

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.788

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖЕЙ НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПИЛОТИРУЕМЫМ МИССИЯМ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТ

Б.И. Крючков, И.Н. Куликов

Докт. техн. наук Б.И. Крючков; канд. воен. наук И.Н. Куликов
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматривается полетная деятельность экипажей Международной космической станции (МКС) применительно к полетам человека в окололунное пространство, на Луну и Марс. Оцениваются аналогии деятельности космонавтов на борту МКС и будущих космических комплексов, предназначенных для функционирования за пределами околоземных орбит. Представлены функции распределения длительности пилотируемых экспедиций на МКС, дается сравнительный анализ продолжительности полетов экипажей МКС и межпланетных комплексов. Аналогии деятельности экипажей МКС и экипажей пилотируемых космических комплексов (ПКК), работающих за пределами околоземных орбит, рассматриваются на основе оценивания существенных свойств, характеризующих эту деятельность с использованием методов теории подобия и компонентного анализа.

Ключевые слова: экипаж, миссия на Марс, лунная база, Международная космическая станция, межпланетный орбитальный комплекс, объект – аналог, проектируемый объект, полетная деятельность экипажей, схожесть, подобие, факторы и условия космического полета

On the Activities of Crews Aboard the ISS in Relation to Manned Missions Beyond Near-Earth Orbits. B.I. Kryuchkov, I.N. Kulikov

The paper examines the flight activities of the crews of the International Space Station (ISS) in relation to human flights to the circumlunar space, to the Moon and Mars. The analogies of the activities of cosmonauts aboard the ISS and future space complexes designed to operate beyond near-Earth orbits are evaluated. The functions of the distribution of the duration of manned expeditions to the ISS are presented, and a comparative analysis of the duration of flights of the ISS crews and interplanetary complexes is given. The analogies of the activities of the ISS crews and the MSC crews operating outside near-Earth orbits are considered on

the basis of an assessment of the essential properties characterizing this activity using methods of similarity theory and component analysis.

Keywords: crew, mission to Mars, lunar base, International Space Station, interplanetary orbital complex, analog object, projected object, flight activity of crews, similarity, likeness, factors and conditions of space flight

При формировании научно-технических заделов по перспективным ПКК разработчики космической техники опираются на имеющийся опыт, приобретенный при полетах человека на околоземных орбитах. Наилучшие достижения в сфере мировой пилотируемой космонавтики в настоящее время воплощены в МКС, ставшей самым крупномасштабным пилотируемым комплексом в истории человечества. В интересах будущих полетов в дальний космос на МКС уже отрабатывается целый ряд технических систем, агрегатов, приборов, в том числе средств жизнеобеспечения (СЖО), робототехники, навигации, управления, связи, терморегулирования, двигательных установок и др. Исследуются задачи медико-биологического обеспечения экипажей ПКК в экстремальных условиях космоса. Выполняется большая программа научных исследований и экспериментов по многим актуальным направлениям.

МКС может служить моделью для создания не только перспективных орбитальных околоземных комплексов, но и будущих ПКК, предназначенных для полетов на Луну и в дальний космос. В рамках проекта МКС кроме отработки разнообразных технических средств представляет интерес отработка технологий деятельности космонавтов, поскольку экипажи станции в конечном итоге являются ключевым звеном, обеспечивающим достижение целей ПКК.

Постановка задачи

Требуется оценить, в какой мере деятельность экипажей МКС может рассматриваться аналогичной деятельности космонавтов перспективных ПКК, функционирующих за пределами околоземных орбит. К таким ПКК могут быть отнесены лунные орбитальные станции (ЛОС), лунные базы (ЛБ), межпланетные орбитальные комплексы (МОК).

Используя термин «аналогия» в отношении полетной деятельности космонавтов, примем во внимание, что с точки зрения семантики он является синонимом таких слов как «подобие», «сходство», «схожесть», «одинаковость».

Для удобства рассмотрения задачи в целях данного исследования введем понятия «объект-аналог» и «проектируемый объект». В частности, под «объектом-аналогом» будем понимать МКС, на которой отрабатываются технологии будущих полетов в космос. Под «проектируемым объектом» – перспективный ПКК, функционирующий за пределами околоземных орбит – ЛОС, ЛБ, МОК и др. Схематично взаимосвязи МКС как «объекта-аналога» (обозначим «М»), «проектируемого объекта» (обозначим «О») и процессов полетной деятельности их экипажей показаны на рис. 1.

Необходимо определить основные свойства, характеризующие процессы деятельности экипажей объектов «М» и «О», возможность и способы оценивания этих свойств, установить и оценить показатели аналогичности (подобия, одинаковости и т. д.) процессов деятельности экипажей и граничные условия их применения.



Рис. 1. Взаимосвязи «объекта-аналога» и «проектируемого объекта» (на примере МОК для полета на Марс)

Факторы, влияющие на деятельность экипажей ПКК на околоземных орбитах и за их пределами

Укрупненно все факторы, влияющие на деятельность экипажа любого ПКК, можно разделить на две группы. К первой относятся неблагоприятные факторы космического полета, ко второй – факторы, определяемые конструктивно-технологическими особенностями конкретного космического комплекса, программой его полета, задачами и квалификацией экипажей (рис. 2).

Исследованию, собственно, факторов экстремальной среды обитания и их влияния на здоровье и работоспособность космонавтов посвящено достаточно много работ [1, 2, 4, 6, 20 и др.]. В работах [3, 17] убедительно показано, что условия профессиональной деятельности человека существенно влияют на надежность оператора.

Качество деятельности космонавтов в связи с влиянием факторов второй группы также изучалось рядом авторов [18, 21, 23 и др.]. Наибольшее число исследований, естественно, посвящено оцениванию орбитальных околоземных полетов.

В полетах ПКК за пределами земных орбит негативное влияние многих известных факторов космического полета (например, радиации) будет усиливаться, они станут более опасными для человека. Так в источнике [2] радиация причисляется к главным барьерам для проникновения человека в дальний космос. Автором предлагается новый комплексный подход к выбору средств и способов защиты экипажей, в том числе отбор космонавтов с учетом их радиационной устойчивости.

