

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТРЕНИРОВАННОСТИ КОСМОНАВТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДГОТОВКИ ЭКИПАЖЕЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.А. Курицын, В.И. Ярополов, А.А. Ковинский,
В.А. Копнин, И.В. Кутник

Докт. техн. наук, доцент А.А. Курицын; докт. техн. наук, профессор
В.И. Ярополов; канд. пед. наук А.А. Ковинский; В.А. Копнин; И.В. Кутник
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассмотрены методические положения по оценке подготовленности экипажей МКС к выполнению космического полета на борту МКС, которые включают в себя: показатели качества деятельности космонавтов, нормативные требования к деятельности космонавтов при проведении подготовки на тренажерах, методы оценки качества деятельности космонавтов, методы оценки тренированности космонавтов.

Ключевые слова: подготовка космонавтов, оценка деятельности космонавтов, тренажеры для подготовки космонавтов к полету на борту МКС.

Methods for Evaluation of Cosmonauts' Training Level When Training Crews of the International Space Station. A.A. Kuritsyn, V.I. Yaroplov, A.A. Kovinskiy, V.A. Kopnin, I.V. Kutnik

The paper considers the methodical provisions for evaluation the crew's training level for the space mission aboard the ISS that include: cosmonaut performance quality indicators, regulatory requirements for cosmonaut performance in the course of simulator-based training, methods for evaluation cosmonaut performance level, methods for evaluation the cosmonaut training level.

Keywords: cosmonaut training, evaluation of cosmonaut performance, simulators for training cosmonauts for flight aboard the ISS.

Деятельность экипажа на борту российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) в течение длительной экспедиции существенно отличается от деятельности, например, экипажа на борту транспортного пилотируемого корабля или экипажа самолета [1, 7, 8, 14, 15]. Общее количество взаимосвязанных между собой полетных операций и нештатных ситуаций на борту МКС, выполняемых с участием экипажа, достигает десятков тысяч [9]. Если первые орбитальные станции «Салют» включали в себя один орбитальный модуль и набор выполняемых операций на станции был очень ограничен, орбитальный комплекс «Мир» состоял уже из 7 модулей. МКС на данный момент представляет собой комплекс, включающий в себя российский и американский сегменты, европейский и японский модули и состоит из 18 модулей, двух внешних ферм и двух управляемых манипуляторов [3]. В ближайшие годы ожидается включение в состав

РС МКС еще трех модулей. Надо отметить, что система подготовки экипажей МКС на тренажерах станции в настоящее время представляет собой чрезвычайно сложную, зависящую от значительного количества факторов и связанную с множеством организаций систему [13]. Особое значение приобретает эффективность управления процессом подготовки космонавтов и, в том числе, разработка методов оценки тренированности космонавтов при проведении подготовки на тренажерах.

Показатели качества деятельности космонавтов

К настоящему времени получен значительный опыт подготовки космонавтов к выполнению космических полетов на борту орбитальных пилотируемых комплексов. Любая деятельность космонавта на борту РС МКС представляет собой комплекс взаимосвязанных последовательно осуществляемых действий e_i – операционных единиц деятельности (ОЕД), являющихся наименьшими элементами, до которых расчленяется деятельность [7, 8]. Для МКС таким элементом является полетная операция O_i , также к операционной единице деятельности относится и действие по выходу из НшС A_i .

Полетная операция O_i – это упорядоченная совокупность взаимосвязанных действий, направленных на достижение цели, обычно связанных с эксплуатацией одной системы станции, выполнением одного научного эксперимента.

Нештатная ситуация A_i – ситуация, сложившаяся в результате появления замечаний или отказов, приводящих к изменению штатной программы полета.

Теоретически каждая операционная единица деятельности e_i может быть оценена в процессе подготовки через показатель c_i . В процессе подготовки космонавта показатель c_i изменяется по мере обучения, описывая траекторию $c_i(t, V_i)$, где t_i – время, а V_i – объем подготовки по ОЕД e_i . В целом, процесс подготовки космонавта может быть описан вектором $C_{<n>}(t, V) = [c_1(t, V_1), c_2(t, V_2), \dots, c_n(t, V_n)]$, каждый элемент которого описывает свою траекторию, зависящую от конкретного содержания ОЕД e_i и объема V_i подготовки по нему.

Полетные операции $\{O_i\}$ и НшС $\{A_i\}$ могут объединяться по принадлежности к системе станции или группе систем либо по принципу управляемости. Таким образом, операционные единицы деятельности e_i могут быть объединены в группы $\{e_i\}_j = \Gamma_j$, что дает возможность воздействия инструктора на деятельность экипажа в процессе тренировок не только при выполнении отдельной операции, но группы операций (например, выполнение определенного объема динамических операций). Каждая группа операционных единиц также может быть оценена через показатель c_{Γ_j} , описывающий в процессе обучения траекторию $c_{\Gamma_j}(t, V_j)$, где V_j – объем подготовки по ГОЕ Γ_j . Данная траектория в силу управляемости может формироваться инструктором с учетом состояния и потребностей процесса обучения.

Периодичность воздействия инструктора на характеристики деятельности космонавта в ОЕД e_i (ГОЕ Γ_j) зависит от типа оценки c_{Γ_j} . Если оценка $c_i(c_{\Gamma_j})$ является детерминированной (например, длительность выполнения той или иной операции), то она может быть получена после реализации каждой единицы обучения (например, одной тренировки, одного предъявления НшС, однократного выполнения операции и т.п.), а, следовательно, после каждой такой единицы обучения может быть осуществлен акт управления деятельностью космонавта, если это вызвано рассогласованием между оценкой $c_i(c_{\Gamma_j})$ и нормативным требованием $n_i(n_{\Gamma_j})$ к ней. Таким образом, для управления процессом подготовки космонавта по каждой ОЕД e_i либо ГОЕ Γ_j необходимо иметь «трубку» (траекторию $n_i(t)$, $n_{\Gamma_j}(t)$) нормативных требований к деятельности по этой ОЕД (ГОЕ) в процессе обучения.

