

УДК 629.78.076:523.43

ИМИТАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОНАВТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА

Б.И. Крючков, П.П. Долгов

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

Рассматривается задача моделирования напланетной внекорабельной деятельности (ВКД) экипажа марсианской экспедиции. В качестве исходных данных для моделирования используются результаты наземных дополетных и послеполетных экспериментов по ВКД, выполненные космонавтами МКС. Предложена имитационная математическая модель ВКД, позволяющая формировать циклограммы и оценивать результаты ВКД с учетом влияния на работоспособность космонавтов экстремальных факторов космоса при длительном перелете с Земли на Марс, и возможных отклонений от нормы, возникающих в ходе ВКД.

Ключевые слова: внекорабельная деятельность, циклограмма, имитационная математическая модель, отклонения от нормы, алгоритмы, космонавты

Simulation Mathematical Model of Cosmonauts' Extravehicular Activity on the Surface of Mars. B.I. Kryuchkov, P.P. Dolgov

The paper considers the problem of modelling on-planet extravehicular activity (EVA) of a Martian expedition crew. The results of ground-based pre-flight and post-flight experiments on EVA performed by ISS cosmonauts are used as initial data for modelling. A simulation mathematical model of EVA which allows generating cyclograms and evaluating cosmonauts' extravehicular activity taking into account the impact of extreme space factors on human performance during long-duration missions from Earth to Mars and abnormalities that can occur in the course of EVA is proposed.

Keywords: extravehicular activity, cyclogram, simulation mathematical model, abnormalities, algorithms, cosmonauts

Содержательная (вербальная) постановка задачи

Выполняется высадка экипажа в составе k человек на поверхность Марса после перелета с Земли, продолжительность которого составила $T_{\text{пер}}$. После посадки корабля на Марс экипаж должен выйти на поверхность планеты и выполнить заданную ВКД [1–3]. В рамках напланетной миссии космонавты проводят $N_{\text{кэ}}$ космических экспериментов, технологии выполнения которых известны и отработаны в наземных условиях.

Требуется сформировать циклограмму ВКД экипажа на планете, определяющую как последовательность выполняемых операций, так и продол-

жительность каждой из них с учетом влияния на космонавтов экстремальных факторов космического полета в ходе перелета по схеме Земля→Марс (З→М), а также гравитации на планете (на Марсе $g_m = 3,86 \text{ м/с}^2$). В ходе ВКД возможно возникновение различных отклонений от нормы DN (сокр. от англ. *deviation from the norm* – отклонение от нормы) в деятельности космонавтов, вызываемых неисправностями в системах скафандра, системе шлюзования, марсоходах, средствах связи, научном оборудовании и пр. В той или иной степени они влияют на качество ВКД и должны учитываться при оценивании ее результативности.

Эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) напланетного оборудования ВКД определяются вектором $\hat{A}_{\text{ЭТХ}}$; уровень подготовленности экипажа – вектором $\hat{A}_{\text{подг}}$. Предполагается, что DN в процессе ВКД могут возникать также вследствие ошибок экипажа. Задача выполнения ВКД считается успешной, при длительности ВКД не превышающей заданную на допустимую величину не более чем на $\Delta T_{\text{ц}}^{\text{доп}}$, а DN не вызвали нарушений здоровья космонавтов. В противном случае, а также, если отклонения DN привели к срыву циклограмм ВКД, задача считается не выполненной.

Структурная схема и алгоритм функционирования модели ВКД

При решении поставленной задачи необходимо учесть, что параметры выполнения операций ВКД являются случайными событиями, что определяется:

- случайным временем начала выполнения каждой i -й операции циклограммы и ее продолжительности;
- различным влиянием негативных факторов космического полета (при перелете З→М) на работоспособность каждого космонавта;
- подготовленностью космонавтов;
- случайным характером отклонений от нормы при выполнении операций ВКД (в т. ч. неисправностей, отказов в оборудовании, возможными ошибками в действиях космонавтов и др.);
- случайным влиянием планетных условий (например, светотеневой обстановки, пылевой бури на Марсе и др.).

В силу действия множества случайных факторов на процедуры ВКД, их анализ и оценивание должны выполняться с использованием математического аппарата теории вероятностей [4, 5].

Наилучшим способом решения поставленной задачи можно считать разработку имитационной математической модели (ИММ) и проведение на ней серии модельных экспериментов [6–9].

На рис. 1 показана блок-схема ИММ для оценивания результативности ВКД на Марсе. Ее основу составляют 4 модуля.

В модуле 1 формируются все необходимые начальные условия. В него же вводятся нужные параметры для осуществления дальнейших процедур.



