

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.78.018:629.735.45:007.51

DOI 10.34131/MSF.21.1.42-60

ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАТОРСКИХ КАЧЕСТВ КОСМОНАВТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРТОЛЕТА В ИНТЕРЕСАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПИЛОТИРУЕМЫХ ПРОГРАММ

П.Н. Власов, В.Н. Кислицин, М.М. Харламов, Б.И. Крючков,
А.В. Солodников, В.М. Усов, Б.В. Бурдин

Герой Российской Федерации, заслуженный летчик-испытатель РФ
П.Н. Власов; В.Н. Кислицин; канд. экон. наук М.М. Харламов;
докт. техн. наук Б.И. Крючков; А.В. Солodников; докт. мед. наук В.М. Усов;
канд. техн. наук Б.В. Бурдин (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье исследуются методические и организационные вопросы использования современных вертолетов для оценивания операторских качеств космонавтов в интересах перспективных пилотируемых миссий. Разработана и апробирована методика исследования влияния длительных космических полетов на качество операторской деятельности космонавтов, выполняющих управление сложной динамической человеко-машинной системой. Предлагается система объективных показателей оценивания операторских качеств космонавтов по результатам серии постановочных экспериментов.

Ключевые слова: вертолеты, имитаторы посадочного лунного модуля, космонавты, операторские качества космонавтов, глиссада, до- и послеполетные эксперименты, экстремальные факторы полета.

Possibilities of Studying the Operator Qualities of a Cosmonaut with the Help a Helicopter for the Benefit of Future Manned Space Programs. P.N. Vlasov, V.N. Kislitsin, M.M. Kharlamov, B.I. Kryuchkov, A.V. Solodnikov, V.M. Usov, B.V. Burdin

The paper investigates the methodical and organizational issues of the use of existing helicopters in order to evaluate cosmonauts' operator qualities for the benefit future manned space missions. The methodology for studying the effects of long-duration staying in space on the quality of activity of a cosmonaut-operator who controls a complex dynamic human-machine system has been designed and tested. The paper offers the system of objective indications for the evaluation of cosmonauts' operator qualities according to the results of a series of preliminary experiments.

Keywords: helicopters, lunar descent module simulator, cosmonauts, cosmonaut's control skills, glideslope, preflight and postflight experiments, extreme flight factors.

Особенности использования вертолетов при отработке лунных пилотируемых программ

При отработке задач посадки пилотируемого летательного аппарата на поверхность Луны СССР и США в 60-е годы прошлого столетия широко использовали различные летательные аппараты с технологией вертикального взлета и посадки, в том числе и вертолеты [1–3].

В США вертолеты в обязательном порядке использовались для подготовки астронавтов перед тренировками на наземных (LLRF) и летных (LLTV) аналогах лунного посадочного модуля. Программа обучения на вертолете составляла 100 часов налета, причем с отработкой навыков «висения» и последующей вертикальной посадки, незнакомых пилотам обычных самолетов.

Кроме того, на начальном этапе создания летных тренажеров для посадки на Луну, специалистами НАСА изучался вопрос использования вертолетов для отработки ручного управления спуском. При этом ставилась задача создать на этапе спуска для пилота условия, близкие к лунной гравитации, для чего было необходимо компенсировать часть веса вертолета за счет его наклона вперед. Подобная схема была признана опасной, поскольку операции посадки выполнялись на небольших высотах и впоследствии от них отказались в пользу аппаратов типа LLTV [17–20].

В СССР в 1966 году начались тренировки на вертолетах космонавтов, отобранных в группу по программе Л-3 [3]. С высоты 70 м космонавты должны были при снижении по глиссаде, близкой к лунной, за 30–40 с выбрать место и осуществить посадку вертолета. При плане в 40–50 посадок эксперименты были приостановлены на 6–9 посадках, а затем отменены вовсе из-за их высокой опасности.

Этим эксперименты по лунной программе на вертолетах не ограничивались. На базе Летно-исследовательского института (ЛИИ) МАП СССР совместно с ОКБ-1 (ЦКБЭМ, ныне – ПАО «РКК «Энергия») был проведен цикл работ на базе серийных вертолетов МИ-4, оборудованных лунными кабинами-имитаторами. При этом использовались два типа кабин пилотов – подвижная с кардановым подвесом и неподвижная. Фактически они представляли собой динамические тренажеры и использовались космонавтами группы Л-3 для отработки посадки на Луну.

В ходе экспериментальных исследований [4–6] специалистами обеих организаций был выполнен большой объем работ по изучению динамических характеристик вертолетных имитаторов в части определения оптимальных законов управления ими, а также создания эффективных систем управления подобными комплексами. В конечном итоге были выработаны рекомендации по построению высокоточных штатных систем посадки на Луну с использованием ручного управления.

Опыт использования вертолетов в СССР и США в ходе подготовки лунных программ оказался положительным. В указанный период вертолеты стали незаменимым техническим средством для отработки различных задач обеспечения управляемого спуска посадочного модуля на поверхность Луны.

Отличие вертолетов от других типов летательных аппаратов состоит в том, что на них можно выполнять вертикальные режимы полета. К ним относятся: вертикальный набор высоты, висение, вертикальное снижение с выдерживанием места относительно земли. По технике пилотирования эти режимы относятся к наиболее сложным для летчика [11].

При выполнении полетов на вертолете у космонавтов формируются способности быстрых двигательных реакций, умения адаптироваться к изменившимся пространственным и ситуационным условиям, оценивать сложный многокомпонентный процесс полета, в ограниченное время принимать рациональные решения, адекватно реагировать на усложнение обстановки.

Полеты по маршруту на вертолете дают возможность отрабатывать выполнение совмещенной деятельности, ведение радиообмена, использование технических средств для контроля местонахождения, визуальную ориентировку по земным ориентирам, а также развивают глазомер, быструю и точную реакцию на внешние возмущения, способствуют выработке профессиональных приемов, необходимых для космонавтов как операторов в условиях беспорядочного пространства.

Висение, развороты и перемещения на различных высотах на вертолете вырабатывают навыки пространственной и ситуационной ориентировки, сложные операторские навыки, тренируют вестибулярный аппарат, а также вырабатывают качества, способствующие принятию оптимальных решений в нестандартных ситуациях.

На современном этапе работ целесообразно, с учетом предшествующего опыта, оценить и проработать возможность создания научно-технических заделов по использованию вертолетов для исследования возможностей человека управлять сложными техническими комплексами в интересах перспективных пилотируемых космических программ.