Если же оценка $c_i(c_{\Gamma_j})$ является вероятностной, то для ее получения необходимо осуществить несколько единиц обучения, т.е. реализовать объем подготовки, достаточный для получения оценки заданной точности. В этом случае возможности управления процессом подготовки существенно ухудшаются, т.к. частота воздействия на процесс обучения значительно снижается.

С учетом сказанного выше для реализации полностью управляемого процесса подготовки космонавта необходимо иметь априори вектор $H_{\Gamma<m>}(t) = [n_{\Gamma_1}(t), n_{\Gamma_2}(t), \dots, n_{\Gamma_m}(t)]$ нормативных требований к деятельности по всем группам операционных единиц, динамически изменяющийся в процессе обучения. Этот вектор требует двойного нормирования: по времени и в пространстве. В пространстве нормированию подлежит качество деятельности, а во времени – процесс обучения, т.е. изменение качества деятельности в процессе обучения. Реализация управляемого процесса подготовки космонавта дает динамический вектор $C_{\Gamma<m>}(t, V_{\Gamma}) = [c_{\Gamma_1}(t, V_{\Gamma_1}), c_{\Gamma_2}(t, V_{\Gamma_2}), \dots, c_{\Gamma_n}(t, V_{\Gamma_n})]$ оценок деятельности по всему комплексу ГОЕ.

Деятельность экипажа МКС в полете направлена на управление движением станции, эксплуатацию бортовых систем, выполнение определенной программы научных экспериментов, действия в нештатных и аварийных ситуациях и т.д. (рис. 1). Таким образом, она сама является составной частью общего процесса выполнения определенной последовательности задач, которые взаимосвязаны между собой и характеризуются начальными и конечными условиями их решения, определенными критериями оптимальности данных процессов и ограничениями, наложенными на этот процесс, в том числе и деятельность экипажа. Все это позволяет применительно к каждой из задач найти оптимальную программу управления, включая и алгоритм деятельности космонавтов, и показатели качества ее решения в условиях оптимума. Таким образом, оптимальное решение любой составляющей задачи управления по существу предъявляет требования к уровню подготовки экипажа в конце процесса обучения, т.е. к значению $H_{\Gamma<m>}(t)$ вектора нормативных требований при $t = T_{\Pi}$, где T_{Π} – время окончания процесса подготовки.



Рис. 1. Тренировка экипажа МКС на тренажере РС МКС

Данное требование (норма) является объективным. Метрика процесса обучения на тренажерах РС МКС зависит от множества характеристик самого этого процесса: методического мастерства инструкторов, качества тренажных средств подготовки космонавтов, организации процесса планирования подготовки, индивидуальных особенностей личностей космонавтов и т.п. Исходной позицией для этой метрики является начальное значение вектора $H_{\Gamma < m >}(t)$ при $t = 0$, которое зависит от подготовленности космонавта L_o , пришедшего на подготовку, а, следовательно, по своему существу является в значительной мере субъективным показателем (нормой).

Траектория процесса обученности космонавта, хотя и характеризуется определенными закономерностями, но в значительной мере отражает личные качества как космонавта, так и инструктора, т.е. также является в определенной мере субъективной характеристикой.

Формирование нормативных требований к деятельности космонавтов при проведении подготовки на тренажерах МКС

Все нормативные требования Nor к деятельности космонавтов по своему содержанию можно разделить на четыре группы (рис. 2): объемные Nor_o , параметрические Nor_p , критериальные Nor_{kr} и методические Nor_m нормативы.

Объемные нормативы Nor_o служат для обеспечения гарантированного качества подготовки космонавтов через задание объемных требований к ней. Они в свою очередь подразделяются на номенклатурные, количественные и номенклатурно-количественные.

Номенклатурные нормативы задают требования к объему подготовки V_{TP} путем перечисления названий проводимых занятий.



Рис. 2. Классификация нормативных требований к деятельности космонавтов при подготовке

Для подготовки экипажей МКС номенклатурными нормативами являются: «Перечень тренировок экипажа МКС на тренажерах», «Перечень полетных операций МКС $\{O_i\}$ », «Перечень нештатных ситуаций МКС $\{A_i\}$ » и т.п. [8].

Количественные нормативы определяют объем подготовки V_{TP} посредством указания количества проводимых занятий. К таким нормативам относятся: количество тренировок для экипажей МКС N_{TP} , нормативное число отработок полетной операции в процессе тренировок $n(O_i)$, нормативное число предьявлений нештатной $n(A_i)$ ситуации при проведении тренировок и т.п.

Номенклатурно-количественные нормативы регламентируют объем подготовки V_{TP} путем взаимоувязанного назначения состава проводимых тренировок и объемов подготовки по ним. Для подготовки экипажей МКС это: «Типовая программа подготовки экипажей МКС», «Программа подготовки конкретного экипажа МКС».

Параметрические нормативы Nor_p задают требования к деятельности космонавтов через значения параметров, определяющих ее качество. В эту группу входят следующие нормативы: допусковый статический, допусковый динамический, допусковый связанный, асимптотический.

Наиболее распространенным является допусковый статический норматив, задающий допуски на значение параметров. Например: расход рабочего тела V_{PT} на выполнение динамической операции, длительность выполнения полетной операции τO_p , длительность выхода из НшС τA_p , показатели касания при стыковке (скорость касания $\dot{\rho}$, величина промаха l) и т.п. [4, 5].