Рис. 1. Блок-схема ИММ

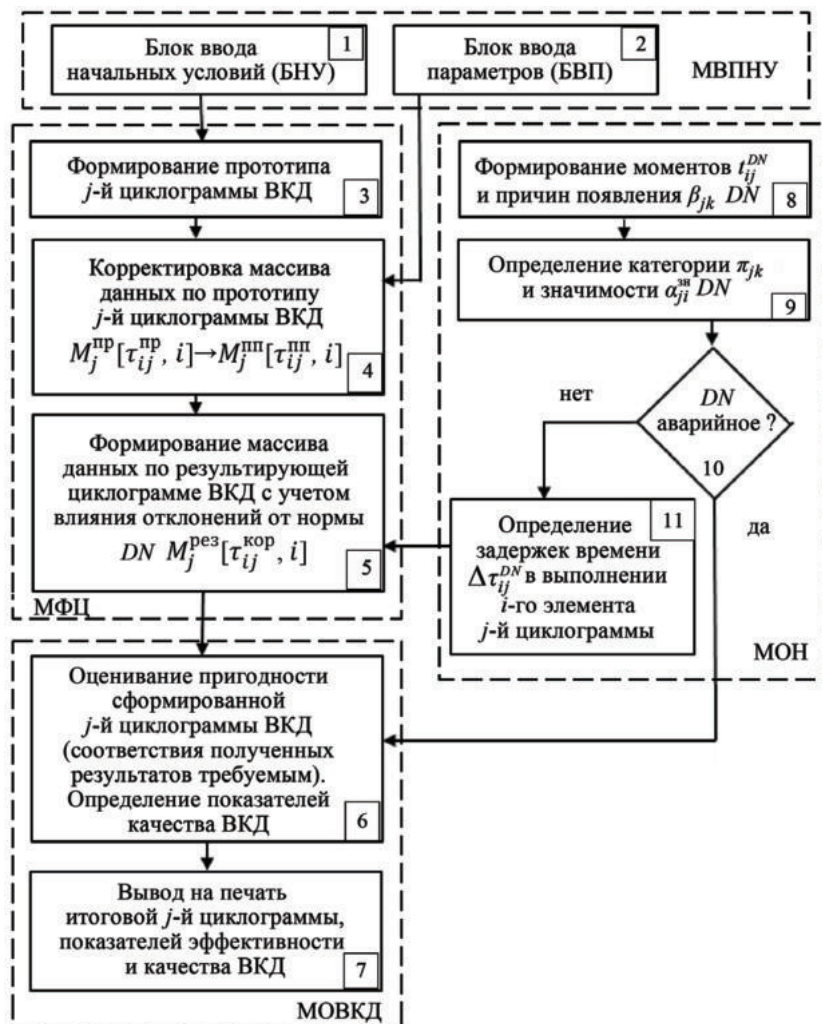


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования ИММ

Эти параметры могут быть детерминированными, динамическими или задаваться в виде функций распределения. Модули 2 и 3 обеспечивают собственно имитацию процедур ВКД с учетом дополетных и послеполетных экспериментов, условий ВКД, ЭТХ оборудования, характера DN , возникающих по различным причинам. При необходимости анализа влияния уровня подготовленности космонавтов на качество ВКД в модуль МВПНУ могут вводиться характеристики их операторских качеств в виде вектора $\hat{A}_{\text{подг}}$. В модуле 4 осуществляется оценивание результатов ВКД.

На рис. 2 приведена укрупненная блок-схема алгоритма функционирования ИММ, на которой в каждом из модулей представлены соответствующие ключевые блоки, характеризующие последовательность имитации процедур ВКД.

Формирование исходных данных и условий инвариантности ИММ

Одним из преимуществ рассматриваемой ИММ является ее инвариантность – способность к решению поставленных задач независимо от тех или иных преобразований в системе ВКД, включающей скафандр, его системы, используемые напланетные средства транспортировки, научный инструментарий, а также условий проведения работ или квалификации экипажа. Кроме того, для одной и той же системы ВКД возможно моделирование разных по продолжительности $T_j^{\text{ВКД}}$ и очередности выполняемых космических экспериментов (КЭ) циклограмм. Достижение такого качества ИММ обеспечивается блоками БНУ и БВП, позволяющими учитывать необходимые характеристики системы ВКД, экипажа и среды обитания.

В блоке БНУ учитываются требования к длительности ВКД $T_{j\text{зад}}^{\text{ВКД}}$, в том числе к $\Delta T_{j\text{зад}}^{\text{ВКД}}$ – допустимому превышению заданной продолжительности ВКД. Здесь же формируется текущее время t_T ВКД.