Заметим, что в рамках выполняемой работы не ставилась задача отработки конкретных режимов предстоящих лунных миссий или подготовки космонавтов к их выполнению. Такие работы могут быть продолжением данного исследования при использовании соответствующих исходных данных на лунный взлетно-посадочный комплекс.

Постановка задачи

Для исследования влияния внешних факторов на результаты деятельности космонавтов разработать способ и методику оценивания операторских качеств космонавта с использованием вертолетного комплекса, имеющего определенные летно-технические характеристики и функционирующего в определенных условиях.

Обозначим векторы, соответственно определяющие летно-технические характеристики вертолетного комплекса как $A_{<q>}$, условия его функционирования как $B_{<l>}$, а организацию процесса как $B_{<k>}$. Тогда качество результатов, достигаемых при реализации формируемого процесса исследований, будет определяться трехкомпонентным вектором

$$Y_{рез} = Y_{рез}(A_{<q>}, B_{<l>}, B_{<k>}). \quad (1)$$

Процессы исследований на авиационных комплексах являются типичным случаем, когда на условия их функционирования и применения воздействует целый ряд априори неизвестных, а потому случайных факторов. Поэтому, в реальных условиях эксперимента векторы (1) следует рассматривать как случайные:

$$\hat{Y}_{рез} = \hat{Y}_{рез}(\hat{A}_{<q>}, \hat{B}_{<l>}, \hat{B}_{<k>}), \quad (2)$$

где, $\hat{}$ – символ случайного события.

Процесс оценивания операторских качеств космонавта с использованием вертолетного комплекса можно считать пригодным для применения, если полученные результаты будут соответствовать цели исследования.

Тогда критерий пригодности формируемого процесса примет вид

$$G_{пр} : \hat{Y}_{рез} \in \{\hat{Y}_{рез}^{mp}\}, \quad (3)$$

где $\hat{Y}_{рез}^{mp}$ – вектор требуемых результатов, т.е. соответствующих цели исследования, \in – знак принадлежности множеству.

Поскольку критерии пригодности типа (3) непосредственно не могут быть применены для оценивания операторских качеств космонавтов, в условиях реального воздействия случайных факторов целесообразно использовать показатели в виде вероятности события [16]

$$P_{рез} = P(\hat{Y}_{рез} \in \{\hat{Y}_{рез}^{mp}\}), \quad (4)$$

где $P_{рез}$ – вероятность получения результатов оценивания при комплексе условий, определяемых (2).

Общая схема

и модель процесса исследования операторских качеств

Обзор летно-технических характеристик ($A_{<q>}$) современных гражданских вертолетов [9, 10] показывает, что некоторые из них, например, легкие многоцелевые вертолеты типа «Eurocopter», «Robinson», обладают качествами, необходимыми для решения поставленной задачи. Они надежны и безопасны в эксплуатации, имеют хорошую управляемость (реакцию на отклонение органов управления), высокую устойчивость (способность самостоятельно

выдерживать заданные пилотом параметры полета: скорость; высоту; углы тангажа, крена, рыскания, скольжения). Кроме того, они обеспечивают возможность имитации полетов по некоторым режимам лунных программ: полеты по определенным участкам глиссад, режимы «висения», выбора мест посадки и выполнения на них безопасного снижения летательного аппарата с учетом ограничений по времени и размера площадки.

Упомянутые вертолеты имеют двойное управление – для обучаемого и инструктора, что необходимо для освоения их космонавтами-испытателями, не имеющими опыта полетов на вертолетах. Они могут быть использованы также для проведения экспериментов с участием космонавтов после длительных полетов на МКС. Эти вертолеты обеспечивают комфортное пребывание экипажа в кабине и всепогодность полетов.

В рамках работ НИИ ЦПК использовался вертолет «Eurocopter AS-350 В3», одна из достаточно надежных и проверенных моделей данного класса с 4-лопастным несущим винтом и низкой вибрацией. Крейсерская скорость полета вертолета составляет 235 км/ч, дальность полета 690 км, продолжительность полета 4,4 ч, полезная нагрузка 1048 кг, взлетная мощность 860 л.с., полный взлетный вес 2250 кг, объем топливного бака 540 л.

Для решения поставленной задачи в основу разработки программы и методики полетов на вертолете положен опыт подготовки на учебно-тренировочных самолетах НИИ ЦПК [12] и авиационных учебных центров гражданской авиации, осуществляющих подготовку пилотов легких вертолетов. Кроме того, учитывался прошлый опыт подготовки астронавтов НАСА к выполнению лунных миссий.

Эксперименты при полетах на вертолете проходят в определенных условиях (вектор $B_{<D>}$), под которыми понимается совокупность объектов различного характера непосредственно не участвующих в процессе оценивания операторских качеств космонавтов, но влияющих на этот процесс. К ним могут быть отнесены погодные условия, навигационное обеспечение, ориентиры на местности, качество площадок взлета, посадки и др. При подготовке и выполнении экспериментов условия выбираются, прежде всего, исходя из требований безопасности проведения работ.

Особое влияние на качество исследований оказывают характеристики их организации (вектор $B_{<k>}$). Компоненты этого вектора определяются принятой моделью исследований $M_{<k>}$, типом циклограммы эксперимента $Z_{<k>}$, траекториями глиссад управляемого спуска $V_{<k>}$, порядком оценивания действий космонавта $O_{<k>}$, профессиональными качествами космонавтов-испытателей $K_{<k>}$, участвующих в экспериментах. Вектор $B_{<k>}$ можно представить в виде

$$B_{<k>} = B_{<k>}(M_{<k>}, Z_{<k>}, V_{<k>}, O_{<k>}, K_{<k>}). \quad (5)$$

На рис. 1 показана общая структурная схема модели исследований. В рамках аналитического блока (бл. 1) выполняется проектирование экспери-

ментов на вертолете в соответствии с поставленными целями исследований. В нем решаются следующие основные задачи: расчет глиссады, определение маршрута полетов от аэродрома базирования вертолета до зоны проведения эксперимента по спуску, общее планирование летных экспериментов, вертолетная подготовка космонавтов для допуска к пилотированию вертолета с инструктором, подготовка профессиональных пилотов к вертолетным тестам. Следующий блок (бл. 2) предусматривает проведение тестовых полетов на вертолете профессиональными пилотами с целью отработки всей циклограммы эксперимента, а также глиссады спуска. На основании результатов этих полетов разрабатываются предложения (бл. 3) по программе и методике экспериментов (бл. 4). На следующих этапах (бл. 5–7) проводятся до- и послеполетные эксперименты с экипажами МКС [7, 8]. Результаты таких экспериментов в части имитации снижения по «лунным» глиссадам могут быть использованы (бл. 8) при разработке программы специальной летной подготовки космонавтов на вертолетах (СЛПКВ).