Допусковый динамический норматив определяет требования к подготовке через допуски на значения параметров, которые функционально зависят от значений других параметров. В качестве примера такого норматива может рассматриваться зависимость значения скорости сближения $\dot{\rho}$ от дальности между космическими аппаратами ρ .

Допусковый связанный норматив характерен тем, что здесь во взаимосвязи находятся два или более допусков на значения параметров, определяющих качество деятельности. Примером в данном случае может служить взаимосвязь вибрации станции при выполнении динамических операций МКС с качеством выполнения технологического научного эксперимента.

В асимптотическом нормативе задается предельное значение того или иного параметра, которое можно достичь при выполнении условий оптимального управления. Например: минимальный расход рабочего тела V_{PTmin} при проведении перестыковки, минимальное время реагирования на аварию τA_{imin} и т.п.

Критериальные нормативы Nor_{kr} распространяются на оценки качества деятельности космонавтов (преимущественно на принимаемые решения) в оптимизационной постановке. К их числу относятся: лексикографические, бинарные и дискретно-весовые нормативы.

Лексикографические нормативы задают требования к деятельности через строго упорядоченные по приоритету варианты действий космонавтов. Нормативами для деятельности экипажа на борту МКС являются: определенная последовательность действий при выполнении полетных процедур с использованием бортовой документации, упорядоченные по приоритету варианты продолжения космического полета в НшС, приоритетность информации в докладе космонавтов на Землю и т.п.

Бинарные нормативы относятся к двухальтернативным требованиям, предъявляемым к качеству деятельности космонавтов. К ним относятся: возможность выполнения того или иного варианта плана полета, выдача управляющих воздействий при дискретном управлении системами МКС, правильность выдачи комментария по связи и т.п.

Дискретно-весовые нормативы применяются для нормирования деятельности космонавтов в тех случаях, когда варианты действий космонавтов не требуют упорядочения по приоритету, но требуют упорядочения по их качеству (значимости). К данной категории относится полнота учета факторов при планировании деятельности на борту МКС.

Методические нормативы Nor_m относятся к требованиям, предъявляемым к характеру и процессу деятельности, и включают в себя: организационные, алгоритмические, условные, терминальные, траекторные и программные нормативы.

Организационные нормативы задают требования к организации деятельности экипажа МКС. К ним относятся: распределение работ на борту между членами экипажа станции в соответствии с обязанностями, распределение информации (по содержанию) между членами экипажа для доклада на Землю и т.п.

Алгоритмические нормативы определяют требования к алгоритмам деятельности экипажа. Данными нормативами являются: алгоритм действий экипажа в аварийной ситуации, способ выхода из нештатной ситуации, алгоритм выполнения полетной операции в штатных режимах полета и т.п.

Условные нормативы регламентируют ограничения, которые должны быть выполнены космонавтами при осуществлении деятельности. К данным нормативам относятся: достижение оптимальных условий освещенности космического аппарата (КА) при выполнении стыковки, соблюдение условий фотосъемки Земли и т.д.

Терминальные нормативы задают конечные условия выполнения деятельности. Данным нормативом является осуществление срочного покидания станции при аварии (срочный спуск).

Траекторные нормативы применяются для нормирования траектории движения КА при выполнении операций ручного управления движением. При этом задается эталонная траектория движения КА по условиям баллистики и принятого закона управления. На борту МКС к данным нормативам относятся нормативы проведения стыковки, расстыковки и перестыковки различных КА.

Программные нормативы определяют требования, предъявляемые к деятельности по управлению программой полета МКС. К ним относятся следующие нормативы: выполнение программы полета МКС, учет факторов, влияющих на выполнение программы полета (сеансов связи, зон света и тени и т.п.) [14].

Приведенные выше нормативы отражают и охватывают практически все компоненты деятельности космонавтов на борту МКС как по полноте их отработки, так и по структуре, содержанию и качеству деятельности, включая этап принятия решений, и формируют вектор $H_{\Gamma < m >}(t) = [H_{\Gamma 1}(t), H_{\Gamma 2}(t), \dots, H_{\Gamma m}(t)]$ нормативных требований к деятельности по всем группам операционных единиц.

Опыт подготовки экипажей МКС показывает, что объемные нормативы Nor_o используются для оценки программы подготовки; для оценки качества деятельности космонавтов в ходе проведения тренировки и формирования оценок, выставляемых по итогам проведения тренировок (в том числе экзаменационных), применяются параметрические Nor_p , критериальные Nor_{kr} и методические Nor_m . При этом самыми распространенными являются: параметрические нормативы Nor_p , которые наиболее применимы для тренировок на специализированных тренажерах (например, требования по стыковке) и комплексных тренажерах (ограничения по длительности выполнения полетной операции); критериальные нормативы Nor_{kr} чаще используются при оценке деятельности космонавтов в процессе комплексных тренировок, что связано с необходимостью выполнения определенной последовательности действий в соответствии с бортовой документацией.

Методы оценки качества деятельности космонавтов

Одним из важнейших принципов оценивания качества деятельности космонавтов является требование, чтобы все оценки базировались на фактах, то есть на объективном анализе их практической деятельности [4–7].

Для оценки качества деятельности космонавтов в процессе полета или подготовки на тренажерах МКС наиболее предпочтительными являются следующие 3 метода оценивания:

- получение вероятностной оценки $c_i(c_{Г_j})$ как результата осуществления нескольких повторяемых единиц обучения;
- получения оценок $c_i(c_{Г_j})$, оценки за тренировку $K_{тр}$ на основе отклонений от штатной деятельности;
- на основе экспертных оценок.