Блок БВП вводит в ИММ необходимые ЭТХ (например, интенсивность отклонений от нормы $\Lambda_{\text{ВКД}}^{DN}$), их динамику с течением t_T , данные по значимости $DN - \alpha_{\text{зни}}^{DN}$, характеристики экспертных и экспериментальных данных по дополетным и послеполетным исследованиям ВКД с участием экипажей МКС. Для обеспечения последнего в БВП должно быть введено два массива данных. Один из них содержит необходимые предполетные данные по прототипу j -й циклограммы в виде $M_j^{\text{пп}}[\tau_{ij}^{\text{пп}}, i]$, другой, с учетом послеполетных экспериментов – $M_j^{\text{пн}}[\tau_{ij}^{\text{пн}}, i]$. При наличии достаточного статистического материала вместо второго массива может вводиться матрица вероятностей $P_{\Delta\tau[i,j]} = \left\| P_{\Delta\tau_{ij}} \right\|_i^j$, характеризующая вероятность того, что продолжительность i -го элемента в j -й циклограмме увеличится на время $\Delta\tau_{ij}$.

Формирование циклограммы ВКД

На основании опыта космических полетов можно констатировать, что любая циклограмма ВКД на поверхности Марса будет включать ряд типовых операций. К ним, в частности, относятся: шлюзование, открытие выходного люка (ОВЛ) и выход на поверхность Марса; адаптация; выполнение различных КЭ и ЦР; кратковременный отдых; перемещение по поверхности (ходьба в скафандре или езда на планетоходе); возвращение в посадочный модуль; закрытие выходного люка (ЗВЛ) и обратное шлюзование.

В программе «Аполлон» такие операции как адаптация после ОВЛ занимали 7–10 мин, кратковременный отдых в ходе ВКД – до 15 мин, сон после ВКД в посадочном модуле до начала работ на следующие сутки – 7 ч (в т. ч. и для «Аполлон-11») (рис. 3). Число и длительность КЭ определялись целевыми задачами миссии и могли занимать от 12 мин (первый сбор образцов для «Аполлон-11») до нескольких часов, включая поездки на луноходах. Общие итоги ВКД на поверхности Луны астронавтов в программе «Аполлон» приведены нами в работе [10].

С учетом опыта ВКД на обитаемой космической станции (ОКС) [2], лунной программы США [10] можно представить общую структуру типовой циклограммы ВКД на поверхности Марса (рис. 4). Такие циклограммы содержат как единичные типовые операции (ОВЛ, ЗВЛ), так и повторяющиеся по целевым задачам. К последним по большей части относятся космические эксперименты (КЭ₁, КЭ₂, КЭ₃...), составляющие основное содержание целевой деятельности космонавтов при ВКД.

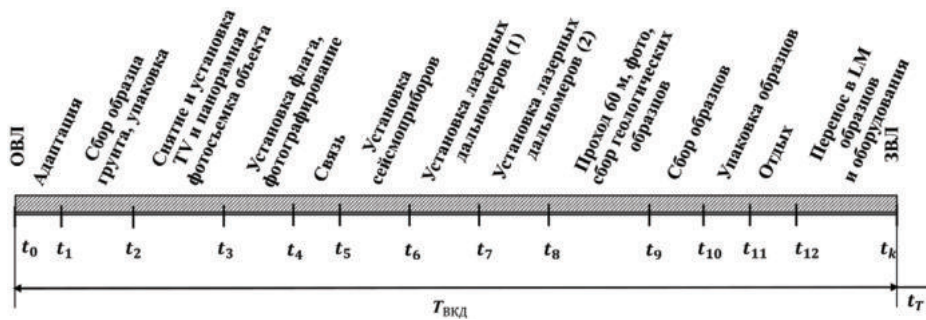


Рис. 3. Циклограмма ВКД на Луне астронавтов «Аполлон-11»

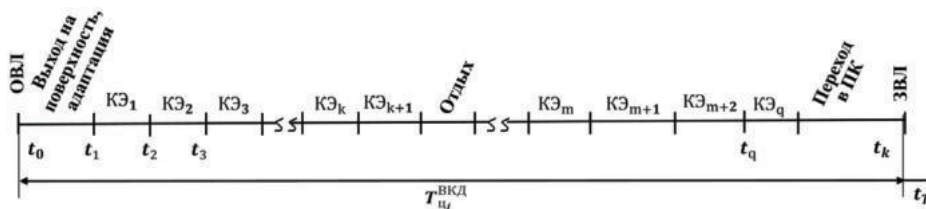


Рис. 4. Общий вид типовой циклограммы ВКД на поверхности Марса

При планировании конкретных задач ВКД на поверхности Марса можно экспертным путем сформировать проект циклограммы ВКД, который является ее первым приближением, представляющим собой определенную последовательность выполняемых операций и их продолжительность. На ее основе с участием космонавтов-испытателей в наземных условиях, приближенных к условиям на Марсе [3], в ходе экспериментальной отработки формируется прототип циклограммы, которая и вводится в блок БНУ имитационной модели. Такую циклограмму можно представить в виде упомянутого выше массива данных $M_j^{np}[\tau_{ij}^{np}, i]$, где τ_{ij}^{np} – продолжительность i -го элемента j -й циклограммы, i – его порядковый номер, причем согласно рис. 3 $i = 1(1)k$. Число циклограмм j фактически будет равным числу выходов экипажа на поверхность планеты.