Общий вид циклограммы проведения этих экспериментов на вертолете с участием экипажей МКС показан на рис. 2. Суммарная длительность эксперимента T_{Σ} складывается из продолжительности каждого этапа, т.е. $T_c = \sum_{i=1}^8 t_i$. На практике T_c оценивается величиной около 1÷1,2 ч.

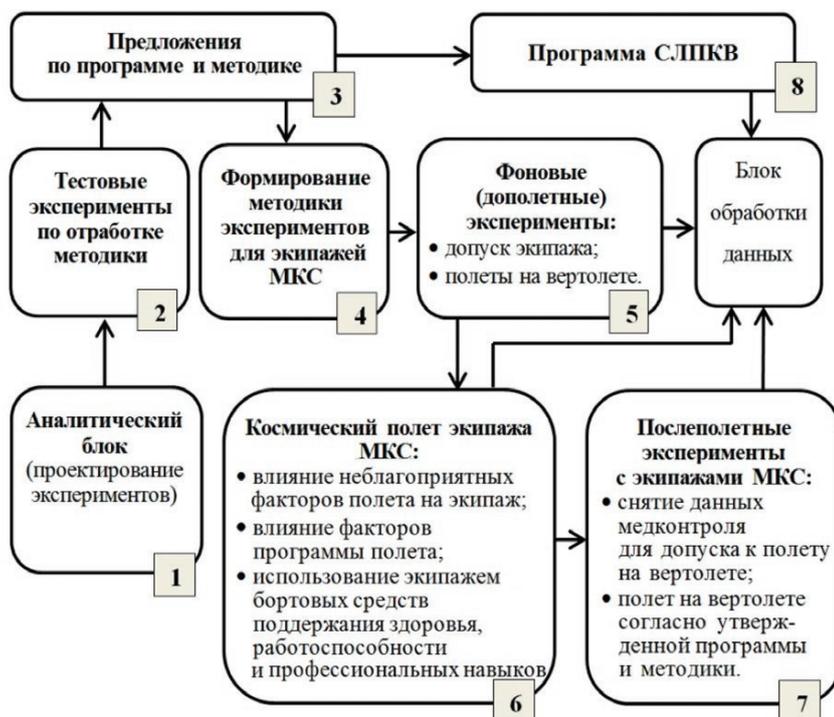


Рис. 1. Структурно-функциональная схема исследований с использованием вертолета

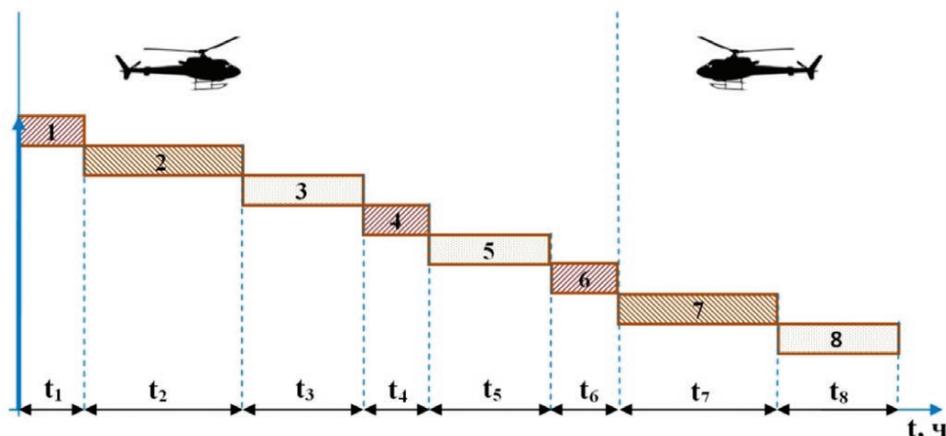


Рис. 2. Циклограмма эксперимента

(Этапы эксперимента: 1 – взлет на аэродроме базирования и набор заданной высоты; 2 – горизонтальный полет; 3 – снижение по глиссаде с зависанием на $H = 5 \text{ м}$ над площадкой, посадка; 4 – взлет и набор высоты на $H = 150 \text{ м}$; 5 – спуск по глиссаде с зависанием $H = 5 \text{ м}$ над площадкой (без посадки); 6 – набор заданной высоты; 7 – горизонтальный полет; 8 – посадка на аэродроме базирования)

Глиссада спуска – траектория полета летательного аппарата (самолета, вертолета, космического аппарата), по которой он снижается перед посадкой. Важнейшая характеристика глиссады – угол между плоскостью глиссады и горизонтальной плоскостью.

Все посадочные модули ЛМ в программе «Аполлон» выполняли снижение на поверхность Луны по определенной глиссаде. Условно она делилась на два участка (коридора). Дальний начинался с высоты 2,3 км, ближний – с высоты 150 м [17, 18]. В процессе снижения пилот должен по приборам контролировать параметры глиссады – высоту над поверхностью, скорость снижения ЛА, определять визуальные ориентиры и в соответствии с ними управлять модулем для выполнения посадки в заданном районе на поверхность Луны. Все без исключения осуществленные астронавтами посадки пилотируемого модуля на Луну доказали, что только ручное пилотирование кораблем может надежно обеспечить выбор места посадки и безопасную посадку на Луну.

В рамках данного исследования в числе различных режимов полета космонавта на вертолете выполнялась имитация режима ручного управления посадкой летательного аппарата. При этом применялась глиссада спуска (рис. 3), близкая к используемой в программе «Аполлон» при 100-часовой вертолетной подготовке астронавтов (в рамках ближнего коридора глиссады).

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры глиссады: $H = 150 \text{ м}$, $D = 600 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$, $V_y = 2 \text{ м/с}$, угол глиссады 33 град.