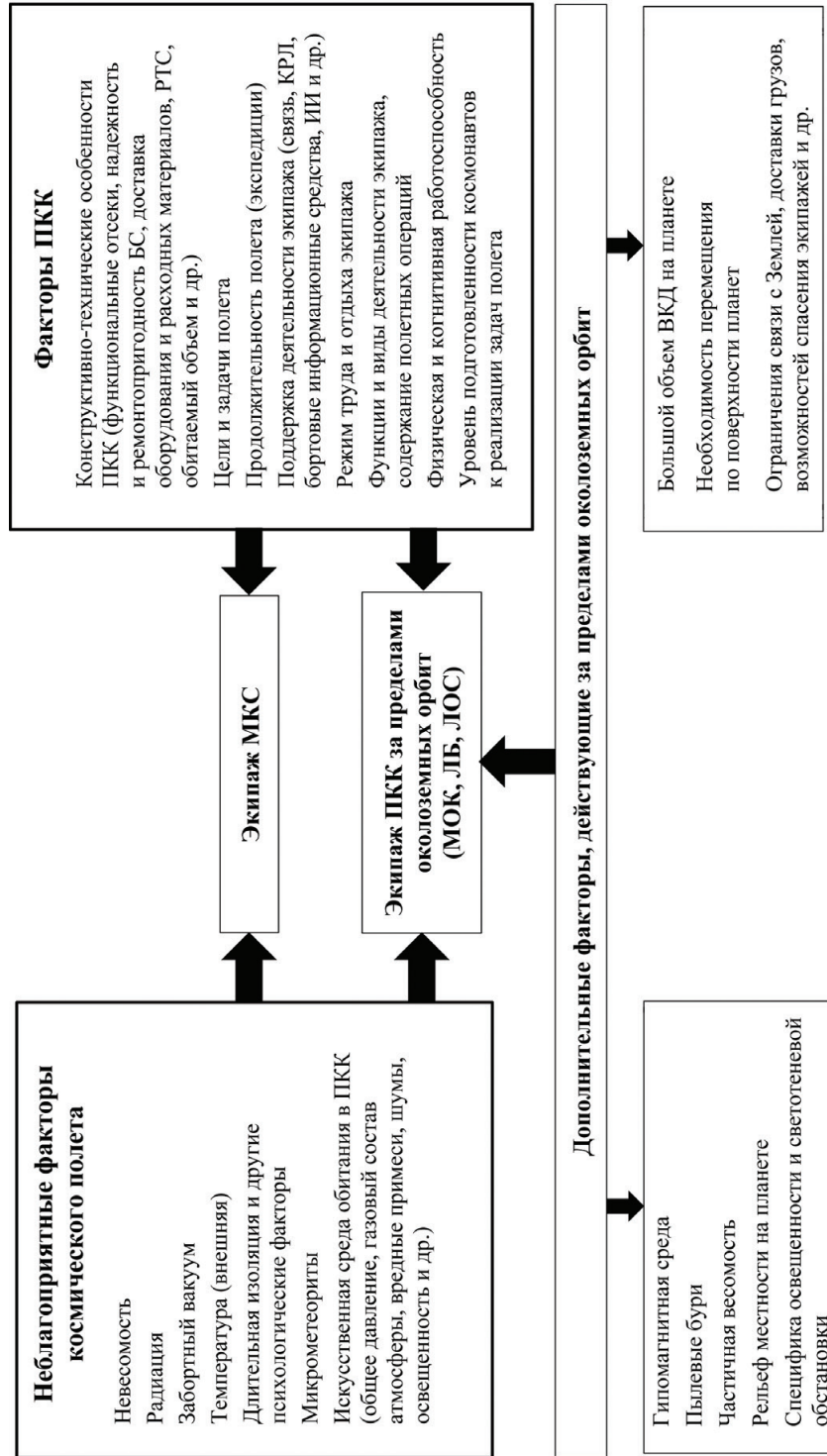


Рис. 2. Факторы, влияющие на деятельность экипажей МКС и ПКК за пределами околоземных орбит

Кроме того, при полетах за пределами околоземных орбит появятся новые негативные факторы, связанные с отсутствием защитного влияния земной атмосферы или особенностями планетных условий (например, гипомагнитная среда, планетная пыль и др.) [1, 9, 20].

Факторы влияния ПКК и программные факторы за пределами околоземных орбит также претерпевают изменения. Они в первую очередь связаны с использованием новых функциональных модулей, типов служебного и целевого оборудования, а также со спецификой деятельности экипажей на поверхности планет.

Количественные оценки влияния экстремальных факторов полета на некоторые виды деятельности космонавтов приведены в работах [6, 18, 21, 23].

Деятельность экипажей ПКК как целенаправленный процесс

Для достижения целей ПКК космонавты в рамках своей профессиональной полетной деятельности выполняют в определенной последовательности ряд задач и операций, предусмотренных программой миссии. Полетная деятельность экипажей ПКК, в том числе и МКС, достаточно разнообразна по функциям, видам и типам операций, их сложности и продолжительности. Ее качество определяется приспособленностью ПКК к выполнению поставленных целей, степенью поддержки экипажей Землей, физической и когнитивной работоспособностью космонавтов на разных этапах космического полета и уровнем их подготовленности.

Изучению полетной деятельности космонавтов на современных ПКК посвящен целый ряд теоретических и экспериментальных исследований [5, 6, 13, 16, 18, 23]. С этой же целью на МКС в настоящее время выполняется программа космических экспериментов и целевых работ по направлению «Человек в космосе».

Любой процесс полетной деятельности экипажей ПКК обладает рядом (множеством) свойств, определяющих его качество. Для каждого из таких свойств существуют свои частные показатели качества. Их совокупность определяет показатель качества процесса деятельности экипажей ПКК в целом. С учетом того, что между отдельными свойствами процессов могут существовать связи, показатель качества лучше всего представлять в векторной форме [7]. Запишем его в виде n -мерного вектора:

$$Y_{\langle n \rangle} = [y_1, y_2 \dots y_n] \quad [i = 1(1) n], \quad (1)$$

где $[i = 1(1) n]$ – последовательность значений целочисленной переменной с шагом i , число единичных показателей всех n -свойств.

Исследование подобных показателей приводит к необходимости многофакторного анализа, что усложняет задачу и затрудняет интерпретацию

получаемых результатов. Для ее решения целесообразно применить компонентный анализ, позволяющий перейти к меньшему числу наиболее существенных свойств за счет выявления главных компонент. Если их число m , причем $m < n$, то аналогично (1) показатель качества деятельности экипажа будет:

$$Y_{\langle m \rangle} = [y_1, y_2 \dots y_m], \quad (2)$$

где $[i = 1(1) m]$ – число единичных показателей только существенных свойств.

Поскольку все свойства должны находиться в установленных допустимых пределах, то [7]

$$Y_{\langle m \rangle} \in \{Y_{\langle m \rangle}^{\Delta}\}, \quad (3)$$

где $Y_{\langle m \rangle}^{\Delta}$ – вектор допустимых значений показателя.

Критерий пригодности G процесса полетной деятельности экипажа ПКК будет:

$$G: \bigcap_{i=1}^m (Y_{\langle m \rangle} \in \{Y_{\langle m \rangle}^{\Delta}\}), \quad (4)$$

где \cap – знак булева пересечения (пересечения множеств, «произведения» событий).

Для объекта «М» запишем:

$$G^M: \bigcap_{i=1}^m (Y_{\langle m \rangle}^M \in \{Y_{\langle m \rangle}^{M\Delta}\}), \quad (5)$$

для объекта «О»:

$$G^O: \bigcap_{i=1}^m (Y_{\langle m \rangle}^O \in \{Y_{\langle m \rangle}^{O\Delta}\}). \quad (6)$$

Для того чтобы процессы полетной деятельности экипажей объектов «М» и «О» были одинаковыми (аналогичными, подобными), должно соблюдаться условие:

$$\bigcap_{i=1}^m \{Y_{\langle m \rangle}^M = Y_{\langle m \rangle}^O\}. \quad (7)$$

Для использования зависимостей (1) – (7) на практике, необходимо выделить m -существенных свойств исследуемого процесса.

Анализ опыта полетов ПКК, нормативно-технической (в части организации полетной деятельности экипажей) и бортовой документации

космонавтов, перспективных проектов по осуществлению пилотируемых миссий показывает, что к существенным свойствам, определяющим качество процессов деятельности космонавтов как для околоземных ПКК, так и для комплексов, функционирующих за пределами околоземных орбит, можно отнести [8, 10, 11, 12, 14, 15]:

- К-свойства, характеризующие конструктивно-технологические особенности ПКК (конфигурация, размеры модулей, объемы обитаемых отсеков, базовые элементы конструкции, надежность бортовых систем и др.);

- У-свойства, характеризующие условия деятельности экипажей в обитаемых отсеках (среда обитания, формируемая комплексом СЖО; средства поддержания здоровья и работоспособности космонавтов и др.);

- Т-свойства, характеризующие продолжительность пилотируемой миссии (кратковременная, длительная, сверхдлительная);

- С-свойства, характеризующие структуру деятельности экипажа (режим труда и отдыха, функции экипажа, типы выполняемых операций по технической эксплуатации ПКК и научным исследованиям);

- Ф-свойства, характеризующие влияние внешних факторов экстремальной среды (на трассах перелета, на поверхности планеты, в том числе при внекорабельной деятельности);

- Р-свойства, характеризующие качество подготовки космонавтов (уровень подготовленности, профессиональные компетенции, опыт полетов);

- И-свойства, характеризующие информационное обеспечение полетной деятельности экипажа (взаимодействие с центром управления полетом (ЦУП), бортовые информационные средства, искусственный интеллект).

Тогда исследуемый процесс можно представить в виде конечного множества:

$$N_m = \{a_k, a_y, a_t, a_c, a_\phi, a_p, a_i\} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}, \quad (8)$$

где m его элементов a_k, a_y, \dots, a_i определяются свойствами «К», «У», «Т», «С», «Ф», «Р», «И», причем $[m = 1(1)7]$.

С учетом этого формула (7) примет вид:

$$\bigcap_{i=1}^7 \{Y^{M_{\langle 7 \rangle}} = Y_{\langle 7 \rangle}^0\}. \quad (9)$$

О конфигурации ПКК, геометрическом подобии и объемах обитаемых отсеков

Одним из самых наглядных примеров подобия «объекта-аналога» и объекта для полета за пределы околоземных орбит является проект РКК «Энергия» по организации пилотируемой миссии по облету Луны с использованием пилотируемого космического аппарата (ПКА) «Союз». В данном случае,

с конструктивно-технологической точки зрения, можно говорить не только о подобии, а даже о тождестве обоих объектов (К-свойства). Условия пребывания в отсеках ПКА одинаковы, поскольку формируются подобными СЖО (У-свойства). Длительности полетов сопоставимы (Т-свойства). Структура деятельности космонавтов (С-свойства) в обеих программах на «Союзах» схожа (управление центром масс ПКА, вокруг центра масс, бортовыми системами корабля, выполнение научной программы полета). Отличия в некоторых типах динамических операций не искажают их аналогии в околоземных и окололунных полетах (например, включение двигателя корабля на орбите Земли и на орбите Луны, даже на ее обратной стороне).