Получение вероятностной оценки

Как уже отмечалось выше, получение вероятностной оценки $c_i(c_{Г_j})$ выполнения конкретной ОЕД e_i (ГОЕ $Г_j$) приводит к ухудшению возможности управления процессом подготовки в связи с необходимостью применения нескольких повторяемых единиц обучения. Данный метод оценивания применим при проведении подготовки на специализированных тренажерах МКС по отработке конкретной операции (отработка телеоператорного режима стыковки, операции с робототехникой, выполнение прикладного эксперимента, связанного с выдерживанием точностных характеристик и т.п.) (рис. 3).

Вероятностная оценка выполнения i -й операции будет равна [4, 5]:

$$c_i = P(O_i), \quad (1)$$

$$P_i(O_i) = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где m – число результатов, соответствующих нормативным требованиям;
 n – общее число выполненных упражнений.

Для получения итоговой вероятностной оценки применимы все положения теории вероятностей.



Рис. 3. Космонавты О.Д. Кононенко и А.Н. Шкаплеров отработывают телеоператорный режим стыковки

Получение оценки на основе отклонений норм от штатной деятельности [7, 8, 13]

В качестве критерия измерения качества деятельности космонавтов принимается мера (амплитуда) отклонения от нормативных требований к деятельности (нормы штатной деятельности). Любое несоответствие в работе экипажа вектору $H_{\Gamma < m >}(t) = [n_{\Gamma 1}(t), n_{\Gamma 2}(t), \dots, n_{\Gamma m}(t)]$ нормативных требований к деятельности по всем группам операционных единиц определяется как отклонение от нормы штатной деятельности.

В настоящее время при проведении подготовки экипажей МКС на комплексных тренажерах используется оценивание деятельности космонавтов на основе метода отклонений от норм штатной деятельности.

Выбор оценок степени отклонения от норм результатов и характеристик процессов деятельности экипажей МКС обусловлен следующими соображениями. Во-первых, отклонение от нормы является мерой дезадаптации или дезорганизации системы «ЦУП–экипаж–МКС» и может использоваться для характеристики ее свойств, в частности, для оценки эффективности деятельности экипажа. Во-вторых, множество критериев оценивания можно свести к одному, что позволяет при задании универсальных шкал оценивания мер отклонений с единых позиций оценивать и эргатические, и технические элементы системы. В-третьих, как показывает опыт анализа космических полетов, отклонения от норм легко наблюдаемы – процедура регистрации факта наличия отклонений в системе в настоящее время достаточно отработана и не вызывает особых затруднений. В-четвертых, данный способ оценивания позволяет осуществлять акт управления деятельностью космонавта после каждого выполнения ОЕД e_i (ГОЕ Γ_j), если это вызвано рассогласованием между оценкой $c_i(c_{\Gamma j})$ и нормативным требованием $n_i(n_{\Gamma j})$ к ней [7, 8].

Деятельность космонавтов характеризуется способностью поддерживать качество результатов деятельности как в штатных условиях, так и в условиях возмущающего воздействия разнообразных ситуативных факторов. Целевые возможности характеризуют потенциальные возможности космонавтов достигать основных целей программы полета МКС в конкретных условиях. Они определяются, в первую очередь, качеством подготовленности космонавтов, их психофизиологическим состоянием, физическими возможностями. В этом случае мерой отклонения результата от нормы считается цена (или ущерб) этого отклонения для функционирования МКС. Для выполнения процедур выявления и последующей классификации отклонений от нормы разработана система определения отклонений на основе классификатора отклонений от нормы.

В соответствии с классификатором отклонения от нормы штатной деятельности экипажа МКС можно подразделить на два вида: ошибки и замечания [7, 8].

Ошибка – отклонение от нормы штатной деятельности, влияющее на выполнение программы полета.

Замечание – отклонение от нормы штатной деятельности, не влияющее на выполнение программы полета.

Каждое отклонение от нормы штатной деятельности экипажа (ошибка или замечание) оценивается в штрафных баллах.

По своей значимости (весовому значению), выраженной в количестве штрафных баллов, ошибки (весовое значение ошибки – d) и замечания (весовое значение замечания – h) на основе опыта подготовки космонавтов подразделяются следующим образом:

- ошибки:
 - ошибки, приводящие к «гибели» экипажа или станции в целом (очень существенные) – $d_1 = 100$ баллов;
 - ошибки, приводящие к срыву программы полета и досрочному (срочному) спуску (существенные) – $d_2 = 50$ баллов;
 - ошибки, приводящие к срыву динамического режима или космического эксперимента с возможностью его повторной реализации (малосущественные) – $d_3 = 25$ баллов;
 - ошибки, приводящие к невыполнению отдельной полетной операции (процедуры), а также создание условий, критичных для работы приборов, систем станции и работоспособности экипажа (несущественные) – $d_4 = 10$ баллов.
- замечания:
 - замечания как выход за норму частных критериев (существенные) – $h_1 = 5$ баллов;
 - замечания как неоптимальные действия (несущественные) – $h_2 = 1$ балл.

Таким образом, данный способ оценивания предусматривает оценку качества деятельности и получение оценок c_i ($c_{Г_j}$) в виде начисления штрафных баллов в случае отклонения от нормы при выполнении операционной единицы деятельности e_i .

Оценки за выполнение ОЕД e_i (ГОЕ G_j) в процессе тренировки используются для формирования управляющих воздействий, корректирующих воздействий при управлении подготовкой экипажей на тренажерах.

Оценивание деятельности на основе экспертных оценок

Вероятностная оценка и оценка на основе метода отклонений не всегда позволяют идентифицировать «узкие» места в подготовке экипажей МКС, выявлять качество отдельных операторских функций космонавта. В таких случаях возможно экспертное оценивание качества деятельности экипажа. В основе данного метода лежит оценка несколькими специалистами по подготовке космонавтов (экспертами) операторских функций космонавтов, сделанная по результатам наблюдений действий экипажа [7, 10, 11]. Для оценивания целесообразно ввести пятиуровневую классификацию операторских функций экипажа [7]. Первый уровень структуры включает в себя следующие классы операторских функций (табл. 1):

1. Типовые функции контроля и управления ОПК.
2. Действия в нештатных ситуациях.
3. Организация деятельности экипажа.
4. Взаимодействие в экипаже.
5. Взаимодействие экипажа с ЦУПом.