Количество выходов космонавтов на поверхность Марса будет в значительной степени определяться выбранной схемой полета, в том числе ожиданием стартового окна для возвращения на Землю. В одних случаях, как в схеме полета, рассматриваемой в работе [1], число ВКД может быть небольшим, например, от одного (десантная операция по выходу на поверхность) до трех. В других схемах полета, в частности, рассматриваемой в работе [11], когда экспедиция на Марс длится 2 года 8 месяцев, а ожидание стартового окна к Земле составляет 450 сут, количество ВКД будет значительно больше.

В программе «Аполлон» количество выходов на поверхность Луны (в нашей задаче значения j) для 6 последовательных миссий, соответственно, составляло: 1, 2, 2, 3, 3, 3. В среднем длительность одной циклограммы равнялась 8,4 ч. Общее время ВКД лунной миссии по отношению ко времени нахождения посадочного модуля ЛМ на поверхности Луны составляло в процентах соответственно: 10,5; 25,9; 27,6; 27,1; 28,6; 30,3. На МКС, в среднем, выходы в открытый космос (ОК) совершались каждые 1,2 месяца.

Следует учесть еще одно важное обстоятельство. При разработке прототипов циклограмм обычно не учитывается возможность возникновения в ходе ВКД различных DN , которые могут быть как незначительными, мало влияющими на результаты ВКД, так и существенными, могущими привести и к срыву ВКД, и к нарушению здоровья, и даже гибели экипажа. Как показывает практика выходов в ОК на ОКС, в том числе и на МКС, источниками DN могут быть космическая техника, человек, экстремальные факторы космоса и др.

На основании результатов дополетных и послеполетных экспериментов [3, 12, 13] прототип циклограммы ВКД можно максимально приблизить к реальной циклограмме априори до начала экспериментальной отработки, что важно, поскольку это позволяет заранее выявить и парировать возможные риски при разработке технологий ВКД, а также получить достаточно надежные данные для планирования будущих миссий.

Модель позволяет оценить роль человеческого фактора в выполнении напланетной ВКД. В частности, влияние на ее результаты уровня подготовленности космонавтов, их способностей к парированию DN , в том числе значимых нештатных (НшС) и аварийных ситуаций (АС); умения работать в условиях высокой автономности миссий; работоспособности после длительного воздействия на них негативных факторов космического полета.

Первая корректировка прототипа циклограммы происходит в блоке 4 (см. рис. 2). Результаты моделирования типовых операций ВКД на поверхности Марса с участием космонавтов, выполнивших длительные полеты на МКС, показывают [3, 13], что продолжительность каждого i -го элемента циклограммы увеличивается вследствие снижения работоспособности космонавта при длительном перелете по схеме $З \rightarrow М$. Поэтому каждому i -му элементу циклограммы можно поставить в соответствие некий корректирующий коэффициент $r_i > 1$. Тогда

$$\tau_{ij}^{пп} = r_i \cdot \tau_{ij}^{пп}, \quad (1)$$

где $\tau_{ij}^{пп}$ – откорректированная продолжительность i -го элемента циклограммы (на выходе блок 4, рис. 2);

$\tau_{ij}^{пп}$ – продолжительность i -го элемента циклограммы (на выходе блок 3, рис. 2).

По итогам первой корректировки $\tau_{ij}^{пп}$ на выходе блока 4 получаем уточненную j -ю циклограмму ВКД в виде массива данных $M_j^{пп}[\tau_{ij}^{пп}, i]$.

Вторая корректировка циклограммы ВКД осуществляется в блоке 5 (см. рис. 2) с учетом влияния на τ_{ij} отклонений DN (блоки 8, 9, 10, 11). В общем случае DN приводят к задержкам в выполнении операций ВКД или прекращению (срыву) ВКД, если DN становятся аварийными. Допуская, что задержки в выполнении i -го элемента циклограммы равны времени устранения DN , можно сформировать правило их моделирования. Результирующая циклограмма ВКД в виде массива данных $M_j^{рез}[\tau_{ij}^{кор}, i]$ поступает в МОВКД.