Влияние внешних факторов также схоже, за исключением влияния радиации (Ф-свойства). Физическая сущность ее негативного действия на космонавтов будет такой же, как в околоземных миссиях [4]. Отличие будет лишь в количественном воздействии, которое можно охарактеризовать в первом приближении некоторым постоянным множителем. В таком случае данное физическое явление можно считать подобным для обоих объектов [22]. Уровень подготовки космонавтов (Р-свойства) для обоих проектов можно принять аналогичным, поскольку в обоих случаях он определяется требованиями гарантированной подготовленности экипажей. Информационное обеспечение полетов (И-свойства) реализуется схожими средствами и способами, что определяется конструктивно-технологическими характеристиками ПКА и распределением функций между бортовой автоматикой, экипажем и ЦУПом, а они остаются аналогичными. Задержки связи незначительны.

При геометрическом и конструктивно-технологическом подобии объектов, их бортовых систем и способов управления ими можно утверждать, что и процессы деятельности экипажей на ПКА типа «Союз» в обеих программах относятся к одному классу явлений [22], качественно одинаковы и будут подобны.

Согласно П-теореме [22] для объектов «О» и «М» можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \Pi^O &= \Phi (\Pi_K^O, \Pi_Y^O, \Pi_T^O, \Pi_C^O, \Pi_\Phi^O, \Pi_P^O, \Pi_I^O) \\ \Pi^M &= \Phi (\Pi_K^M, \Pi_Y^M, \Pi_T^M, \Pi_C^M, \Pi_\Phi^M, \Pi_P^M, \Pi_I^M) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где – Π^O, Π^M – критерии подобия объектов «О» и «М»;

$\Pi_K^O, \Pi_Y^O \dots \Pi_I^M$ – частные критерии их существенных свойств.

По определению подобных явлений [22] $\Pi_K^O = \Pi_K^M, \Pi_Y^O = \Pi_Y^M, \Pi_T^O = \Pi_T^M$ и т. д. Тогда

$$\Pi^O = \Pi^M \quad (11)$$

$$\text{и } \Pi = \Phi (\Pi_K^O, \Pi_Y^O, \Pi_T^O, \Pi_C^O, \Pi_\Phi^O, \Pi_P^O, \Pi_I^O) = \Phi (\Pi_K^M, \Pi_Y^M, \Pi_T^M, \Pi_C^M, \Pi_\Phi^M, \Pi_P^M, \Pi_I^M). \quad (12)$$

В данном случае все существенные свойства процессов полетной деятельности экипажей обоих объектов подобны.

Сопоставление ПКА «Союз» с проектами советских кораблей типа Л-1 и Л-3, предназначенны, соответственно, для облета Луны и посадки на ее поверхность, также показывает их подобие, поскольку все они создавались на общих конструктивно-технологических принципах и тех же технологиях. Условия обитания экипажей тоже были одинаковыми, они обеспечивались теми же комплексами систем обеспечения жизнедеятельности (КСОЖ), в подобных по геометрии и обитаемым объемам отсеках и др.

Таким же образом можно показать и аналогию (подобие) процессов деятельности экипажей ПКА типа «Аполлон», используемых для доставки астронавтов на орбитальную станцию «Скайлэб» и для облета Луны (проект «Аполлон-8»). Структура деятельности астронавтов в программе «Аполлон» рассмотрена в нашей работе [18].

Далее оценим длительно функционирующие объекты и полетную деятельность их экипажей. В качестве «объекта-аналога» рассмотрим МКС, а «проектируемых объектов» – МОК и ЛБ.

Многие частные критерии подобия, такие как конфигурация, модульная схема построения, способы соединения модулей через переходные отсеки, наличие люков-лазов между ними, стыковочных узлов, функциональное предназначение модулей (жилой, рабочий, складской, шлюзовой и др.), способы компоновки оборудования, состав бортовых систем, СЖО экипажей, среда обитания в целом и другие, одинаковы или достаточно близки для существующих и перспективных проектов. Их сходство в силу преемственности технологий создания, отмечается как в отечественных [8, 16, 19], так и в зарубежных разработках [10, 11].

Авторы одной из фундаментальных работ по технологиям освоения человеком Луны, в частности, сформулировали следующую концепцию создания ЛБ [16, стр. 275]: «Обитаемую базу целесообразно строить с использованием опыта создания... станций «Мир» и МКС... Отсеки, части, элементы систем базы могут быть *аналогичны* (курсив наш. – Авт.) и, по возможности, унифицированы с отсеками, частями и элементами жилых модулей и отсеков в составе МКС». Таким образом, в данной концепции уже заложено конструктивно-технологическое подобие «объекта-аналога» – МКС и «проектируемого объекта» – ЛБ, что в значительной мере определяет процессы полетной деятельности их экипажей.

Такой же подход можно распространить и на марсианский комплекс МОК. Сравнение облика и конфигурации МКС с проектом МОК, предложенным в работе [14], дает наглядное представление об аналогиях в их разработке (рис. 3).

Для оценивания «жизненного пространства» экипажа внутри отсеков ПКК можно использовать в виде комплекс-критерия подобия величину $P_v = \frac{V_{ПКК}}{N_{ЭК}}$ (м³/чел.), определяющую внутренний «свободный» объем обитаемых модулей ПКК в расчете на одного космонавта. Этот критерий является универсальным, поскольку он пригоден для оценивания ПКК, имеющих

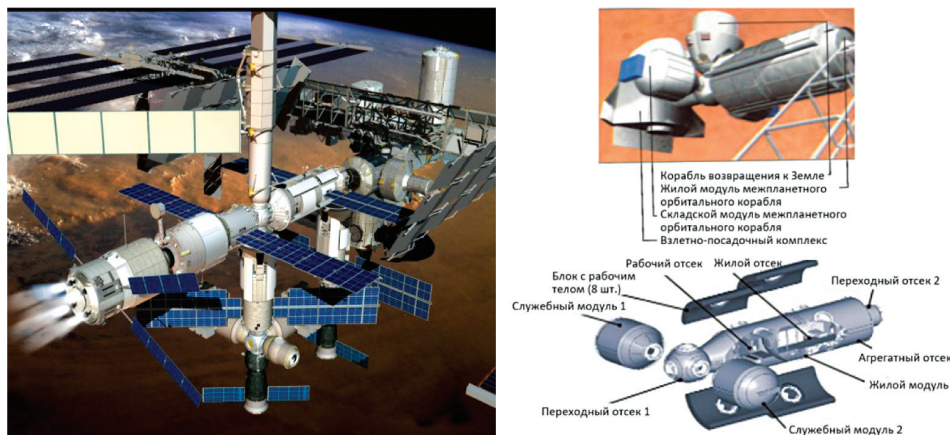


Рис. 3. Варианты облика и конфигурации МКС (слева) и МОК

обитаемые модули любой формы – цилиндрической, купольной или комбинированной. Знание этого критерия весьма важно, поскольку он в значительной мере определяет условия деятельности экипажей в обитаемых отсеках.

В рамках проекта МКС в зависимости от этапов сборки комплекса складывались разные условия пребывания в нем космонавтов. На начальном этапе функционирования МКС объем герметичных модулей ФГБ, СМ и Node-1 был равен 250 м^3 , что в пересчете на свободный объем (фактический объем жилого и рабочего пространства для экипажа) составляет $176,6 \text{ м}^3$ и при $N_{\text{ЭК}} = 3$ дает значение критерия подобия $P_{\text{в}}^{\text{М}} = 59,5 \text{ м}^3/\text{чел.}$

В ряде работ [8, 9, 13] при рассмотрении орбитальных и планетных комплексов объемы обитаемых отсеков рассчитываются исходя из их внешних геометрических размеров. При этом не учитывается, что некоторое пространство этих отсеков занято различным служебным и научным оборудованием. На самом деле свободные объемы для экипажа будут меньше рассчитанных по внешним параметрам. Их можно оценить с помощью соответствующих поправочных коэффициентов. Так, для МКС в целом и РС МКС в частности, этот коэффициент равен 1,38.

Для сравнения приведем соответствующие поправочные коэффициенты для трех типов ЛБ, рассмотренных в работе [9]: 1,29; 1,26 и 1,24.

На 2024 год объем герметичных отсеков МКС составлял 535 м^3 , РС МКС – 265 м^3 , а их свободный объем – 388 и 192 м^3 , соответственно. При $N_{\text{ЭК}} = 3, 5, 7$ чел., критерии подобия для МКС в целом будут $P_{\text{в}}^{\text{М}} = 129,3; 77,6$ и $55,4 \text{ м}^3/\text{чел.}$ Для РС МКС при $N_{\text{ЭК}} = 2$ и 3 чел. они принимают значения $P_{\text{в}}^{\text{М}} = 96,0$ и $64,0 \text{ м}^3/\text{чел.}$, соответственно.