Следующие нижестоящие уровни детализируют содержание операторских функций более высокого уровня. Эксперту достаточно оценить качество операторских функций самого нижнего уровня, оценки по вышестоящим уровням рассчитываются автоматически. Оценки выставляются по четырехбалльной системе.

Основными недостатками данного метода оценивания являются:

- невозможность оценить все операторские функции на данной тренировке, так как тренировка представляет собой только набор упражнений, операции по всем операторским функциям в одну тренировку внести невозможно;
- субъективность оценивания;
- невозможность использовать субъективные оценки в качестве управляющих параметров подготовки экипажей МКС.

Таблица 1

Пример образца таблицы оценивания операторских функций экипажа МКС

Операторские функции экипажа	Оценка
1 Типовые функции контроля и управления	
1.1 Умение работать по БД	
1.1.1 Умение найти нужный раздел БД	
1.1.2 Умение использовать общие правила БД	
1.1.3 Умение читать БД	
1.1.4 Умение выполнять последовательность действий по БД	
1.2 Функции контроля	
1.2.1 Контроль состояния систем ПКА и окружающей среды	
1.2.1.1 Контроль состояния систем по транспарантам ПСС	
1.2.1.2 Контроль параметров систем по форматам	
1.2.1.3 Контроль состояния систем по СОИ отдельных приборов	
1.2.1.4 Неинструментальный контроль	
1.2.2 Контроль параметров движения ПКА	
1.2.2.1 Контроль ориентации ПКА	
1.2.2.2 Контроль параметров относительного движения ТК и станции	
1.3 Функции управления	
1.3.1 Выдача дискретных команд	
1.3.1.1 Выдача команд, процедур с Laptop	
1.3.1.2 Выдача команд с автономных пультов, блоков	
1.3.2 Работа с люками	
1.3.2.1 Работа с переходными люками	
1.3.2.1.1 Ручное ОПЛ/ЗПЛ	
1.3.2.1.2 Проверка герметичности ПЛ	
1.3.2.1.3 Проверка герметичности стыка	
1.3.2.1.4 Выравнивание давлений	

Таблица 1 (окончание)

Операторские функции экипажа	Оценка
1.4 Функции технического обслуживания и ремонта	
1.4.1 Плановое, регулярное ТО (многократно в течение полета)	
1.4.2 Внеплановые ТОР	
1.4.3 Работа с системой инвентаризации	
1.5 Функции оператора-исследователя при проведении НЭ	
2 Действия в НшС	
2.1 Обнаружение и распознавание отклонений в состоянии систем и НА	
2.2 Принятие адекватных решений по выходу из НшС	
2.3 Реализация принятых решений по выходу из НшС	
3 Организация деятельности экипажа	
3.1 Прогноз развития событий	
3.2 Планирование действий экипажа в целом	
3.3 Распределение задач между членами экипажа	
3.4 Контроль исполнения	
4 Взаимодействие в экипаже	
4.1 Командирское руководство	
4.2 Распределение ролей и функций в экипаже	
4.3 Согласованность действий членов экипажа	
4.4 Взаимоконтроль действий	
5 Взаимодействие с ЦУПом	
5.1 Прием информации из ЦУПа	
5.1.1 Прием данных по формам р/г	
5.1.2 Прием данных на режим	
5.1.3 Прием массива уставок	
5.1.4 Прием рекомендаций ЦУПа	
5.2 Передача информации в ЦУП	
5.2.1 Доклады в с/с	
5.2.2 Репортажи, квитанции по действиям	
5.2.3 Передача данных по формам р/г	
5.2.4 Передача массива данных	
5.3 Оперативные ДпоУЗ	
5.3.1 Ввод массива уставочных данных	
5.3.2 Выдача последовательности команд (в с/с)	
5.3.3 Выдача последовательности команд в заданное время (вне с/с)	
5.3.4 Реализация плана действий, рекомендованного ЦУПом	

Данный метод оценивания наиболее применим для получения итоговой оценки тренированности экипажей МКС по результатам проведения подготовки.

Методы оценки тренированности

Для определения оценки тренированности космонавтов к выполнению программы космического полета рассмотрим психофизиологические характеристики оператора. Среди этих характеристик для экипажей МКС наибольшее значение имеют передаточные функции по зрительному и слуховому каналам.

Передаточные функции космонавта определяются его психофизиологическими особенностями и свойствами контура управления, в котором он работает. Так как МКС можно отнести к стационарному контуру управления, то передаточная функция космонавта при восприятии информации по зрительному и слуховому каналам и передачи сигналов на органы управления имеет вид [4–6]:

$$W_o(s) = \frac{ke^{-as}(a\tau_1s + 1)}{(\tau_1s + 1)(\tau_2s + 1)}, \quad (3)$$

где k – коэффициент усиления; τ – время формирования ответной реакции на входной сигнал; τ_1 и τ_2 – постоянные времени, характеризующие передачу сигналов по нервным волокнам; a – коэффициент, учитывающий тренированность, опыт, тренировку, утомление, вид задания.

Показано [6], что для разных частот воспринимаемого сигнала параметры передаточной функции принимают различные значения, что указывает на адаптивные свойства оператора. Оператор, работая в контуре управления, адаптируется путем изменения параметров τ_1 , τ_2 и k , стремясь к минимизации средней квадратичной ошибки и поддержанию запаса по фазе порядка 40° .