Моделирование потока отклонений от нормы при напланетной ВКД

При проведении напланетной ВКД возможно возникновение различных отклонений от нормы, негативно влияющих на результаты выполнения задачи ВКД в целом. Значимость отклонений от нормы $\alpha_i^{зн}$, т. е. степень их влияния на качество выполняемой работы, может быть различной – близкой к нулю $\alpha_i^{зн} \approx 0$, когда их влияние практически отсутствует, высокой, когда возникают отказы и задачи ВКД выполняются не полностью, и максимальной – при $\alpha_i^{зн} = 1$, когда возникает аварийная ситуация и угроза срыва ВКД или угроза жизни космонавта.

Причинами отклонений от нормы при напланетной ВКД могут быть:

- β_1 – отклонения в работе системы шлюзования;
- β_2 – отклонения в работе бортовых систем или конструкции скафандра;
- β_3 – отклонения в функционировании планетохода;
- β_4 – отклонения в работе научной аппаратуры;
- β_5 – ошибки экипажа;
- β_6 – отклонения в работе напланетного навигационного комплекса;
- β_7 – отклонения в работе роботов-помощников экипажа;
- β_8 – отклонения в работе систем связи;
- β_9 – воздействия внешних (напланетных) условий;
- β_{10} – отклонения в работе наземного ЦУПа.

Тогда, в общем случае, при моделировании DN они будут определяться вектором

$$\beta_k = [\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_q], [k = 1(1) q], \quad (2)$$

где k – тип источника DN ;

q – число источников DN .

Отклонения от нормы при ВКД происходят в случайные моменты времени t_i^{DN} , которые заранее неизвестны. Их последовательность можно определить как общий поток, слагаемыми которого являются потоки $L_1, L_2, L_3 \dots L_q$ от каждого из источников. Как показывает опыт ВКД, интенсивность отклонений от нормы в любом из них достаточно мала ($10^{-3} \dots 10^{-4}$) и события возникают поодиночке. Тогда можно считать любой из потоков L_k пуассоновским, а при независимости источников $\beta_{<k>}$ их суммарный поток L^{DN} также является пуассоновским [7, 8].

Вектор интенсивности DN в ходе ВКД будет определяться интенсивностями потоков по каждой причине $\beta_{<k>}$ т. е.

$$\Lambda_{ВКД}^{DN} = [\lambda_{\beta_1}^{DN}, \lambda_{\beta_2}^{DN} \dots \lambda_{\beta_q}^{DN}]. \quad (3)$$

Значения $\Lambda_{ВКД}^{DN}$ с учетом составляющих интенсивностей от всех q потоков могут быть получены из опыта ВКД на пилотируемых космических комплексах (ПКК). В качестве первых прототипов систем ВКД на ПКК могут рассматриваться такие пилотируемые комплексы как ПКА «Аполлон», «Мир», МКС с учетом прогноза надежности элементов их ВКД на перспективу. На последующих этапах моделирования для оценок составляющих вектора $\Lambda_{ВКД}^{DN}$ целесообразно использовать результаты наземных испытаний напланетной ВКД.

Поскольку характер потоков $L_1 \dots L_q$ пуассоновский, при моделировании на малом шаге Δt , вероятность возникновения DN по причине β_k на этом шаге будет [6, 7]

$$P(\hat{A}_{k_i}) = 1 - e^{-\lambda_{\beta_i}^{DN}(t_T)\Delta t} \cong \lambda_{\beta_i}^{DN}(t_T)\Delta t, \quad (4)$$

где $\lambda_{\beta_i}^{DN}$ – текущее значение интенсивности DN ;

t_T – текущее время ВКД;

i – порядковый номер DN типа β_k .

Условная вероятность появления DN по причине β_k будет

$$P(\hat{A}_{k_i}/A) = \frac{\lambda_i^{DN}(t_T)}{\sum_i^q \lambda_i^{DN}(t_T)} = \frac{\lambda_i^{DN}(t_T)}{\lambda^{DN}(t_T)}. \quad (5)$$

Процедуры моделирования DN подобны моделированию НшС при работе бортовых систем ПКК. Алгоритмы их реализации достаточно подробно рассмотрены в работах [6–8].

Процедуры моделирования DN осуществляются в модуле МОН (см. рис. 2). Порядок формирования рабочих алгоритмов ИММ в блоках 8, 9, 10, 11 данного модуля детально рассмотрен в работах [6, 7]. В основу их разработки положены работы [4, 5, 8] и другие по прикладным вопросам математического моделирования с использованием методов системного анализа, метода Монте-Карло, теории испытаний технических систем, теории вероятности, теории эффективности целенаправленных процессов. В результате моделирования потоков DN в модуле МОН, на его выходе получаем данные, которые используются в блоке 5 МФЦ для окончательной корректировки циклограммы ВКД и в модуле МОВКД для оценивания результатов (эффективности) принятой технологии ВКД, а также определения ряда показателей качества ВКД.