Оценим данные по $P_{\text{в}}^{\text{О}}$ для ЛБ, проект которой представлен в работе [16]. Данная ЛБ рассматривается как длительно функционирующая (до 15 лет). В зависимости от этапов развития в ее архитектуре может быть разное количество модулей (от 3 до 12) при составе экипажа от 3 до 20 чел.

При общем гермообъеме от 120 до 350 м³ свободный объем жилого пространства будет составлять от 90 до 254 м³. Тогда при $N_{\text{эк}} = 3$ (1-й этап) $P_{\text{в}}^{\text{о}} = 30,0$ м³/чел., а при $N_{\text{эк}} = 4, 5, 6$ (2-й этап) $P_{\text{в}}^{\text{о}} = 63,5; 50,8; 42,3$ м³/чел., соответственно.

В российском проекте пилотируемой экспедиции на Марс [8, стр. 86] предлагается минимальный обитаемый объем МОК, равный 180 м³, что при экипаже 5–6 чел. обеспечивает $P_{\text{в}}^{\text{о}}$ в диапазоне 30–36 м³/чел. Можно допустить, что такой критерий будет приемлемым в случае полета на Марс и обратно по «коротким» схемам на МОК с мощными энергоустановками при кратковременном пребывании экипажа на планете [14, 19].

Концепция марсианского корабля Starship Илона Маска предусматривает организацию пилотируемых миссий в составе 20, 40, 64 и 100 чел. [24, 25]. По планам его создателей первый пилотируемый полет должен состояться в 2033 г. Можно ожидать, что в первых экспедициях численный состав экипажа не превысит 20–40 чел. При объеме обитаемого отсека второй ступени Starship, где будет размещаться экипаж, равном от 850 до 1000 м³, внутренний объем в расчете на одного человека составит: при экипаже 20 чел. – от 43 до 50 м³, при экипаже 40 чел. – от 22 до 25 м³. Для обеих концепций $P_{\text{в}}^{\text{о}}$ будет в пределах 22–50 м³/чел., что близко к показателям рассмотренных выше объектов. Наиболее трудные условия пребывания экипажа будут в корабле Starship при численности в 100 чел. и свободном объеме обитаемого отсека 850 м³. В этом случае критерий $P_{\text{в}}^{\text{о}}$ составит величину всего 8,5 м³/чел. Можно отметить, что, с одной стороны, при сравнении, например, с требованиями отечественного ГОСТ Р 50804–95 (п. 7.2.12.2) при $P_{\text{в}}^{\text{о}} = 8,5$ м³/чел. > 6,8 м³/чел. здесь нет противоречий. С другой стороны, в мировой пилотируемой космонавтике нет каких-либо подтверждений безопасного многомесячного пребывания человека в столь малых обитаемых отсеках [8, 9, 11, 13].

В соответствии с общепринятой практикой при компоновке Starship предусмотрено его деление на функциональные зоны (рис. 4). Размещение этих зон в цилиндрическом герметичном корпусе корабля схоже с компоновкой жилых и рабочих зон орбитальной станции «Скайлэб» и других объектов.

В наземных условиях одним из прототипов полета экипажа на Марс в части функционирования системы «человек – искусственная среда обитания» может служить изоляционный медико-физиологический эксперимент «Марс-500» [5]. При его осуществлении продолжительность непрерывного нахождения экипажа из 6 чел. в экспериментальном комплексе, включающем четыре герметичных модуля общим объемом 550 м³, составила 520 сут (1,4 года). При этом критерий $P_{\text{в}}^{\text{м}}$ с учетом занятости отсеков оборудованием имел величину 63 м³/чел.

Полученные значения $P_{\text{в}}$ для различных проектов ПКК можно представить в виде скалярных выборок модели $Y_n^{\text{м}}$ и объекта $Y_m^{\text{о}}$, т. е. соответствующих множеств $M_{<n>}^{\text{м}}$ и $M_{<m>}^{\text{о}}$. Из приведенных выше данных по

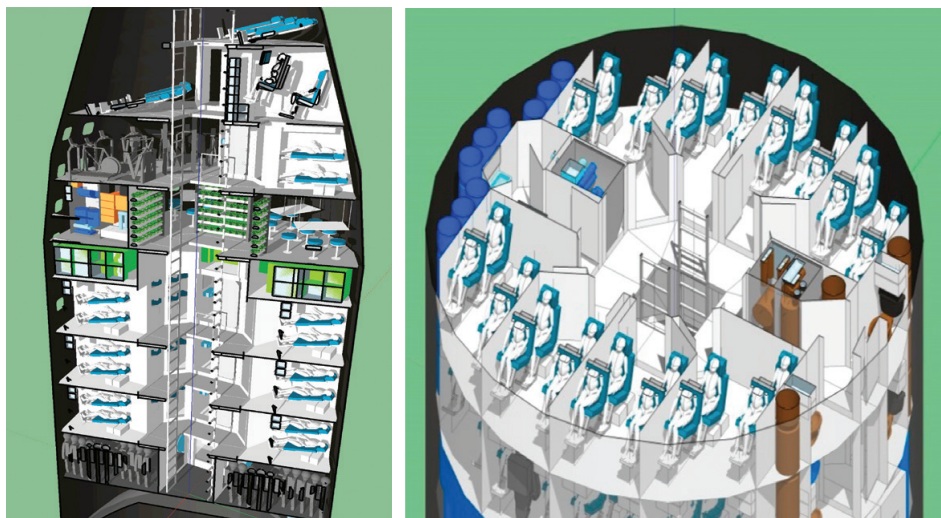


Рис. 4. Концепция 100-местного межпланетного корабля Starship Илона Маска

величинам P_v для МКС, с одной стороны, и ЛБ и МОК, с другой, – видно, что некоторые элементы одной выборки (модели) попадают в интервал числовой оси других выборок (объектов) и наоборот. Таким образом, рассматриваемые множества имеют общие элементы, а значит, расстояние между ними равно нулю. Данное обстоятельство говорит о подобию рассматриваемых частных критериев объектов «М» и «О».

Можно выполнить похожую оценку и для ПКК «Мир». Определим критерий P_v для ряда экспедиций, приближающихся по продолжительности к марсианским проектам. Так, космонавт В.В. Поляков находился в полете в течение 438 сут, при этом $P_v^M = 61,1 \text{ м}^3/\text{чел}$. В двух других длительных полетах на «Мире» продолжительностью 326 и 365 сут жилой объем на одного человека в обоих случаях составлял 47 м^3 , т. е. $P_v^M = 47,0 \text{ м}^3/\text{чел}$.

О подобию продолжительности миссий

Продолжительность пилотируемой миссии на Марс и обратно зависит от возможностей ракет-носителей выводить в космос необходимую массу, выбранной траектории полета МОК, характеристик двигательной установки, целевых задач экспедиции.

Уточним, какими величинами характеризуются длительности марсианских миссий, предусматриваемые различными проектами. Так, в работе [8] данные по продолжительности перелета от Земли до Марса представлены следующим рядом (в сут): 249, 232, 229, 213, 166, 166, 204, 204, 296, 296, 296. Продолжительность миссии в целом, т. е. до возвращения экипажа на Землю: 947, 827, 780, 760, 728, 435, 728, 713, 741, 741, 921, 883, 734, 776. Те же характеристики длительности марсианских миссий в работе [9] выглядят

так: 248, 145, 278, 150, 190, 150, 224, 159, 204, 170, 235, 105, 207, 110; миссии в целом: 947, 867, 922, 868, 922, 865, 919, 879, 945, 899, 942, 867, 927, 863. Авторы [14] приводят следующие данные по длительности перелета МОК от Земли до Марса: 225, 250, 275, 300, 325, 350 сут (рис. 5). В работе [11] рассматриваются такие длительности пилотируемого полета до Марса (в сут): 228, 224; миссии в целом: 545, 919.

На МКС за период ее функционирования в пилотируемом режиме, начиная с экспедиции МКС-1 (октябрь 2000 г.) и по МКС-69 (сентябрь 2023 г.), длительные полеты выполнили 210 чел. Их продолжительность составляла от 44 до 370 сут. Больше всего полетов (77 %) приходилось на диапазон 150–200 сут.