Для контроля прохождения глissады выбраны четыре реперных точки:

- 1-й промежуточный параметр глissады снижения: $H = 100 \text{ м}$, $D = 400 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$, $V_y = 2 \text{ м/с}$;
- 2-й промежуточный параметр глissады снижения: $H = 50 \text{ м}$, $D = 200 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$, $V_y = 2 \text{ м/с}$;
- 3-й промежуточный параметр глissады снижения: $H = 5 \text{ м}$, $D = 0 \text{ м}$, $V = 0 \text{ км/ч}$, $V_y = 0 \text{ м/с}$, который соответствует условиям выдачи команды на отключение посадочного двигателя при касании щупа поверхности Луны;
- конечный параметр глissады, соответствующий касанию вертолета поверхности земли: $H = 0 \text{ м}$, $D = 0 \text{ м}$, $V = 0 \text{ км/ч}$, $V_y = 0 \text{ м/с}$.

На рис. 3 красным цветом обозначены предельно допустимые (зачетные) границы отклонений по высоте полета вертолета ($H_{зад} \pm 10\%$) при имитации спуска по рассматриваемой глissаде.

В ходе эксперимента устанавливается определенная последовательность действий космонавта: 1) при обнаружении площадки космонавту необходимо принять решение на посадку вертолета; 2) при достижении высоты 150 м и удаления до точки зависания 600 м перевести вертолет на снижение с заданной вертикальной скоростью 400 ф/мин (2 м/с); 3) с высоты примерно 50 м и на удалении 200 метров до точки зависания плавно уменьшить вертикальную и горизонтальную скорости с расчетом выполнения зависания над местом посадки; 4) выполнить зависание над точкой посадки на высоте 5 метров, а затем посадку на землю (в первом заходе) или зависание (во втором заходе), набор высоты и возвращение на аэродром базирования.

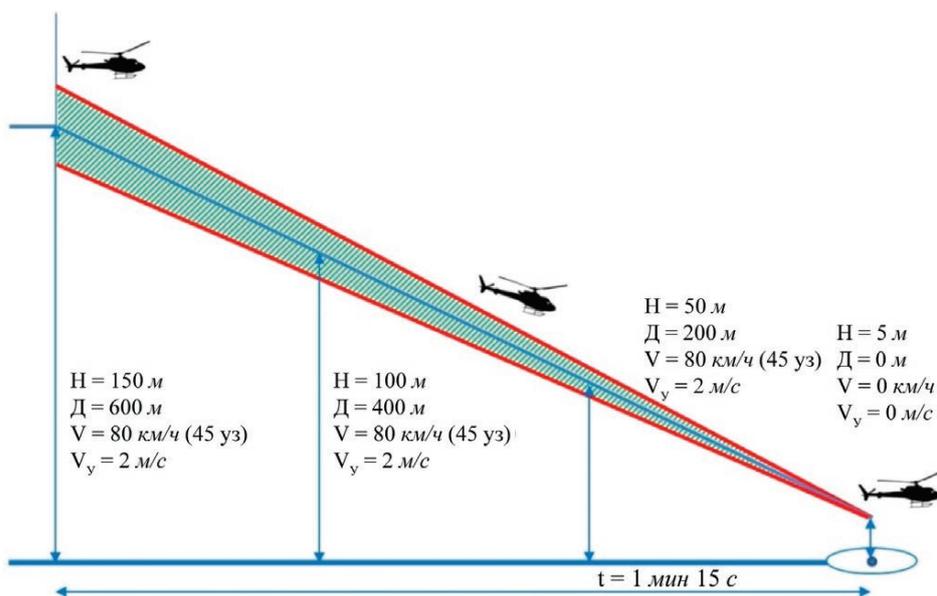


Рис. 3. Траектория полета на «ближнем участке глissады» при ручном управлении вертолетом

При подготовке к полетам на вертолете до выполнения послеполетных космических экспериментов (ППКЭ) [7] космонавт должен изучить и знать порядок выполнения ППКЭ, местоположение площадки относительно аэродрома и близлежащих ориентиров, ее размеры и конфигурацию, наличие, характер и высоту препятствий, ограничивающих ее, условия захода на посадку с различных направлений, состояние земной поверхности.

К выполнению экспериментов допускаются космонавты, прошедшие необходимый курс подготовки к полетам на вертолете, имеющие налет на нем не менее 40 ч и получившие допуск на полеты по управлению вертолетом с инструктором в кабине.

Порядок выполнения ППКЭ осуществляется в соответствии с циклограммой (рис. 2) и выглядит следующим образом: космонавт выполняет вертикальный взлет на вертолете с аэродрома базирования. Набирает заданную высоту и выполняет горизонтальный полет (около 15 км) к месту имитации снижения по «лунной» глиссаде. Полет к площадке и выход на исходный ориентир выполняется по установленной схеме на заданных высоте и скорости полета. При достижении точки входа на глиссаду космонавт выполняет поочередно два снижения по «лунной» глиссаде. Первое с посадкой на землю, с зависанием на высоте 5 м, второе без посадки с дальнейшим набором заданной высоты и возвращением в горизонтальном полете к аэродрому базирования.

Одним из важнейших методических вопросов при организации до- и послеполетных экспериментов на вертолете является вопрос о сроках проведения фоновых экспериментов. Для исключения влияния перерывов между датой проведения фоновых экспериментов и датой пуска реального ПКА на результаты оценивания исследуемых после полета на МКС операторских качеств космонавтов необходимо, в общем случае, фоновые эксперименты на вертолете проводить как можно ближе к старту ПКА. Конкретные рекомендации по данному вопросу в настоящее время разрабатываются с учетом дат предстоящих стартов ПКА, возможной продолжительности полетов экипажей на МКС, результатов освоения космонавтами программы СЛПКВ.

Оценивание действий космонавта

Оценивание операторских качеств космонавта предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе в ходе полета на вертолете инструктор, находящийся в правом кресле, обеспечивает измерение необходимых показателей (количественное и качественное), а на втором, после полета, полученные оценки обрабатываются и выносятся суждение о действиях космонавта.

На каждом этапе циклограммы эксперимента (рис. 2) будет разное число оцениваемых действий m_i . В целом за эксперимент их будет m

$$m = \sum_{i=1}^8 m_i. \quad (6)$$

Оценивание техники пилотирования и навигации выполняется по пятибалльной системе по всем режимам полета (Su): вертикальный взлет, набор высоты, висение, горизонтальный полет, имитация снижения по «лунной» глиссаде и др. Поскольку в каждом из них содержится несколько оцениваемых действий, число m в эксперименте может достигать нескольких десятков.