Представленная передаточная функция является математической моделью деятельности космонавта в контуре управления МКС или тренажера. Знания, навыки и умения, необходимые для правильной эксплуатации систем станции, приобретаются, в том числе, в ходе подготовки на тренажерах.

При рассмотрении передаточной функции (3) степень тренированности космонавта характеризуется коэффициентом a . Этот коэффициент в процессе обучения возрастает и достигает некоторого предельного значения a_{TP} , при котором процесс обучения считается законченным, далее требуется осуществлять поддержание степени тренированности на необходимом уровне. Нарастание степени тренированности в процессе подготовки при выполнении определенного вида деятельности происходит по экспоненциальному закону [4].

Передаточная функция, характеризующая процесс подготовки в соответствии с экспериментальными данными, может быть представлена в виде инерциального звена:

$$W_{об}(s) = \frac{1}{(\tau_o s + 1)}, \quad (4)$$

где τ_o – постоянная времени обучения, составляющая в среднем 25 дней.

Таким образом, коэффициент тренированности в соответствии с передаточной функцией $W_{об}(s)$ можно представить в виде:

$$a(s) = \frac{a_o}{(\tau_o s + 1)}, \quad (5)$$

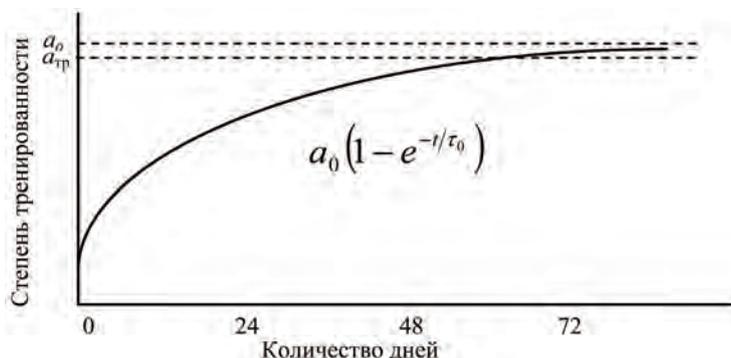


Рис. 4. Характеристика степени тренированности космонавта

На рисунке 4 представлен график процесса нарастания степени тренированности как функции времени [4].

В прямом виде определить степень тренированности космонавта к выполнению программы полета, представляющей собой совокупность нескольких тысяч полетных операций и нештатных ситуаций, весьма проблематично.

В общем случае, при изучении материала, который можно представить в виде дискретных, приблизительно равных порций, степень обученности (тренированности) может характеризоваться статистической вероятностью, определяемой как отношение числа усвоенных порций m к общему количеству преподносимых порций N [4, 5], которую можно определить:

$$P_{об} = m/N. \quad (6)$$

В конкретном случае космонавт выполнит операцию правильно (1) или неправильно (0), но эти величины не являются вероятностными, так как относятся к одной реализации. При рассмотрении абстрактной совокупности обучаемых с одинаковым начальным уровнем тренированности, то вероятность $P_{коб}$ того, что космонавт выполнит безошибочно k -ю операцию будет определяться как процент обучающихся из данной совокупности, выполнивших правильно k -ю операцию.

Вероятность безошибочной работы операторов при выполнении i -й операции будет равна:

$$P_i(T_i) = 1 - n_o(T_i)/N_o, \quad (7)$$

где $n_o(T_i)$ – число неправильных выполнений операций за время T_i , N_o – общее количество сделанных операций.

Система баллов является наиболее распространенной при оценке обучения. Если космонавт получил l баллов в N -балльной системе за определенный период, то с известным приближением можно сказать, что вероятность того, что космонавт выполнит i -ю операцию, к которой готовился, равна:

$$P_i(O_i) = l/N. \quad (8)$$

При использовании системы «штрафных баллов» вероятность выполнения операции, соответственно, будет равна:

$$P_i(O_i) = 1 - l_{ump}/N. \quad (9)$$

При подготовке космонавтов на комплексных и специализированных тренажерах может возникнуть задача прогнозирования подготовки, для чего могут быть использованы интуитивные модели получения априорных оценок. Статистика оценок космонавтов при выполнении программы тренировок может быть записана в виде матрицы [12]:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n-1} & \alpha_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{k1} & \alpha_{k2} & \dots & \alpha_{kn-1} & \alpha_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \dots & \alpha_{mn-1} & \alpha_{mj} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где α_{ij} – оценка i -го космонавта на j -й тренировке; α_{ij} ($i = 1, \dots, k-1; j = 1, \dots, n$), α_{ij} ($i = k, \dots, m; j = 1, \dots, n-1$) – известные оценки по тренировкам, α_{in} ($i = k, \dots, m$) – оценки i -го космонавта на j -й тренировке, которые требуется определить априори.

В качестве показателей тренированности космонавтов и сложности проводимых тренировок могут использоваться [10, 11]:

математическое ожидание оценок i -го космонавта по $n-1$ тренировкам:

$$\mu_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \alpha_{ij}; \quad (11)$$

математическое ожидание оценок $k-1$ космонавтов на n -й тренировке:

$$v_n = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{in}; \quad (12)$$

математическое ожидание оценок $k-1$ космонавтов по n тренировкам:

$$\beta = \frac{1}{n(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}. \quad (13)$$

Исходя из методов оценки деятельности, представленных выше, представляется возможным определять оценку тренированности космонавтов к выполнению программы космического полета по результатам проведения тренировок на тренажерах МКС с использованием метода отклонений от штатной деятельности либо с использованием метода экспертных оценок.