Траектория перелетов Земля – Марс различной длительности

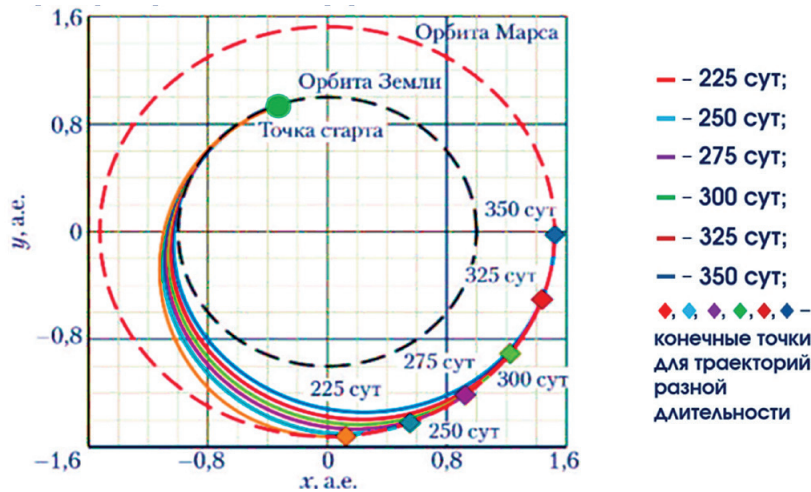


Рис. 5. Длительность перелета к Марсу на МОК с электроракетная двигательная установка (ЭРДУ)

Представим на общей числовой оси полученные выше выборки по продолжительности полета для МКС и МОК, соответственно Y_t^M и Y_t^O (рис. 6).

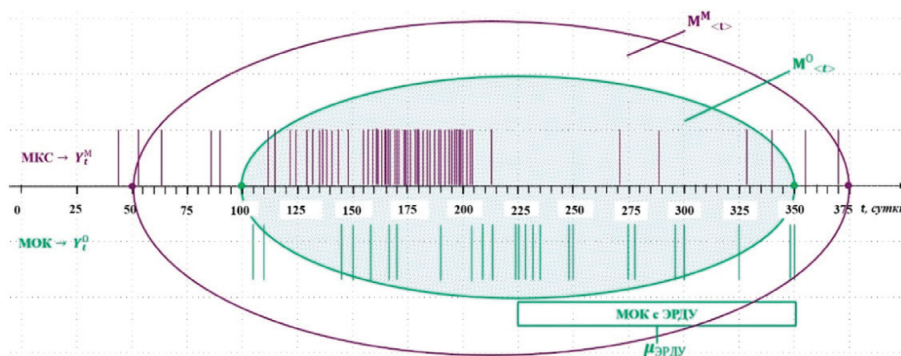


Рис. 6. Графическое представление пересечения множеств $M^M_{<t>}$ и $M^O_{<t>}$

Видно, что $M^o_{<t>}$ является собственным подмножеством $M^M_{<t>}$, т. е. $M^M_{<t>} \subset M^o_{<t>}$.

Все элементы $M^o_{<t>}$ принадлежат и множеству $M^M_{<t>}$, значит, они пересекаются. Тогда

$$M^M_{<t>} \cap M^o_{<t>}. \tag{13}$$

Расстояние между множествами равно нулю, что свидетельствует о подобии продолжительности миссий обоих объектов. *Иными словами, продолжительности полетов человека на МКС в диапазоне от 105 до 350 сут могут рассматриваться в модельных экспериментах как длительности полетов от Земли до Марса.*

Представляет интерес сопоставить элементы множества $M^o_{<t>}$ с графиками плотности $\tilde{\Phi}_t^*(t)$ и функции распределения $\tilde{F}_t^*(t)$ элементов множества $M^M_{<t>}$. Для построения последних сформирован статистический ряд (табл. 1), включающий 210 фактических значений длительности полетов космонавтов и астронавтов МКС за период экспедиций МКС-1... МКС-69. По сути, материалы этой таблицы являются набором данных по продолжительности полета в расчете на одного человека и по аналогии с P_v (м³/чел) могут использоваться в качестве критерия подобия P_t (сут/чел).

Таблица 1

Продолжительность длительных полетов на МКС космонавтов и астронавтов (МКС-1... МКС-69)

44	53	63	63	86	90	112	112	112	115	122	122	122	124	124	124	124	129	132	132	135
135	136	138	138	138	141	141	141	141	141	141	143	143	143	148	155	155	155	155	157	157
157	157	157	157	159	162	162	162	161	161	161	161	161	161	163	163	163	163	164	164	164
165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	166	166	166	166	166	166
166	166	166	166	166	166	166	166	166	167	167	167	167	169	169	169	169	170	170	170	171
171	171	173	173	173	174	174	174	174	175	175	175	176	178	178	179	180	180	182	184	184
184	184	184	184	184	185	185	185	185	185	185	185	187	187	187	187	189	189	189	189	190
190	190	190	190	192	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	194	195	195	195
195	195	195	196	196	196	196	196	196	197	197	197	197	198	198	198	198	199	199	199	200
200	202	202	202	202	202	203	204	204	213	213	271	289	328	340	340	355	355	370	370	370

Распределение элементов выборки Y_t^M по разрядам J_i и их частоты $P_{t_i}^*$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Интервальный вариационный ряд t_i для МКС

Разряды J_i	0–25	25–50	50–75	75–100	100–125	125–150	150–175	175–200	200–255	225–250	250–275	275–300	300–325	325–350	350–375
Число t_i в J_i	0	1	3	2	11	19	81	73	10	0	0	2	0	3	5
Частота $P_{t_i}^*$	0	0,005	0,014	0,01	0,05	0,09	0,39	0,35	0,044	0	0	0,01	0	0,014	0,023

На рис. 7 приведена гистограмма распределения продолжительности 210 длительных экспедиций на МКС в виде нормированного полигона $\varphi_{\hat{t}}^*(t)$ и огибающей в виде соответствующей статистической функции $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$.

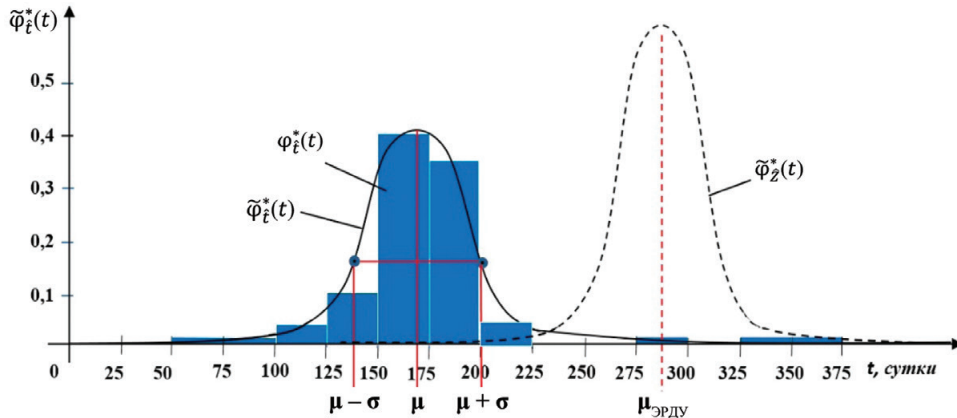


Рис. 7. Плотность распределения продолжительности длительных экспедиций на МКС (на одного человека) и прогноз $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$ для МОК с ЭРДУ (пунктир)

Функция $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$ имеет вид нормального закона распределения случайной величины:

$$\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t) = \frac{1}{\sigma_{\hat{t}}\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu_{\hat{t}})^2}{2\sigma_{\hat{t}}^2}}, \quad (14)$$

где $\mu_{\hat{t}}$ – математическое ожидание;

$\sigma_{\hat{t}}$ – среднее квадратическое отклонение.

Кривая $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$ симметрична относительно оси ординат, проходящей через центр рассеивания $t_{ц} = \mu$, имеет максимум в этой точке, перегиб в точках $\mu_{\hat{t}} \pm \sigma_{\hat{t}}$, с достоверностью 0,94 все значения \hat{t} лежат на промежутке $[\mu_{\hat{t}} \mp 3\sigma_{\hat{t}}] = [167,5 - 3 \cdot 32,5; 167,5 + 3 \cdot 32,5] = [70; 265]$. Еще одним подтверждением принадлежности $\tilde{\varphi}_{\hat{t}}^*(t)$ к нормальному распределению является равенство 0,5 функции распределения $\tilde{F}_{\hat{t}}^*(t)$ при $\mu_{\hat{t}} = 167,5$ (рис. 8).

При прогнозном оценивании конкретных марсианских проектов, например, МОК с ЭРДУ [14], можно ожидать, что $\sigma_{\hat{z}} < \sigma_{\hat{t}}$ и $\mu_{\text{ЭРДУ}} > \mu_{\hat{t}}$ (пунктирный график на рис. 7).