Так как реальный эксперимент сопровождается воздействием множества случайных факторов (2) и случайных погрешностей измерения, в результате фиксации инструктором действий космонавта в рассмотрение вводятся m параметров в виде *системы случайных величин* или *случайного вектора*. Для дополетных экспериментов этот случайный вектор можно представить в виде m – мерного вектора – строки

$$\hat{X}_{\langle m \rangle}^{\partial n} = \langle \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m \rangle, \quad (7)$$

для послеполетных экспериментов соответственно

$$\hat{Y}_{\langle m \rangle}^{nm} = \langle \hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_m \rangle, \quad (8)$$

где \hat{x}_i , \hat{y}_i – значения случайных величин, фиксируемые в соответствующих экспериментах, а $\hat{x}_i[i = 1(1)m]$ и $\hat{y}_i[i = 1(1)m]$ – их последовательности от 1 до m с шагом 1.

Для оценки числовых характеристик систем (7) и (8) можно найти математические ожидания

$$\begin{aligned} M_{\hat{X}_{\langle m \rangle}^{\partial n}} &= \langle M_{\hat{x}_1}, M_{\hat{x}_2}, \dots, M_{\hat{x}_m} \rangle, \\ M_{\hat{Y}_{\langle m \rangle}^{nm}} &= \langle M_{\hat{y}_1}, M_{\hat{y}_2}, \dots, M_{\hat{y}_m} \rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда, рассматривая оценки $\hat{X}_{\langle m \rangle}^{\partial n}$ и $\hat{Y}_{\langle m \rangle}^{nm}$, сделанные для k космонавтов, участвующих в экспериментах, как k независимых равноточных наблюдений, можно воспользоваться формулами для вычисления состоятельных и несмещенных оценок системы случайных величин [15, 16]. Для дополетных (фоновых) экспериментов запишем

$$\left. \begin{aligned} M_{\hat{x}_i}^{\partial n} &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_{ij}, \\ D_{\hat{x}_i}^{\partial n} &= \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (x_{ij} - M_{\hat{x}_i})^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Аналогично можно записать эти формулы и для системы послеполетных случайных величин

$$\left. \begin{aligned} M_{\hat{y}_i}^{nm} &= \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k y_{ij}, \\ D_{y_i}^{nm} &= \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^k (y_{ij} - M_{\hat{y}_i})^2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В обеих системах формул (10) и (11) $x_{ij}[i = 1(1)m, j = 1(1)k]$ и $y_{ij}[i = 1(1)m, j = 1(1)k]$ – значения, принятые случайной величиной \hat{x}_i или \hat{y}_i в j -м опыте (т.е. для k -го космонавта).

Для вычисления средних квадратических отношений $\sigma_{\hat{x}_i}$ и $\sigma_{\hat{y}_i}$ [$i = 1(1)m$] можно использовать формулу [15]

$$\sigma_{\hat{x}_i, \hat{y}_i} = k_{n-1} \sqrt{D_{x_i, y_i}}, \quad (12)$$

где k_{n-1} – табличный коэффициент, зависящий от объема выборки. Например, при участии 5 космонавтов в экспериментах он будет равен 1,051 [16].

Формулы (9–12) позволяют получить оценки положения и рассеяния случайных величин для каждого из m действий космонавта в любом до- и послеполетном эксперименте, что важно для детального исследования операторских качеств космонавта. При этом методы оценивания качества числовых характеристик случайных векторов будут отличаться для малых (при $k \leq 30$) и больших выборок [15, 16].

Применение зависимостей (9–12) также целесообразно при оценивании действий космонавтов при имитации снижения на вертолете по «лунным» глиссадам, поскольку значения m_i при этом не велики ($i \approx 4-5$), а значит объемы вычислений при оценках параметров (10–12), как и их сравнение для до- и послеполетных экспериментов, не будут громоздкими.

Если требуется оценивание действий космонавта в рамках отдельного этапа ($Z_{<k>}$) или режима полета (Su) на вертолете, можно воспользоваться методом ведущих компонент [16]. При этом ведущими компонентами $\hat{X}_{<z>}^{\partial n}$, $\hat{X}_{<su>}^{\partial n}$, $\hat{Y}_{<z>}^{\partial n}$, $\hat{Y}_{<su>}^{\partial n}$ будем называть те, которые наиболее полно отражают физическую сущность цели оценивания действий космонавта. Остальные компоненты будут ведомыми, на них накладываются ограничения и в явном виде они в дальнейших процедурах оценивания не фигурируют. В качестве примера ведущих компонент при оценивании техники пилотирования в режиме «висения» вертолета можно назвать «выдерживание высоты» и «сохранение места висения».

Для интегрального оценивания операторских качеств космонавта на всех $Z_{<k>}$ этапах циклограммы (в нашем случае их 8, см. рис. 2), формулы типа (9–12) не пригодны из-за различного физического смысла фиксируемых случайных величин, входящих в системы (7), (8). В таком случае, наиболее доступным способом оценивания будет применение пятибалльной шкалы

оценивания для каждого из m действий космонавта, вычисление среднего балла для каждого значения \hat{x}_i и \hat{y}_i по результатам участия в экспериментах k космонавтов и, в конечном итоге, получение средних баллов за весь эксперимент. После этого, в рамках ППКЭ, можно оценивать (сопоставлять) результаты до- и послеполетных экспериментов и делать заключение о влиянии космического полета на операторские качества космонавта.

Пятибалльная шкала формируется с учетом нормативов оценивания, принятых при обучении пилотированию вертолетов, ТТХ используемого вертолета, опыта подготовки космонавтов на тренажерах. В качестве примера в рамках данной работы в таблице 1 приведен фрагмент такой шкалы.