Оценивание результативности ВКД

На рисунке 5 приведена блок-схема алгоритма оценивания результатов моделирования ВКД. Откорректированной по итогам дополетных и послеполетных экспериментов массив чисел, представляющий данные по длительностям каждого i -го элемента j -й циклограммы ВКД τ_{ij} , поступает в блок 1, где вычисляется полная продолжительность $T_j^{ВКД}$ j -й циклограммы. В блоке 2 величина $T_j^{ВКД}$ сравнивается с заданной $T_{jзад}^{ВКД}$. В случае успешной реализации по $T_j^{ВКД}$ в блоке 4 проверяется возможность срыва ВКД из-за влияния аварийной ситуации. Далее в зависимости от результатов проверки в блоке 4, в блоках 5, 6, 7 вычисляются показатели результативности ВКД. Основным из них является вероятность $P_{ВКД}^*$ успешного выполнения ВКД. Наряду с ним на выходе ИММ выводятся показатели качества ВКД, обеспечивающие целостное представление о принятой технологии ВКД.

Вероятность $P_{ВКД}^*$ вычисляется как оценка вероятности успешных реализаций j циклограмм ВКД на ИММ, т. е. как отношение успешных реализаций $n_j^{усп}$ к их общему числу $N_j^{общ}$, причем $N_j^{общ} = n_j^{усп} + n_j^{несп}$ (блок 7).

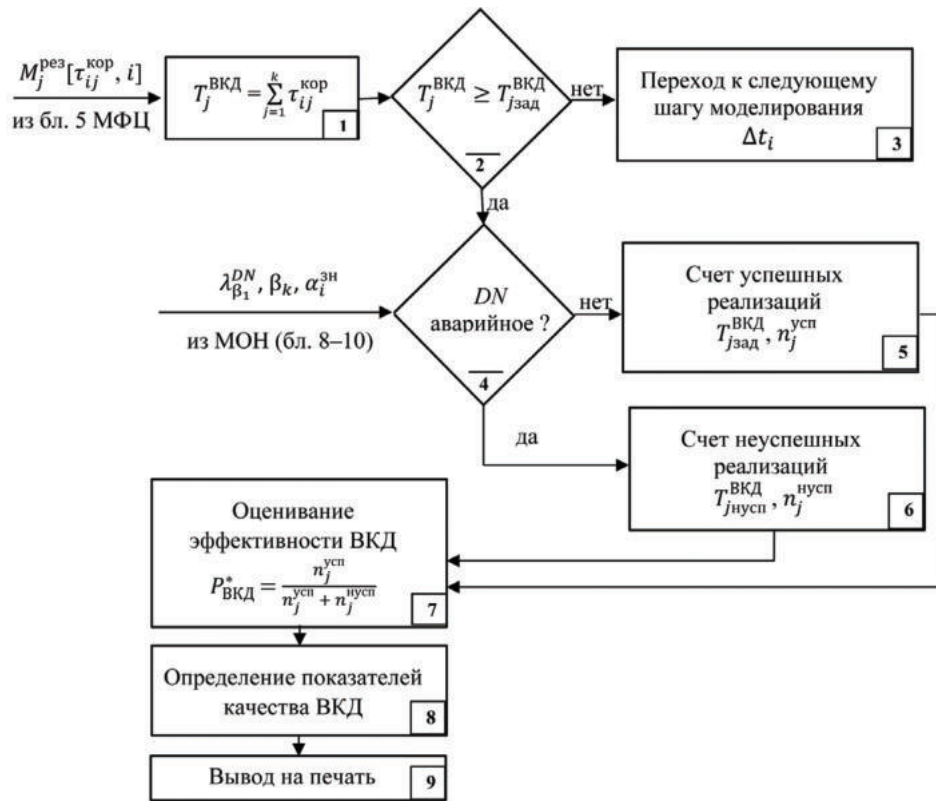


Рис. 5. Блок-схема алгоритма оценивания результатов ВКД

Если, например, программой работ предусмотрено 5 ВКД ($N_{ВКД}^5$), в ИММ должна быть выполнена имитация 5 циклограмм ($j_{пр} = 5$). Тогда в общем виде статистическое значение показателя будет

$$P_{ВКД}^* = \frac{\sum_{j=1}^{j_{пр}} P_{цj}^*}{j_{пр}} \quad (6)$$

К числу показателей качества ВКД могут быть отнесены:

1. Вероятность безотказной работы комплекса ВКД при выполнении j -й циклограммы $P_{ВКДj}^*$.
2. Вероятность устранения космонавтом отклонения от нормы при ВКД $P_{DN}(\tau)$ за время, не превышающее заданное τ_3 .
3. Показатели удельных трудозатрат экипажа $n_{КЭi}^{уд}$ на выполнение отдельных КЭ, стоимостные показатели $c_{КЭi}$ операций ВКД и др.