Определим, какое место элементы множества $M^o_{<t>}$, характеризующие длительность полета экипажа на МОК, занимают на графике $\tilde{F}_{\hat{t}}^*(t)$. Как видно из рис. 8, любые значения величины t_i для $Y^o_{<t>}$ от 105 до 350 сут попадают в диапазон от $\tilde{F}_{\hat{t}}^*(t_{105})$ до $\tilde{F}_{\hat{t}}^*(t_{350})$ с вероятностью 0,94 (область G), что говорит о высоком значении коэффициента подобия Π_t .

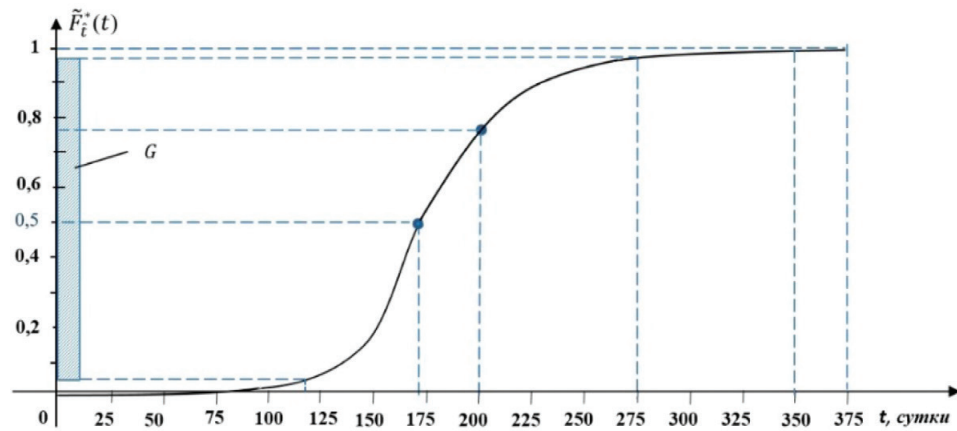


Рис. 8. Функция распределения продолжительности полета одного человека (космонавта, астронавта) в длительных экспедициях на МКС

При необходимости использования $\tilde{F}_t^*(t)$ в математических (например, имитационных) моделях более строгим будет применение нормального распределения в усеченной с обеих сторон форме, поскольку значения длительностей полетов для МОК рассматриваются лишь в пределах 105–350 сут, а остальные исключаются. Тогда для определения плотности распределения необходимо перейти к новой функции $\tilde{\varphi}_Z^*(t)$

$$\tilde{\varphi}_Z^*(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 105 \\ c \tilde{\varphi}_t^*(t) & \text{при } 105 < t < 350, \\ 0 & \text{при } t > 350 \end{cases} \quad (15)$$

где c – нормирующий множитель, он равен обратной величине степени усечения u .

В нашем случае:

$$u = \frac{1}{c} = \frac{1}{\tilde{F}_t^*(t_{350}) - \tilde{F}_t^*(t_{105})} = \frac{1}{0,93} = 1,08.$$

Таким образом, для всех рассматриваемых в данной работе марсианских проектов продолжительности перелетов по трассе Земля – Марс вполне сопоставимы с установленными длительностями полетов экипажей основных экспедиций МКС. В свою очередь, это позволяет в модельных послеполетных экспериментах с участием космонавтов, выполнивших полеты на МКС, рассматривать их как членов экипажей миссии, достигших Марса, и исследовать их деятельность как на трассе перелета, так и на поверхности планеты.

Экспедиции на ЛОС могут в ряде случаев быть сопоставимы по продолжительности с полетами на МКС, поэтому вышесказанное может быть отнесено и к ним.

Заметим, что согласно ряду проектов, космонавты могут находиться на поверхности Марса до двух и более лет. Не известно, как повлияет на их состояние и качество профессиональной деятельности столь длительное пребывание в экстремальных условиях на планете. Учет данного фактора потребует отдельных исследований.

Подобие и отличие факторов и условий космического полета

В общем случае факторы и условия космического полета можно охарактеризовать двухкомпонентной зависимостью:

$$Q = Q(B_i, D_j), \quad (16)$$

где B_i – параметр, определяющий неуправляемые условия, число которых i ;
 D_j – параметр, определяющий управляемые условия, число которых j .

Неуправляемые условия B_i определяются природными факторами: величина гравитации, пыль на планете, космический вакуум, радиация, метеориты и др.

Управляемые условия D_j определяются средой обитания, искусственно создаваемой в герметичных отсеках околоземных или межпланетных ПКК, а также напланетных баз.

Для D_j можно записать:

$$D_j = f(d_1, d_2, \dots, d_j), \quad (17)$$

где d_1, d_2, \dots и т. д. – параметры среды обитания в гермоотсеках: состав воздушной среды, освещенность, шумы, температура, микроорганизмы и др.

Тогда для управляемых условий объектов типа «М» и «О», соответственно:

$$\left. \begin{aligned} D_j^M &= f(d_1^M, d_2^M, \dots, d_j^M), \\ D_j^O &= f(d_1^O, d_2^O, \dots, d_j^O). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Учитывая, что в проектах МОК, ЛБ [8, 16, 12] предусматривается формирование той же среды обитания, что и в околоземных ПКК, подобие управляемых условий обеспечивается:

$$\Pi_{D_j}^M = \Pi_{D_j}^O. \quad (19)$$

Для неуправляемых условий B_i можно записать:

$$B_i = f(b_1, b_2, \dots, b_i), \quad (20)$$

где b_1, b_2, \dots, b_i – параметры, определяемые факторами космического пространства (радиация, гипомагнитная среда, величина гравитации, температура и освещенность на поверхности Луны или Марса и др.).

Степень их влияния на качество деятельности космонавтов неизвестна. Автоматическое подобие процессов деятельности экипажей на объектах «М» и «О» в данном случае не обеспечивается:

$$P_{B_i}^M \neq P_{B_i}^O. \quad (21)$$

Поэтому при исследовании деятельности экипажей ПКК с целью выполнения условия формулы (11) потребуется определять влияние параметров типа b_i на качество работы операторов. Если оно установлено в виде аналитических зависимостей или коэффициентов, эти характеристики могут использоваться в качестве корректирующих коэффициентов в любых моделях [17].

Некоторые из них, например, гравитация (b_g) и другое, могут моделироваться на наземных исследовательских стендах [6, 21]. В других случаях натурное моделирование нецелесообразно из-за рисков безопасности испытуемых или по технико-экономическим основаниям. Кроме радиации, например, к таким параметрам может быть отнесена гипомагнитная среда.

В частности, установлено ее негативное влияние на механизмы регуляции сердечно-сосудистой и когнитивной систем человека и, соответственно, его работоспособность. При частичной компенсации влияния геомагнитного поля на оператора количество ошибок при выполнении различных задач на ПКК может возрастать. Для учета влияния радиации и гипомагнитной среды на качество работы космонавтов можно воспользоваться рекомендациями авторов [2, 4, 20].

Режим труда и отдыха экипажей МКС и ПКК за пределами околоземных орбит

Учитывая высокую автономность и длительность пилотируемого полета на Марс, ограничения по поддержке миссии ЦУПом, пополнение ресурсов в ходе экспедиции, возможности человека по восприятию информации, утомляемость при длительной работе, подавляющее большинство проектов предусматривает круглосуточный (вахтовый) трех- или двухсменный режим работы экипажа МОК. Вахту космонавтов на МОК можно рассматривать как особый вид круглосуточного дежурства, требующего непрерывного контроля работоспособности бортовых систем, обеспечения надежного управления МОК, эффективного выполнения программы научных исследований, поддержания высокой работоспособности космонавтов.

На рис. 9 представлен режим труда и отдыха (РТО), когда члены экипажа МОК несут вахту попарно в три смены. При этом в рамках каждой смены индивидуальный график работы космонавтов практически не отличается от РТО на МКС, определяемого принятой «формой 24». В данной схеме РТО космонавтов МОК и экипажа МКС аналогичны.