Таблица 1

Нормативы оценивания техники пилотирования и навигации (фрагмент)

| Наименование оцениваемых действий (n_i) | Оценка | | | |
|---|----------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| | отлично | хорошо | удовлетворительно | неудовлетворительно |
| Горизонтальный полет | | | | |
| Выдерживание скорости | Заданная ± 5 узлов | Заданная ± 8 узлов | Заданная ± 11 узлов | Отклонение от заданной более 11 узлов |
| Выдерживание направления | Заданное $\pm 3^\circ$ | Заданное $\pm 5^\circ$ | Заданное $\pm 7^\circ$ | Отклонение от заданного более 7° |
| Выдерживание высоты | Заданная ± 10 м | Заданная ± 20 м | Заданная ± 25 м | Отклонение от заданной более 25 м |
| Висение | | | | |
| Выдерживание высоты | Заданная ± 10 % | Заданная ± 15 % | Заданная ± 20 % | Отклонение от заданной более 20 % |
| Выдерживание направления | Заданное $\pm 2...3^\circ$ | Заданное $\pm 5^\circ$ | Заданное $\pm 7^\circ$ | Отклонение от заданного более $\pm 7^\circ$ |
| Сохранение места висения | Смещение до $\pm 0,5$ м | Смещение до ± 1 м | Смещение до ± 2 м | Смещение более ± 2 м |

Таким образом, по совокупности результатов, полученных в экспериментах, можно оценивать операторские качества космонавтов, вероятность успешных действий по управлению сложным динамическим комплексом (4) и, изменяя исходные данные экспериментов, исследовать влияние на профессиональные качества космонавтов различных условий и факторов (1), (2).

Медицинское и психофизиологическое обеспечение экспериментов

В ходе экспериментов выполняется медицинский контроль состояния космонавта и фиксируются его психофизиологические характеристики.

По каждому сеансу экспериментальных исследований готовятся следующие документы:

- медицинское заключение о допуске космонавта к исследованиям;
- информированное согласие космонавта на испытания с участием человека;

- данные объективного контроля здоровья и психофизиологического состояния космонавта в процессе исследования;
- техническое заключение о готовности вертолета к проведению исследований;
- протокол с результатами эксперимента.

По результатам экспериментов оцениваются психофизиологические характеристики космонавтов. Их значения рассчитываются на основании контроля и регистрации ряда физиологических параметров. В частности – значений частоты сердечных сокращений (ЧСС), частоты дыхания (ЧД), температуры заушной (Тз), массива кардиоинтервалов. Для снятия физиологических параметров в ходе полета на вертолете целесообразно использование портативной аппаратуры, не загромождающей кабину экипажа и не стесняющей действия космонавта при управлении летательным аппаратом.

Для данной задачи наиболее пригодны портативные бортовые исследовательские средства, с помощью которых производится регистрация психофизиологических характеристик космонавта на борту вертолета, а затем их апостериорная обработка [13, 14]. Рассмотренные методики регистрации и последующей оценки состояния пилота имеют техническую реализацию в виде аппаратно-программных средств для автоматической обработки психофизиологической информации. Особенностью функционирования предлагаемых способов является синхронизация записанных параметров пилота с бортовым временем воздушного судна.

Одним из эффективных направлений исследования функционального состояния оператора на тренажерах, исследовательских стендах, а также в испытательных полетах на различных типах летательных аппаратов в настоящее время считаются технологии ай-трекинга [21]. Они представляют обширную область прикладных исследований, основанных на анализе маршрутов движения глаз, поиска релевантных признаков, которые определяют когнитивную активность человека и используются им для формирования рабочих гипотез о состоянии рабочей среды и контролируемых в ней объектов, поиска и опознания объектов в составе сложной визуальной сцены. Для целей контроля состояния космонавта с использованием технологий ай-трекинга в экспериментах на вертолетах возможна более узкая постановка задачи выявления свойств переключения внимания и перемещения фокуса внимания в ситуации поиска релевантной информации в разных условиях зрительной деятельности.

Тестовые полеты

Тестовые полеты на вертолете состояли из двух этапов. На первом этапе летную отработку методики выполняли профессиональные пилоты вертолетов. На втором – космонавты, имеющие опыт космических полетов, но не имеющие опыта полетов на вертолетах (за исключением одного человека).

Все космонавты прошли необходимый курс обучения и были допущены к управлению вертолетом с инструктором в кабине.

Экспериментальные исследования проводились с декабря 2019 года по октябрь 2020 года. К отработке экспериментальной методики привлекались 7 опытных космонавтов и три пилота-профессионала. В числе космонавтов было два участника, имеющих большой опыт летной (авиационной) работы. В табл. 2 и табл. 3 приведены данные, характеризующие квалификационный статус космонавтов и профессиональных пилотов, участвовавших в экспериментах.

Таблица 2

Статус и опыт космонавтов – участников постановочных экспериментов на вертолете

| № п\п | Статус | Опыт (авиационный) | Примечание |
|-------|---|---|--|
| 1 | Инструктор-космонавт-испытатель | нет | Опыт полетов на Л-39 в отряде космонавтов по программе СЛПК (у всех) |
| 2 | Инструктор-космонавт-испытатель | нет | |
| 3 | Космонавт-испытатель | Ту-160 | |
| 4 | Инструктор-космонавт-испытатель | нет | |
| 5 | Инструктор-космонавт-испытатель | нет | |
| 6 | Космонавт-испытатель | нет | |
| 7 | Летчик-космонавт РФ, летчик-испытатель 1 класса | Опыт полетов на 44 видах самолетов и вертолетов | |

Таблица 3

Статус и опыт профессиональных пилотов – участников тестовых полетов

| № п\п | Статус | Опыт (авиационный) |
|-------|---|---|
| 1 | Пилот-инструктор, командир воздушного судна | Л-39, А-50, Ил-76, Ту-134, Ту-204, R-44, AS-350B3 |
| 2 | Командир воздушного судна | Л-39, R-44, AS-350B3 |
| 3 | Пилот-инструктор | МИ-8, МИ-24, R-44, AS-350B3, Ансат |

На рис. 4 иллюстрируется поэтапное прохождение глиссады в одном из тестовых полетов 25.01.2020 г. на вертолете «Eurocopter AS-350B3» (экипаж: К.В.Н., С.А.Н.). Погодные условия: облачность 9/7, Ннго 350 м, видимость 10 км, ветер 300°, 5/9 м/с, температура +2°, влажность 87 %.

В процессе отработки элементов глиссады снижения (табл. 4) для практической проверки расчетных параметров было выполнено более 20 полетов на оборудованную площадку приземления с различной подстилающей поверхностью. Общее время прохождения глиссады при соблюдении заданных параметров составляет 1 ч 15 мин.