Наряду с рассматриваемыми задачами в ИММ могут оцениваться и подготовительно-заключительные операции. Для этих целей в состав модели (см. рис. 1) необходимо ввести специальный модуль МПЗ (модуль подготовительно-заключительных операций). Его формирование и функционирование будут осуществляться на тех же принципах, которые были рассмотрены для существующих модулей (см. рис. 1, 2, 5).

Вопросы точности и достоверности получаемых оценок показателей эффективности и качества подробно изложены в соответствующей литературе, в том числе в работах [4–7]. Некоторые из них в отношении ВКД на поверхности Марса приведены в работе [3].

Для решения рассматриваемой задачи могут быть рекомендованы компьютерные технологии имитационного моделирования сложных вероятностных систем [14–18]. К настоящему времени они достаточно хорошо разработаны, в том числе с учетом включения в ИММ операторского звена.

Выводы

К настоящему времени по ряду направлений исследования возможностей космонавтов выполнять сложные задачи профессиональной деятельности в длительных, в том числе межпланетных, миссиях, экспериментально получен достаточный статистический материал, который может быть использован в математических моделях при анализе эффективности и качества полетной деятельности экипажей ПКК.

С учетом специфики выполнения космонавтами разнородных задач операторской и когнитивной деятельности на борту космических аппаратов и на поверхности планет, влияния экстремальных условий среды обитания на работоспособность человека и оборудования, разработан метод анализа результатов деятельности экипажей ПКК с помощью имитационного математического моделирования. Возможность реализации данного метода продемонстрирована на примере напланетной ВКД экипажа марсианского межпланетного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пилотируемая экспедиция на Марс / Под ред. А.С. Коротеева – Москва: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006. – 320 с.
- [2] Анализ основных результатов внекорабельной деятельности экипажей МКС / Б.И. Крючков, А.А. Алтунин, П.П. Долгов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2017. – № 1(22). – С. 56–67.
- [3] Исследование качества работы космонавтов при моделировании условий ВКД на поверхности Марса в экспериментах с участием экипажей МКС / Б.И. Крючков, М.М. Харламов, П.П. Долгов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 3(40). – С. 43–60. DOI 10.34131/MSF.21.3.43-60
- [4] Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В.И. Городецкий, А.К. Дмитриев, В.М. Марков [и др.] – Ленинград: Энергия, 1978. – 192 с.

- [5] Иоффе, А.Я. Вероятностные методы в прикладной кибернетике / А.Я. Иоффе, В.М. Марков, Г.Б. Петухов, Р.М. Юсупов. – Ленинград: МО СССР, 1976. – 423 с.
- [6] Нештатные ситуации космических полетов. Математическое моделирование. Прикладные аспекты / А.В. Алешин, Д.К. Дедков, Б.И. Крючков [и др.] – Звездный городок: НИИЦПК, 1998. – 244 с.
- [7] Тищенко, А.А. Моделирование при обеспечении безопасности космических полетов / А.А. Тищенко, В.И. Ярополов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 189 с.
- [8] Соболев, И.М. Численные методы Монте-Карло / И.М. Соболев. – Москва: Наука, 1973. – 312 с.
- [9] Эльберг, М.С. Имитационное моделирование: учебное пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганов. – Красноярск: СФУ, 2017. – 126 с.
- [10] 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.
- [11] Солнечная система. – URL: <https://starcatalog.ru/solnechnaya-sistema/skolko-letet-do-marsa-i-kak-tuda-dobratsya> (дата обращения 18.11.2021).
- [12] Подход к проведению послеполетного эксперимента по управлению планетоходом / П.П. Долгов, Е.Ю. Иродов, В.Н. Киришинов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2020. – № 2(35). – С. 47–60.
- [13] Tasks of Professional Activity of Cosmonauts on the Moon and in Deep Space: Working out Methods and Technologies / M.M. Kharlamov, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, P.P. Dolgov // Global Space Exploration Conference 2021. – URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/62705/summary/>
- [14] Гурдзибеева, А.Р. Исследование и разработка методов и алгоритмов имитационного моделирования для тренажеров операторов сложных объектов: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Горно-металлур. ин-т. Владикавказ, 2005. – 24 с.
- [15] Кабанов, В.Ф. Информационные технологии имитационного моделирования в профессиональной деятельности: учебное пособие / В.Ф. Кабанов. – Саратов: СГУ, 2015. – 68 с.
- [16] Зимин, В.В. Имитационное моделирование деятельности оператора кабельного телевидения. – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2003-2-55-58/pdf> (Дата обращения 31.10.2022).
- [17] Карпов, А.В. Имитационное компьютерное моделирование сложных радиосистем: учебное пособие / А.В. Карпов, И.Р. Лапшина. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. – 61 с.
- [18] Моделирование сложных вероятностных систем: учебное пособие / В.Г. Лысенко, О.Г. Трофимова, С.П. Трофимов [и др.]. – Екатеринбург: УРФУ, 2011. – 200 с.