Оценка тренированности космонавтов к выполнению программы космического полета с использованием метода отклонений от штатной деятельности

В основу технологии оценки действий экипажа в процессе тренировки положен метод, основанный на формировании перечня отклонений от нормы штатной деятельности, допущенных экипажем в процессе тренировки, и подсчета их суммарного штрафного балла $\sum_{ш}$ (количество суммарных штрафных баллов). На основе суммарного штрафного балла за тренировку $\sum_{ш}$ определяется оценка деятельности экипажа за тренировку $K_{тр}$.

Суммарный штрафной балл $\sum_{ш}$ или количество суммарных штрафных баллов, полученных экипажем за тренировку, определяется как результат суммирования весовых значений $d_1, d_2, d_3, d_4, h_1, h_2$ всех допущенных экипажем ошибок и замечаний за тренировку.

В результате идентификации и классификации отклонений в деятельности экипажа на тренировке устанавливаются и распределяются по группам все допущенные ошибки и замечания, определяется их общее количество по типам ошибок $I(d_1), I(d_2), I(d_3), I(d_4)$ и типам замечаний $J(h_1), J(h_2)$.

Суммарный штрафной балл определяется по формуле:

$$\sum_{ш} = I(d_1) d_1 + I(d_2) d_2 + I(d_3) d_3 + I(d_4) d_4 + J(h_1) h_1 + J(h_2) h_2. \quad (14)$$

Пример оценки деятельности космонавтов в процессе тренировки на комплексных тренажерах РС МКС в Центре подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина

В настоящее время деятельность экипажа в процессе тренировки на комплексных тренажерах РС МКС оценивается по четырехбалльной системе от 5,00 до 2,00, с точностью до двух знаков после запятой по критериям, приведенным в таблице 2 [8].

В случае ошибки экипажа при выполнении полетной операции (нештатной ситуации) инструктором принимается решение о перепланировании данной тренировки и повторном проведении данной операции либо изменении программы подготовки и внесении данной операции (нештатной ситуации) в программу следующей тренировки.

Таблица 2

Пример оценки деятельности космонавтов в процессе тренировки

Оценка $K_{тр}$	Критерии выставления оценки от суммарного штрафного балла
5,00	$\sum_{ш(5)} = 5$
4,00	$\sum_{ш(4)} = 35$
3,00	$\sum_{ш(3)} = 45$
2,00	$\sum_{ш(2)} = 55$

Если суммарный штрафной балл за тренировку $\sum_{ш}$ больше 55 баллов, то оценка за тренировку $K_{ТР}$ равна 2,00. Если суммарный штрафной балл за тренировку $\sum_{ш}$ находится между приведенными в таблице значениями, оценка за тренировку $K_{ТР}$ рассчитывается по дополнительным формулам.

При положительных результатах оценки деятельности экипажа по всем тренировкам ($K_{ТР} \geq 4$) итоговая оценка по всем тренировкам определяется по формуле:

$$K_{ИТ} = \sum K_{ТРi} / n, \quad (15)$$

где $K_{ТРi}$ – оценка деятельности экипажа на i -й тренировке; n – общее количество тренировок.

Оценка тренированности космонавтов к выполнению программы космического полета с использованием метода экспертных оценок

Как было отмечено ранее, в основе данного способа оценивания лежит оценка несколькими специалистами по подготовке космонавтов (экспертами) операторских функций космонавтов, сделанная по результатам наблюдений действий экипажа в процессе тренировок.

Оценка тренированности определяется как усредненное значение оценок по классам операторских функций (табл. 1). Обычно главным затруднением использования данного метода является отсутствие необходимого числа экспертов-специалистов по всем системам МКС, участвующих в проведении тренировок. Участие в тренировках экипажей разных специалистов приводит к неточностям в сравнении результатов оценивания космонавтов.

Выводы

Представленные в статье классификация и состав нормативных требований к деятельности космонавтов в процессе подготовки на тренажерах МКС позволяют решать задачу управления подготовкой космонавтов, исходя из требований к уровню подготовки экипажа в конце процесса обучения.

Представлены методы оценки деятельности космонавтов для управления процессом подготовки на тренажерах МКС. Опыт подготовки экипажей МКС показал, что метод, основанный на использовании отклонений от штатной деятельности, позволяет осуществлять управление процессом подготовки экипажей на комплексных и специализированных тренажерах на основе нормативных требований к деятельности космонавтов в процессе тренировки. В качестве критерия измерения качества деятельности космонавтов при использовании метода отклонений от штатной деятельности принимается мера (амплитуда) отклонения от нормативных требований к деятельности (нормы штатной деятельности).

Рассмотрены методы определения степени тренированности космонавтов на основе предложенных методов оценивания деятельности. Для опре-

деления степени тренированности могут использоваться: математическое ожидание оценок $K_{тр}$, получаемых экипажем в процессе тренировок, интуитивные модели получения априорных оценок.