Таблица 4

Заданные условия режимов глиссады

| Этап | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Дальность (м) | 600 | 400 | 200 | 0 |
| Высота (м) | 150 | 100 | 50 | 5 |
| Угол глиссады (град.) | 33 | 33 | 33 | 0 |
| Скорость снижения | 80 км/ч (45 уз) | 80 км/ч (45 уз) | 80 км/ч (45 уз) | 80 км/ч (45 уз) |
| Вертикальная скорость (м/с) | 2 | 2 | 2 | 0 |
| Примечание: вес воздушного судна, кг | 2250 | 2250 | 2250 | 2250 |



Фото 1. Вход в глиссаду:
 $H = 150 \text{ м}$, $D = 600 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$,
 $V_y = 0 \text{ м/с}$



Фото 2. Снижение по глиссаде:
 $H = 100 \text{ м}$, $D = 400 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$,
 $V_y = 2 \text{ м/с}$



Фото 3. Снижение по глиссаде:
 $H = 50 \text{ м}$, $D = 200 \text{ м}$, $V = 80 \text{ км/ч}$,
 $V_y = 2 \text{ м/с}$



Фото 4. Зависание над точкой посадки:
 $H = 5 \text{ м}$, $D = 0 \text{ м}$, $V = 0 \text{ км/ч}$,
 $V_y = 0 \text{ м/с}$

Рис. 4. Поэтапное прохождение глиссады вертолетом 20.01.2020 г.

Продолжительность тестовых полетов на вертолете составляла от 20 минут до 1 часа каждый с общим налетом 38 часов 21 минута.

В итоге проведения экспериментальных исследований на вертолете ожидаются результаты, позволяющие в совокупности с данными по другим видам ППКЭ получить новые знания о влиянии экстремальных условий космических полетов на качество профессиональной деятельности космонавтов. Эти знания планируется использовать как в фундаментальных (для изучения возможностей человека), так и практических целях. В практических приложениях подобные знания необходимы при отборе и подготовке космонавтов, разработке пилотируемых космических аппаратов, бортовой документации и управлении полетами.

Выводы

В целях создания научно-технических заделов для осуществления перспективных пилотируемых полетов в настоящей работе показаны возможности оценивания операторских качеств космонавтов с использованием вертолета. Предложены модель и методика исследований, которые экспериментально отработаны в ходе тестовых полетов с участием профессиональных пилотов вертолетов и космонавтов, имеющих опыт полетов в космос. Предложен способ использования вертолета в до- и послеполетных экспериментах с экипажами МКС для исследования операторских качеств космонавтов по управлению сложной динамической человеко-машинной системой после длительного воздействия на него невесомости и др. экстремальных факторов космических полетов. Даны рекомендации по оцениванию операторских качеств космонавтов по результатам экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анализ опыта создания специализированных технических средств подготовки космонавтов для отработки посадки на лунную поверхность / Бурдин Б.В., Крючков Б.И., Греков Н.С. // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», ФГБУ «НИИ ЦПК», Звездный городок, 13–15 ноября 2019 г. – С. 47–49.
- [2] Arslan H., Batiste S., Sture S. Engineering properties of lunar soilsimulant // Journal aerospace Engeneering. – 2010. – V. 23. – No 1. – pp. 70–83.
- [3] Опыт СССР и США в подготовке космонавтов и астронавтов к осуществлению посадки на Луну / Бурдин Б.В., Крючков Б.И., Солодников А.В. // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 1(34). – С. 86–103.
- [4] Филипенков С.Н. О выборе параметров системы ручного управления посадкой ПКА на поверхность Луны // Авиапанорама. – 2018. – № 4(130). – С. 18–25.
- [5] Берестов Л.М. Два метода обеспечения подобия динамики движения летающего вертолетного имитатора и модели летательного аппарата. Труды ЛИИ № 177, Жуковский. – 1969. – С. 5–21.

- [6] Горин В.В. Исследования по выбору некоторых параметров системы ручного управления посадкой космического аппарата на поверхность Луны. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., ЛИИ МАП, Жуковский. – 1972. – С. 4–161.
- [7] Экспериментальные исследования в интересах обеспечения полетов человека в дальний космос / Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Харламов М.М., Новицкий О.В., Тарелкин Е.И., Курицын А.А., Почуев В.И., Долгов П.П., Орешкин Г.Д. // Полет. – 2013. – № 8. – С. 126–135.
- [8] Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Курицын А.А., Харламов М.М. Пилотируемые полеты к Марсу: перспективы и результаты моделирования с участием экипажей МКС // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. Казань, Дайтона Бич. – 2014. – № 1(38). – Т. 19. – С. 1–21.
- [9] Бутов А.И. Рынок вертолетов гражданского назначения. Высшая школа экономики. – 2019. – 79 с.
- [10] Электронный ресурс: [http://www.heliclub.ru/helicopters/Eurocopter AS-350](http://www.heliclub.ru/helicopters/Eurocopter-AS-350) (дата обращения 27.01.2020 г.).
- [11] Онушкин Ю.П., Кочиш С.И. Аэродинамика, динамика полета и практическая аэродинамика. (Ч. 2, Вертолеты). Сызранский военный авиационный институт. Сызрань, 2004. – 162 с.
- [12] Новые подходы к организации специальной летной подготовки космонавтов / Крикалёв С.К., Токарев В.И., Крючков Б.И., Сорокин В.Г., Халиков М.Р., Сохин И.Г., Рыжиков С.Н. // Пилотируемые полеты в космос. – 2013. – № 4(9). – С. 82–91.
- [13] Кулешов С.В. Цифровой биометрический браслет контроля функционального состояния оператора // Научное приборостроение. Институт аналитического приборостроения РАН. – 2011. – № 2. – С. 63–66.
- [14] Мухин И.Е., Дворников М.В., Коптев Д.С. Подсистема контроля физиологического состояния пилота как одного из звеньев биотехнической системы эргатического типа «пилот–самолет–окружающая среда» // Proceedings of southwest state university. Series: control, computer engineering, information science medical instruments engineering. Изд-во: Юго-Западный государственный университет (Kursk). – 2017. – Т. 7. – № 4(25). – С. 59–69.
- [15] Элементы теории испытаний и контроля технических систем / Городецкий В.И., Дмитриев А.К., Марков В.М. и др.; под ред. Юсупова Р.М. – Л.: Энергия, 1978. – 192 с.
- [16] Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. – МО СССР, 1989. – 660 с.
- [17] By C.H. Woodling, Stanley Faber, John J. Van Bockel, Charles C. Olasky, Wayne K. Williams, John L.C. Mire, and James R. Homer // Apollo Experience Report-Simulation of Manned Space Flight For Crew Training / Manned Spacecraft Center Houston, Texas 77058. National Aeronautics and Space Administration Washin, D.C. March 1973. NASA TN D-7112.
- [18] Geller D.K., Christiansen D.R. Linear covariance analysis for powered lunar descent and landing // Journal Spacecraft and Rockets. – 2009. – V. 46. – No 6. – pp. 1231–1248.
- [19] Donald E. Hewes. Studies of Piloting Problems of One-Man Flying Units Operated in Simulated Lunar Gravity // Presented at the Second National Conference on Space Maintenance and Extravehicular Activities Las Vegas, Nevada August 6–8, 1968.