REFERENCES

- [1] Manned Expedition to Mars / Edited by A.S. Koroteeva // Moscow: Russian Academy of Cosmonautics named after K.E Tsiolkovky, 2006. – 320 p.
- [2] Analysis of the Main Results of Extravehicular Activity of ISS Crews / B.I. Kryuchkov, A.A. Altunin, P.P. Dolgov [at al.] // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2017. – No 1(22). – P. 56–67.
- [3] Study of the Quality of Cosmonauts’ Activities when Simulating EVA Environment on the Martian Surface in Experiments Involving ISS Crews / B.I. Kryuchkov,

- M.M. Kharlamov, P.P. Dolgov [at al.] // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2021. – No 3(40). – P. 43–60. DOI 10.34131/MSF.21.3.43-60
- [4] Elements of the Theory of Testing and Control of Technical Systems / V.I. Gorodetsky, A.K. Dmitriev, V.M. Markov [at al.] // Leningrad: Energiya, 1978. – 192 p.
- [5] Probabilistic Methods in Applied Cybernetics / A.Ya. Ioffe, V.M. Markov, G.B. Petukhov, R.M. Yusupov // Leningrad: Ministry of Defence of the USSR, 1976. – 423 p.
- [6] Emergency Situations in Space Flights. Mathematical Modeling. Applied Aspects / A.V. Aleshin, D.K. Dedkov, B.I. Kryuchkov [at al.] // R&T: CTC, 1998. – 244 p.
- [7] Tishchenko, A.A., Yaropolov V.I. Modelling in Ensuring the Safety of Space Flights / A.A. Tishchenko, V.I. Yaropolov. Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 189 p.
- [8] Sobol, I.M. Numerical Monte Carlo Methods / I.M. Sobol. Moscow: Nauka, 1973. – 312 p.
- [9] Elberg, M.S. Simulation Modeling: Tutorial / M.S. Elberg, N.S. Tsyganov. Krasnoyarsk: SFU, 2017. – 126 p.
- [10] Features of Cosmonauts’ Professional Activity in Lunar Missions / B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, V.I. Yaropolov [at al.] // Manned Spaceflight. – 2016. – No 2(19). – P. 35–57.
- [11] Solar System. – URL: <https://starcatalog.ru/solnechnaya-sistema/skolko-letet-domarsa-i-kak-tuda-dobratsya> (access date 18.11.2021).
- [12] Approach to Conducting the Post-Flight Experiment on Controlling a Rover / P.P. Dolgov, E.Yu. Irodov, V.N. Kirshanov [at al.] // Scientific Journal “Manned Spaceflight”. – 2020. – No 2(35). – P. 47–60.
- [13] Tasks of Professional Activity of Cosmonauts on the Moon and in Deep Space: Working out Methods and Technologies / M.M. Kharlamov, B.I. Kryuchkov, V.M. Usov, P.P. Dolgov // Global Space Exploration Conference 2021. – URL: <https://iafastro.directory/iac/paper/id/62705/summary/>.
- [14] Gurdzibeeva, A.R. Author’s Abstract of the Thesis: Research and Development of Methods and Algorithms for Simulation Modeling for Simulators of Operators of Complex Objects: Abstract of the Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.13.01 / North Caucasian Mining and Metallurgical Institute. – Vladikavkaz, 2005. – 21 p.
- [15] Kabanov, V.F. Information Technologies of Simulation Modeling in Professional Activity / V.F. Kabanov. Saratov: Saratov State University, 2015. – 68 p.
- [16] Zimin, V.V. Simulation Modeling of the Activities of a Cable Television Operator. – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2003-2-55-58/pdf> (access date 31.10.2022).
- [17] Karpov, A.V., Lapshina I.R. Simulation Computer Modeling of Complex Radio Systems / A.V. Karpov, I.R. Lapshina. – Kazan: Publishing House of Kazan University, 2019. – 61 p.
- [18] Modelling of Complex Probabilistic Systems. Tutorial / V.G. Lysenko, O.G. Trofimova, S.P. Trofimov [at al.] // Ekaterinburg: Ural Federal University, 2011. – 200 p.