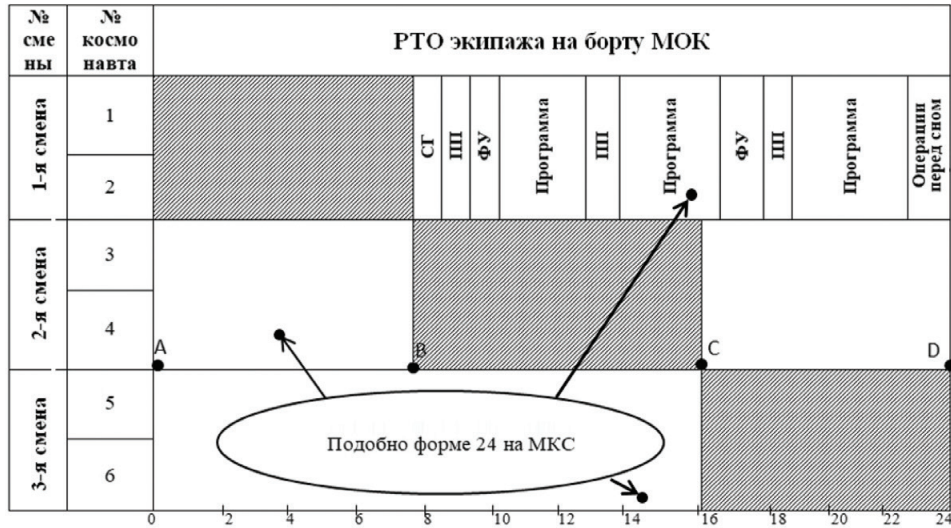


Рис. 9. Режим вахтовой работы экипажа МОК из 6 человек:

СГ – санитарно-гигиенические мероприятия; ПП – прием пищи; ФУ – физические упражнения; Программа – служебные и целевые операции по программе полета МОК; [hatched] – сон

Подобие и отличия в структуре деятельности экипажей

Рассмотрим, каково содержание операций, выполняемых экипажами МКС и МОК. В работе [19, стр. 364–365] приводится перечень основных полетных операций для МОК с ЭРДУ. Их общее число – 21, при этом с участием экипажа реализуется 20. Из них 10 (50 %) достаточно близки по технологиям выполнения к операциям на околоземных орбитальных станциях. Другие 10 имеют некоторую специфику из-за отличий в орбитах, в конструктивно-технологическом исполнении оборудования, но функционально относятся к тем же служебным операциям. Например, операция «подготовка посадочного аппарата к спуску на планету, отход его от МОК, спуск» подобна операции по подготовке корабля типа «Союз» к его отделению от МКС, расстыковке и спуску отсека СА на поверхность Земли.

С учетом формул (3–6) структура деятельности экипажа МОК может быть описана вектором:

$$Y_d = Y_{<d>} (A_{<k>}^{сл}, B_{<l>}^{цр}), \tag{22}$$

где $A_{<k>}^{сл}$ – определяет параметры служебной (обеспечивающей) деятельности; $B_{<l>}^{цр}$ – определяет параметры исследовательской деятельности (выполнения целевых работ).

В свою очередь,

$$A_{<k>}^{сл} = A_{<k>}^{сл} (Z_{<k_1>}^{уд}, Z_{<k_2>}^{уд}, Z_{<k_3>}^{уб}, Z_{<k_4>}^{ур}), \tag{23}$$

где $Z_{<k_1>}^{уд}$ – определяет параметры управления движением МОК вокруг центра масс;

$Z_{<k_2>}^{уд}$ – определяет параметры управления движением центра масс;

$Z_{<k_3>}^{уб}$ – определяет параметры управления техническим состоянием бортовых систем МОК и его конструкции;

$Z_{<k_4>}^{уп}$ – определяет параметры управления ресурсами МОК.

Аналогично для $B_{<l>}^{уп}$:

$$B_{<l>}^{уп} = B_{<l>}^{уп} (R_{<l_1>}^Г, R_{<l_2>}^В), \quad (24)$$

где $R_{<l_1>}^Г$ – определяет параметры готовности к применению НА;

$R_{<l_2>}^В$ – определяет параметры реализации НПИ (применения НА).

Из 20 операций экипажа на МОК, рассмотренных выше, к операциям типа $Z_{<k_1>}^{уд}$ можно отнести 1 (5 %), типа $Z_{<k_2>}^{уд}$ – 6 (30 %), типа $Z_{<k_3>}^{уб}$ – 8 (40 %), типа $Z_{<k_4>}^{уп}$ – 1 (5 %). К операциям типа $B_{<l>}^{уп}$ – 4 (20 %).

Выводы

1. Одной из задач МКС является создание научно-технических заделов для обеспечения будущих полетов человека в окололунное пространство, на Луну и Марс. МКС служит своего рода моделью для отработки технологий надежного и безопасного функционирования пилотируемых комплексов за пределами околоземных орбит. На станции выполнялась обширная программа научных экспериментов и целевых работ по направлению «Человек в космосе»; отрабатывался целый ряд технических систем и средств, исследовались актуальные медико-биологические проблемы безопасного пребывания космонавтов в дальнем космосе.

В то же время недостаточно ясно, в какой мере полетная деятельность экипажей МКС может служить моделью для отработки технологий выполнения необходимых задач и операций космонавтами на объектах, функционирующих за пределами околоземных орбит.

2. Предложены подходы к оцениванию аналогий деятельности экипажей МКС и будущих космических комплексов, предназначенных для полетов на Луну и Марс. При этом деятельность экипажей ПМК рассматривается как целенаправленный процесс, обладающий множеством свойств, определяющих его качество, что позволяет использовать в исследованиях методы компонентного и статистического анализа, теории подобия и изучить наиболее существенные его свойства.

3. Приведены результаты анализа «жизненного пространства» экипажей ПМК, существенно влияющего на их работоспособность и качество полетной деятельности. Они получены с использованием оценок свободных объемов обитаемых отсеков в расчете на одного космонавта. Показано,

что для МКС и известных проектов ЛБ и межпланетных пилотируемых комплексов имеются аналогии и даже подобие условий жизнедеятельности экипажей.

На основании статистического анализа продолжительности полетов космонавтов и астронавтов МКС, сопоставления полученных данных с материалами проектов ПМК для полетов на Марс определены границы длительных экспедиций на МКС, пригодные для рассмотрения в качестве аналогов марсианских миссий.

4. Представлены общие подходы к анализу аналогий в структуре деятельности экипажей существующих и перспективных ПМК. Показана возможная схема формирования плана вахтовой работы экипажа межпланетного марсианского комплекса, когда режим труда и отдыха космонавтов в рамках каждой смены может быть принят аналогичным (подобным) РТО на МКС.

На примере одного из проектов межпланетного марсианского комплекса показаны подобие и отличия в структуре деятельности экипажей, что позволяет, с одной стороны, выявлять и учитывать аналогии выполнения ряда операций, с другой – определять задачи наземной отработки операций, имеющих значительные отличия в технологиях от выполняемых на МКС.

5. В целях дальнейших исследований процессов деятельности экипажей ПМК за пределами околоземных орбит целесообразно рассмотреть возможность отработки ряда ключевых задач и операций космонавтов на Российской орбитальной станции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Григорьев, А.И. Медико-биологические проблемы пилотируемой экспедиции на Марс / А.И. Григорьев, А.Н. Потапов // Вестник Московского университета. Серия ХХІІІ. Антропология. – № 1. – 2014. – С. 4–16.
- [2] Ушаков, И.Б. Космос. Радиация. Человек: (радиационный барьер в межпланетных полетах). – Москва: Научная книга, 2021. – 348 с.
- [3] Ушков, И.Б. Физиология труда и надежность деятельности человека / И.Б. Ушков, Ю.А. Кукушкин, А.В. Богомолов. – Москва: Наука, 2008. – 316 с.
- [4] Самойлов, А.С. Радиационное воздействие в орбитальных и межпланетных полетах: мониторинг и защита / А.С. Самойлов, И.Б. Ушаков, В.Л. Шуршанов // Экология человека. – № 1. – 2019. – С. 4–9.
- [5] Основные операционные подходы к наземному моделированию пилотируемого полета на Марс / А.И. Григорьев, И.Б. Ушаков, Б.В. Моруков [и др.]. // Биотехносфера. – № 4. – 2013. – С. 11–17.
- [6] Predicting of the Success of Extravehicular Activities on the Surface of the Moon or Mars / E. Fomina, P. Romanov, T. Kukoba, M. Kokueva [et al.] // IAC-22, A1,2,2, x73289: [73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18–22 September 2022].
- [7] Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий [и др.]: под ред. Р.М. Юсупова. – Ленинград: Энергия, 1978. – 192 с.
- [8] Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А.С. Коротева. – Москва: РАКЦ им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.