- [20] Lin Qing, Kang Zhiyu, Ren Jie, Zhao Qilo, Nie Hong Investigation on soft landing impact test of scale lunar lander model // *Journal Vibroengineering*. – 2014. – V. 16. – No 3. – pp. 1114–1139.
- [21] Бондарь Г.Г. Специализированный «ай-трекинг» без ай-трекера: экспериментальный подход к изучению когнитивных процессов / Бондарь Г.Г., Гусач Ю.И., Ивлев С.А. // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 12–2. – С. 324–328.

REFERENCES

- [1] Analyzing the Experience of Creating Dedicated Technical Equipment to Practice Moon Landing / Burdin B.V., Kryuchkov B.I., Grekov N.S. // *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference “Manned Space Flights”, FSBO “Gagarin R&T CTC”, Star City, November 13–15*, pp. 47–49.
- [2] Arslan H., Batiste S., Sture S. Engineering Properties of Lunar Soilsimulant // *Journal Aerospace Engineering*. – 2010. – V. 23. – No 1. – pp. 70–83.
- [3] Experience of the USSR and the USA in Training Cosmonauts and Astronauts for Landing on the Moon / Burdin B.V., Kryuchkov B.I., Solodnikov A.V. // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*. – 2020. – No 1 (34). – pp. 86–103.
- [4] Filipenkov S.N. Defining the Parameters of Manual Moon Landing // *Aviapanorama*. – 2018. – No 4(130). – pp. 18–25.
- [5] Berestov L.M. Two Methods of Ensuring the Similarity of the Motion Dynamics of a Flying Helicopter Simulator and an Aircraft Mock-up. *Trudy LII [Proceedings of FTI]*, No 177, Zhukovsky. – 1969. – pp. 5–21.
- [6] Gorin V.V. Studying Some Parameters of Manual Moon Landing. Dissertation for the Degree of Ph.D., LII MAP, Zhukovsky. – 1972. – pp. 4–161.
- [7] Experimental Research for the Benefit of Human Deep Space Exploration / Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kharlamov M.M., Novitsky O.V., Tarelkin E.I., Kuritsyn A.A., Pochuev V.I., Dolgov P.P., Oreshkin G.D. // *All-Russian Sc.-Tech. Journal Polyot [Flight]*. – 2013. – No 8. – pp. 126–135.
- [8] Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kuritsyn A.A., Kharlamov M.M. // *Actual Problems of Aviation and Aerospace Systems: Processes, Models, Experiments*. Kazan, Dayona Beach. – 2014. – No 1(38). – vol. 19. – pp. 1–21.
- [9] Butov A.I. *Civil Helicopter Market*. Higher School of Economics. – 2019. – 79 p.
- [10] Electronic resource: <http://www.heliclub.ru/helicopters/Eurocopter AS-350> (accessed date 27.01.2020).
- [11] Onushkin Yu.P., Kochish S.I. *Aerodynamics, Flight Dynamics and Practical Aerodynamics (Part 2, Helicopters)*. Syzran Military Aviation Institute. Syzran, 2004. – p. 162.
- [12] New Approaches to the Organization of Special Flying Training of Cosmonauts / Krikalev S.K., Tokarev V.I., Kryuchkov B.I., Sorokin V.G., Khalikov M.R., Sokhin I.G., Ryzhikov S.N. // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*. – 2013. – No 4(9). – pp. 82–91.
- [13] Kuleshov S.V. Digital Biometric Bracelet for Operator Functional State Monitoring // *Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]*. Institute for Analytical Instrumentation, RAS. – 2011. – No 2. – pp. 63–66.
- [14] Mukhin I.E., Dvornikov M.V., Koptev D.S. Subsystem of Monitoring Physiological State of Pilot as Any of the Links of the Biotechnical System of the Erguic Type “Pilot–Airplane–Environment” // *Proceedings of Southwest State University. Series:*

- Control, Computer Engineering, Information Science Medical Instruments Engineering. Southwestern State University Publ. (Kursk). – 2017. – Vol. 7. – No 4(25). – pp. 59–69.
- [15] Elements of the Theory of Testing and Control of Engineering Systems / Gorodetsky V.I., Dmitriev A.K., Markov V.M. et al.; edited by Yusupova R.M. – Leningrad: Energia, 1978. – p. 192.
- [16] Petukhov G.B. The Theory of the Efficiency of Purposeful Processes. Part 1. – Ministry of Defense of the USSR, 1989. – p. 660.
- [17] By C.H. Woodling, Stanley Faber, John J. Van Bockel, Charles C. Olasky, Wayne K. Williams, John L.C. Mire, and James R. Homer // Apollo Experience Report-Simulation of Manned Space Flight For Crew Training / Manned Spacecraft Center Houston, Texas 77058. National Aeronautics and Space Administration Washin, D.C. March 1973. NASA TN D-7112.
- [18] Geller D.K., Christiansen D.R. Linear Covariance Analysis for Powered Lunar Descent and Landing // Journal Spacecraft and Rockets. – 2009. – V. 46. – No 6. – pp. 1231–1248.
- [19] Donald E. Hewes. Studies of Piloting Problems of One-Man Flying Units Operated in Simulated Lunar Gravity // Presented at the Second National Conference on Space Maintenance and Extravehicular Activities Las Vegas, Nevada August 6–8, 1968.
- [20] Lin Qing, Kang Zhiyu, Ren Jie, Zhao Qilo, Nie Hong Investigation on Soft Landing Impact Test of Scale Lunar Lander Model // Journal Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16. – No 3. – pp. 1114–1139.
- [21] Bondar G.G. Specialized “I-tracking” Without an I-tracker: an Experimental Approach to the Study of Cognitive Processes / Bondar G.G., Gusach Yu.I., Ivlev S.A. // International Journal of Applied and Fundamental Research. – 2015. – No 12–2. – pp. 324–328.