Данные подходы по определению степени тренированности космонавтов могут быть использованы и при подготовке к космическому полету экипажей перспективных КА, в том числе и экипажей лунных экспедиций [2].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Курицын А.А., Дмитриев В.Н. Создание, реализация и развитие технологии многосегментной подготовки к полету экипажей Международной космической станции // Пилотируемые полеты в космос. – 2017. – № 4(25). – ISSN 2226-7298.
- [2] Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И., Сосюрка Ю.Б., Троицкий С.С., Долгов П.П. Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий // Пилотируемые полеты в космос. – № 2(19). – 2016. – С. 35–57.
- [3] История развития отечественной пилотируемой космонавтики. Под ред. Бармина И.В. – М.: ООО «Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2015. – 752 с.
- [4] Авиационные тренажеры / В.А. Боднер, Р.А. Закиров, И.И. Смирнова. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
- [5] Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов летательных аппаратов / Л.С. Демин, Ю.Г. Жуковский, А.П. Семенин и др.; Под ред. В.Е. Шукшунова. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
- [6] Кубасов В.Н. и др. Профессиональная подготовка космонавтов. – М.: Машиностроение, 1985. – 97 с.
- [7] Сохин И.Г. Комплексная подготовка экипажей МКС как управляемый технологический процесс. Монография. – Звездный городок Московской области: РГНИИЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2007. – 178 с.
- [8] Курицын А.А. Методы и средства автоматизированного управления технологическим процессом комплексной подготовки экипажей орбитальных пилотируемых комплексов. Монография. – Звездный городок Московской области: ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2011. – 280 с.
- [9] Соловьев В.А. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Соловьев, Л.Н. Лысенко, В.Е. Любинский; под общей редакцией Л.Н. Лысенко. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 902 с. – ISBN 978-5-7038-3350-6.
- [10] Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 584 с. – ISBN 5-7038-2893-7.
- [11] Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 144 с. – ISBN 5-9221-0274-5.
- [12] Чернскутов А.И. Оценка тренированности летчика с помощью матриц вероятностей перехода / Чернскутов А.И., Жиров А.Ю. – Тем. науч. сб. № 2, Монино, ВВА им. Ю.А. Гагарина, 2003.
- [13] Определение основных управляющих параметров подготовки экипажей Международной космической станции на комплексных и специализированных тренажерах / Курицын А.А., Онуфриенко Ю.И., Ковинский А.А., Копнин В.А. // Пилотируемые полеты в космос. – 2016. – № 3(20). – ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина». – ISSN 2226-7298.
- [14] Курицын А.А., Кондрат А.И., Рыбкин Д.Е., Копнин В.А., Корзун Е.И., Мисуркин А.А. Основные задачи подготовки и результаты деятельности экипажа

МКС-53/54 при выполнении программы космического полета // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 3(28). – С. 5–16. – ISSN 2226-7298.

- [15] Использование результатов выполнения экипажем МКС-43/44/45/46 годового полета на борту Международной космической станции в интересах осуществления полетов в дальний космос / Курицын А.А., Онуфриенко Ю.И., Ковинский А.А., Копнин В.А., Корниенко М.Б. // Полет. – № 8–9. – 2016, Москва. – ISSN:1684-1301.

REFERENCES

- [1] Kuritsyn A.A., Dmitriev V.N. Development, realization, and evolution of the technology of multi-segment training of crews for missions on the International Space Station // Manned Space Flights. – 2017. – No 4(25). – ISSN 2226-7298.
- [2] Kryuchkov B.I., Usov V.M., Yaropolov V.I., Sosyurka Yu. B., Troitskiy S.S., Dolgov P.P. On the features of professional activity of cosmonauts when implementing lunar missions // Manned Space Flights. – No 2(19). – 2016. – pp. 35–57.
- [3] The history of domestic manned cosmonautics. Edited by Barmin I.V. – Moscow: Stolichnaya Encyclopedia Publishing House, 2015. – p. 752.
- [4] Aviation training devices / Bodner V.A., Zakirov R.A., Smirnova I.I. – Moscow: Mashinostroyenie, 1978. – p. 192.
- [5] Automated systems for professional training of aircraft operators. / Dyomin L.S., Zhukovskiy Yu.G., Semenin A.P. and others. Edited by Shukshunov V.I. – Moscow: Mashinostroyenie, 1986. – p. 240.
- [6] Kubasov V.N. and others. Professional cosmonaut training. – Moscow: Mashinostroyenie, 1985. – p. 97.
- [7] Sokhin I.G. Comprehensive training of the ISS crews as a controlled technological procedure. Monograph. – Star City, Moscow region: Gagarin Test&Research CTC, 2007. – p. 178.
- [8] Kuritsyn A.A. Methods and means of computer-aided process control for comprehensive training of the crews of orbital piloted complexes. Monograph. – Star City, Moscow region: Gagarin Test&Research CTC 2011. – p. 280.
- [9] Solovyov V.A. Space flight control: Training manual in 2 books. / Solovyov V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E.; under general editorship of Lysenko L.N. Bauman MSTU Publ., 2009. – p. 902 – ISBN 978-5-7038-3350-6.
- [10] Greshilov A.A. Mathematical methods of decision-making: Textbook for high schools. – Moscow: Bauman MSTU Publ., 2006. – p. 584 – ISBN 5-7038-2893-7.
- [11] Nogin V.D. Decision-Making in a Mutli-Criteria Environment: a Quantitative Approach. – Moscow: FIZMATLIT Publ., 2002. – p. 144– ISBN 5-9221-0274-5.
- [12] Chernoskutov A.I. Evaluation of a pilot's performance by using probability transmission matrixes / Chernoskutov A.I., Zhirov A.Yu. – Them. Scient. Coll. No 2, Monino, Yu.A.Gagarin Air Force Academy, 2003.
- [13] Defining the main control parameters of the ISS crew training on integrated and dedicated simulators / Kuritsyn A.A., Onurienko Yu.I., Kovinskiy A.A., Kopnin V.A. // Manned Space Flights. – 2016. –No 3(20). – Gagarin Test&Research CTC. – ISSN 2226-7298.
- [14] Kuritsyn A.A., Kondrat A.I., Rybkin D.E., Kopnin V.A., Korzun E.I., Misurkin A.A. Main results of the ISS-53/54 Expedition training and activity when carrying out the mission plan. // Manned Space Flights. – 2018. – No 3(28). – pp. 5–16. – ISSN 2226-7298.
- [15] Using the results of the ISS-43/44/45/46 one-year expedition crew in the interests of future deep-space missions. / Kuritsyn A.A., Onurienko Yu.I., Kovinskiy A.A., Kopnin V.A., Kornienko M.B. // Polyot. – No 8–9. – 2016, Moscow. – ISSN:1684-1301.