- [9] Шибанов, Г.П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека. – Москва: Машиностроение, 2007. – 544 с.
- [10] Тяжелые межпланетные корабли для дальних перелетов. – URL: <http://www.assemblingospace.ru/2017/11/05/tyazhelye-mezhplanetnye-korabli-dlya-dalnih-pereletov/?ysclid=lm6ey63rpr873423408> (дата обращения 05.09.2024).
- [11] Глобальный проект пилотируемого исследования системы Марса. France. IAA, 2015 (русскоязычная версия). – 145 с.
- [12] ESA «Human Missions to Mars». Report: CDF-20 (A), Feb., 2004.
- [13] Ярополов, В.И. Внутренний объем обитаемого пространства ПКА, необходимый для выполнения полета определенной длительности // Пилотируемые полеты в космос. – 2012. – № 1(3). – С. 85–96.
- [14] Старинова, О.Л. Оптимизация гелиоцентрических перелетов космического аппарата с разнотипными электроракетными двигателями / О.Л. Старинова, А.А. Лобыкин, М.А. Рожнов // Космическая техника и технологии. – 2023. – № 1(40). – С. 94–104.
- [15] Mars Architecture Steering Group, 2nd Addendum of the Human Exploration of Mars, Design Reference Architecture 5.0 / G. Drake [et al.]. – NASA Jonson Space Center, 2014.
- [16] Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы / Под ред. В.П. Легостаева, В.А. Лопоты. – Москва: РКК «Энергия», 2011. – 584 с. – ISBN 978-5-91820-046-9. – Текст: непосредственный.
- [17] Мозин, В.А. Поправочные коэффициенты для временных и надежностных показателей оператора СЧМ при воздействии факторов внешней среды. В сб. Эффективность и надежность систем «человек – техника» / В.А. Мозин, Ю.Г. Улитин. – Москва: Высшая школа, 1975. – С. 77–78.
- [18] Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий / Б.И. Крючков, В.М. Усов, В.И. Ярополов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 2(19). – С. 35–57.
- [19] Соловьев, В.А. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский; под общ. ред. Л.Н. Лысенко. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана [б. г.]. – Часть 2. – 2010. – С. 426. – ISBN 978-5-7038-3352-0.
- [20] Саримов, Р.М. Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека / Р.М. Саримов, В.Н. Бинги, В.А. Миляев // Биофизика. – 2008. – Т. 53, вып. 5. – С. 856–866.
- [21] Крючков, Б.И. Имитационная математическая модель внекорабельной деятельности космонавтов на поверхности Марса / Б.И. Крючков, П.П. Долгов // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 1(46). – С. 61–73.
- [22] Иванов, И.Е. Подобия физических процессов: учеб. пособие / И.Е. Иванов, В.Е. Ерещенко. – Москва: МАДИ, 2015. – 144 с.
- [23] Исследование надежности деятельности космонавта на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») / В.П. Сальникий, В.И. Мясников, А.Ф. Бобров, Л.Г. Шевченко [и др.] // Монография «Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина»: в 2 т. Т. 2. – Москва: ГМЦ РФ – МБП РАН, 2002. – С. 285–300.
- [24] Концепция интерьера SpaceX Starship на 20–40 пассажиров. – URL: <https://www.humanmars.net/2021/04/spacex-starship-interior-concept-for-20.html> (дата обращения 27.09.2024).

- [25] Концепция интерьера Starship на 100 пассажиров. – URL: <https://www.humanmars.net/2021/04/spacex-starship-interior-concept-for-20.html> (дата обращения 27.09.2024).

REFERENCES

- [1] Grigoriev, A.I. Bio-Medical Problems of a Manned Expedition to Mars / A.I. Grigoriev, A.N. Potapov // *Bulletin of Moscow University. Series XXIII. Anthropology.* – No 1. – 2014. – P. 4–16.
- [2] Ushakov, I.B. *Space. Radiation. Man: (Radiation Barrier in Interplanetary Flights).* – Moscow: Scientific book, 2021. – 348 p.
- [3] Ushkov, I.B. *Physiology of Labor and Reliability of Human Activity* / I.B. Ushkov, Yu.A. Kukushkin, A.V. Bogomolov. – Moscow: Nauka. 2008. – 316 .
- [4] Samoilov, A.S. *Radiation Exposure in Orbital and Interplanetary Flights: Monitoring and Protection* / A.S. Samoilov, I.B. Ushakov, V.L. Shurshanov // *Human Ecology.* – No 1. – 2019. – P. 4–9.
- [5] *Basic Operational Approaches to Ground-Based Simulation of a Manned Flight to Mars* / A.I. Grigoriev, I.B. Ushakov, B.V. Morukov [et al.] // *Biotechnosphere.* – No 4. – 2013. – P. 11–17.
- [6] *Predicting of the Success of Extravehicular Activities on the Surface of the Moon or Mars* / E. Fomina, P. Romanov, T. Kukoba, M. Kokueva [et al.] // IAC-22, A1,2,2, x73289 [73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18–22 September 2022].
- [7] *Elements of the Theory of Testing and Control of Technical Systems* / V.I. Gorodetsky [et al.]: ed. R.M. Yusupov. – Leningrad: Energy, 1978. – 192 p.
- [8] *Manned Expedition to Mars* / ed. A.S. Koroteev. – Moscow: Russian Academy of Cosmonautics Named After K.E. Tsiolkovsky, 2006. – 320 p.
- [9] Shibanov, G.P. *Habitability of Cosmos and Safety of Human Presence in it.* – Moscow: Mashinostroenie, 2007. – 544 p.
- [10] *Heavy Interplanetary Space Vehicles for Long-Distance Flights.* – URL: <http://www.assemblingonspace.ru/2017/11/05/tyazhelye-mezhplanetnye-korabli-dlya-dalnix-pe-reletov/?ysclid=lm6ey63rpr873423408> (date of access 05.09.2024).
- [11] *Global Project for Manned Exploration of the Mars System.* France. IAA, 2015 (Russian version). – 145 p.
- [12] ESA «Human Missions to Mars». Report: CDF-20 (A), Feb., 2004.
- [13] Yaropolov, V.I. *Internal Volume of Habitable Space of a Spacecraft, Necessary for Implementing a Flight of a Certain Duration* // *Manned Spaceflight.* – 2012. – No 1(3). – P. 85–96.
- [14] Starinova, O.L. *Optimization of Heliocentric Flights of a Space Vehicle with Different Types of Electric Rocket Engines* / O.L. Starinova, A.A. Lobykin, M.A. Rozhnov // *Space Equipment and Technologies.* – 2023. – No 1(40). – P. 94–104.
- [15] *Mars Architecture Steering Group, 2nd Addendum of the Human Exploration of Mars, Design Reference Architecture 5.0* / ed. B.G. Drake // NASA Jonson Space Center, 2014.
- [16] *The Moon – a Step Towards Technologies for Exploration of the Solar System* / Ed. by V.P. Legostaev, V.A. Lopota. – Moscow: RSC Energia, 2011. – 584 p.
- [17] Mozin, V.A. *Correction Factors for Time and Reliability Indicators of the MMS Operator Under the Influence of Environmental Factors.* In the Collection “Efficiency

- and Reliability of “Man-Machine Systems” / V.A. Mozin, Yu.G. Ulitin. – Moscow: Higher School, 1975. – P. 77–78.
- [18] On the Features of Professional Activity of Cosmonauts When Implementing Lunar Missions / B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, V.I. Yaropolov [et al.] // *Manned Spaceflight*. – 2016. – No 2 (19). – P. 35–57.
- [19] *Space Flight Control: a Textbook: in 2 Parts* / V.A. Soloviev, L.N. Lysenko, V.E. Lyubinsky; under the General Editorship of L.N. Lysenko. – Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2010.
- [20] Sarimov, R.M. The Influence of Geomagnetic Field Compensation on Human Cognitive Processes / R.M. Sarimov, V.N. Bingi, V.A. Milyaev // *Biophysics*. – 2008. – Vol. 53, Issue 5. – P. 856–866.
- [21] Kryuchkov, B.I., Simulation Mathematical Model for Extravehicular Activity of Cosmonauts on the Surfaces of Mars / B.I. Kryuchkov, P.P. Dolgov // *Manned Spaceflight*. – 2023. – No 1(46). – P. 61–73.
- [22] Ivanov I.E., Ereshchenko V.E. *Methods of Similarity of Physical Processes: a Textbook* / I.E. Ivanov, V.E. Ereshchenko. – Moscow: MADI, 2015. – 144 p.
- [23] Study of the Reliability of Cosmonaut Activity at Different Stages of Long-Term Space Flight (Experiment “Pilot”). Orbital Station “Mir” / V.P. Salnitsky, V.I. Myasnikov, A.F. Bobrov [et al.] // *Space Biology and Medicine: in 2 Vol.* – Moscow: SSC RF IBMP RAS, 2002. – P. 285–300.
- [24] Space X Starship Interior Concept for 20 to 40 Passengers. URL:<https://www.humanmars.net/2021/04/spacex-starship-interior-concept-for-20.html> (date of access 27.09.2024).
- [25] Starship Interior Concept for 100 Passengers. URL:<https://www.humanmars.net/2021/04/spacex-starship-interior-concept-for-20.html> (date of access 27.09.2024).