированию профессиональной деятельности космонавтов до и после полетов на МКС // *Пилотируемые полеты в космос.* – 2021. – № 2(39). – С. 60–77.
- [13] Тищенко А.А., Ярополов В.И. Моделирование при обеспечении безопасности космических полетов. – М.: Машиностроение, 1981. – 189 с.
- [14] Анализ основных результатов внекорабельной деятельности экипажей МКС / Крючков Б.И., Алтунин А.А., Долгов П.П., Ярополов В.И., Усов В.М., Иродов Е.Ю., Верба Д.И., Коренной В.С. // *Пилотируемые полеты в космос.* – 2017. – № 1(22). – С. 56–67.
- [15] Ярополов В.И. Использование МКС для отработки вопросов обеспечения безопасности полета на Марс // *Пилотируемые полеты в космос.* – 2011. – № 1(1). – С. 143–151.
- [16] Результаты исследований ГК НПЦ имени М.В. Хруничева по концептуальным положениям реализации планетных миссий / Кузин А.И., Лозин С.Н., Нестеренко А.А., Юрьев В.Ю., Власенко В.Г., Соболев И.А., Морозов Д.В. // *Пилотируемые полеты в космос.* – 2011. – № 1(1). – С. 38–54.
- [17] Kharlamov M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Dolgov P.P. Tasks of professional activity of cosmonauts on the moon and in deep space: working out methods and technologies // *IAC GLEX-21, 2021, GLEX-2021,7,4,3,x62705.*

## REFERENCES

- [1] The First Results of the Mars-500 International Mega Experiment / Grigoriev A.I., Ushakov I.B., Morukov B.V. // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”.* – 2012. – No 1(3). – pp. 5–14.
- [2] Shibanov G.P. *Space Habitability and Human Safety in Space.* – Moscow: Mashno-stroenie Publ., 2007. – p. 544.
- [3] *Manned Flights to Mars: Prospects and Results of Flight Simulation With the Participation of the ISS Crews / Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A., Kharla-*

- mov M.M. // Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems: Processes, Models, Experiment: Russian-American Scientific Journal: Kazan, Daytona Beach. – 2014. – No 1(38). – Vol. 9. – pp. 1–21.
- [4] Yaropolov V.I. Analysis of Features of Martian Expedition and Development of Proposals for Ensuring Crew Safety During Missions to Mars // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2013. – No 2(7). – pp. 43–71.
- [5] Petukhov G.B. Theoretic Framework of the Efficiency of Purposeful Processes. – Part 1. – Ministry of Defense of the USSR, 1989. – p. 660.
- [6] Fitts R.H., Colloton P.A. et al. Effects of Prolonged Space Flight on Human Skeletal Muscle Enzyme and Substrate Profiles // Appl. Physiol. – 2013. – V. 115. – pp. 667–679.
- [7] Fomina E.V., Kukoba T.B. Recovery of Cosmonaut’s Leg Muscles Strength After Extended Mission With the Use of Strength Training Equipment for Partial Compensation of the Gravitational Unloading. // journal of Aerospace and Environmental Medicine. – 2019. – Vol. 53. – No 5. – pp. 11–15.
- [8] Kharlamov M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Kukova T.B., Bubeev Y.A., Fomina E.V. ISS – the Prediction Platform for Exploration Missions EVA Performance // journal of Aerospace and Environmental Medicine. – 2021. – Vol. 55. – No 1/1 special issue. – p. 53.
- [9] Preliminary Results of Measurements of Absorbed Doses According to the Radiation Monitoring System of the Russian Segment of the International Space Station / Lyagushin V.I., Volkov A.N., Alexandrin A.P. et al. // Scientific-technical journal “Questions of Atomic Science and Technics. Series: Physics of Radiation Effects on Radio-Electronic Equipment”. – 2002. – Issue 4. – pp. 22–25.
- [10] Mitrikas V.G. Estimation of Ionizing Radiation Effective Doses in the International Space Station Crews by the Method of Calculation Modeling // journal of Aerospace and Environmental Medicine. – 2015. – Vol. 49. – No 3. – pp. 5–11.
- [11] Manned Expedition to Mars / Edited by A.S. Koroteev. – Moscow: Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, 2006. – p. 320.
- [12] Kryuchkov B.I., Kondratyev A.S. Statistical Description of Experiments on the Simulation of Cosmonauts’ Professional Activity Before and After Space Missions on the ISS // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2021. – No 2(39). – pp. 60–77.
- [13] Tishchenko A.A., Yaropolov V.I. Modeling and Ensuring the Safety of Space Flights. – Moscow: Mashnostroenie Publ., 1981. – p. 189.
- [14] Main Results of EVA Performed by the ISS Crews / Kryuchkov B.I., Altunin A.A., Dolgov P.P., Yaropolov V.I., Usov V.M., Irodov E.Yu., Verba D.I., Korennoy V.S. // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2017. – No 1(22). – pp. 56–67.
- [15] Yaropolov V.I. Use of the International Space Station for Tackling Safety Issues of Spaceflight to Mars // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2011. – No 1(1). – pp. 143–151.
- [16] Results of Studies of Conceptual Propositions for the Implementation of Missions to the Other Planets, Carried out by M.V. Khrunichev State Research and Production Space Center / Kuzin A.I., Lozin S.N., Nesterenko A.A., Yuriev V.Yu., Vlasenko V.G., Sobolev I.A., Morozov D.V. // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2011. – No 1(1). – pp. 38–54.
- [17] Kharlamov M.M., Kryuchkov B.I., Usov V.M., Dolgov P.P. Tasks of Professional Activity of Cosmonauts on the Moon and in Deep Space: Working out Methods and Technologies // IAC GLEX-21, 2021, GLEX-2021,7,4,3,x62705.