

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.786.2

## РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ ЭКИПАЖА ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА К ПОЛЕТУ

Н.А. Чуб, А.А. Курицын

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации  
космонавт-испытатель Н.А. Чуб; докт. техн. наук, доц. А.А. Курицын  
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Направления дальнейшего развития пилотируемой космонавтики в мире предусматривают продолжение эксплуатации существующих орбитальных пилотируемых космических комплексов (ПКК) (МКС, Тяньгун (КНР)), а также создание на орбите Земли и Луны новых ПКК (Российская орбитальная станция, станция Axiom Space (США), международная лунная орбитальная станция Gateway). Одной из важных задач, обеспечивающих эффективную и безопасную эксплуатацию ПКК, является задача формирования программы подготовки экипажа пилотируемого космического комплекса, которая должна учитывать все факторы и ограничения, влияющие на данный процесс. Современные информационные технологии позволяют обрабатывать большие объемы информации и существенно упростить деятельность специалистов, организующих и проводящих подготовку космонавтов.

**Ключевые слова:** Международная космическая станция, пилотируемые космические комплексы, информационные технологии, космонавты, подготовка космонавтов

### **Optimizing Development of Crew Training Programme for Flight Aboard Manned Space Complexes. N.A. Chub, A.A. Kuritsyn**

Global trends in human spaceflight include the continued operation of existing orbital manned space complexes (MSC), such as ISS and Tiangong (China), alongside the development of new stations in Earth and lunar orbit (the Russian orbital station, Axiom Space station (USA), the Lunar Gateway international station). A critical task for ensuring the efficient and safe operation of the spacecraft is to develop a comprehensive crew training program, which would take into account all positive and negative factors. Modern information technologies enable

the processing of large datasets, significantly streamlining the work of specialists responsible for organizing and conducting cosmonaut training.

**Keywords:** International space station, manned orbital complexes, information technology, cosmonauts, cosmonaut training

## Постановка задачи исследований

За последние 65 лет на территории современной Российской Федерации сформировалась уникальная научно обоснованная система подготовки космонавтов, корни которой уходят в советский период.

В основу процесса подготовки экипажей ПКК положен многоэтапный подход, обеспечивающий непрерывное совершенствование знаний и навыков космонавтов по принципу «от простого к сложному» [1].

В соответствии с Положением по подготовке космонавтов, подготовка космонавтов к космическому полету состоит из следующих этапов:

1. Общекосмическая подготовка (ОКП) кандидатов в космонавты. Продолжительность этапа ОКП составляет 1,5–2 года.

2. Подготовка космонавтов в составе групп специализации и совершенствования по типам пилотируемых космических аппаратов (ПКА) или направлениям деятельности. Продолжительность подготовки на втором этапе по базовой программе составляет 1,5–3 года.

3. Подготовка космонавтов в составе утвержденных экипажей. Продолжительность определяется задачами полета, как правило, составляет от 6 до 24 месяцев.

4. Подготовка на борту ПКА в космическом полете. Осуществляется в ходе космического полета.

В настоящее время подготовка космонавтов к выполнению программы космического полета включает 13 видов подготовки [1]:

- теоретические основы космонавтики;
- техническая подготовка по конструкции, бортовым системам и оборудованию ПКА;
- подготовка к выполнению программы научно-прикладных исследований и экспериментов (НПИ);
- комплексная подготовка экипажей ПКА;
- подготовка к внекорабельной деятельности (ВКД);
- подготовка к действиям после посадки ПКА в экстремальных условиях различных климатогеографических зон;
- специальная подготовка;
- специальная летная подготовка космонавтов;
- специальная парашютная подготовка космонавтов;
- медико-биологическая подготовка;
- психологическая подготовка;
- физическая подготовка;
- гуманитарная подготовка.

Разработка программы подготовки экипажей ПКК на каждом из этапов представляет собой сложную многокритериальную задачу, требующую обработки значительных объемов исходных данных и балансировки между противоречивыми требованиями и ограничениями. Наиболее сложным и ответственным этапом подготовки является заключительный этап – подготовка космонавтов в составе утвержденных экипажей. Итоговый вариант программы подготовки к полету должен гарантировать достижение экипажем необходимого уровня профессиональной компетенции к моменту старта, включая детализированные сведения о количестве, видах, составе и продолжительности теоретических занятий и тренировок. В дальнейшем в данном исследовании будем рассматривать непосредственно формирование программы подготовки экипажа ПКК.

Множественность учитываемых факторов и субъективный характер процесса планирования (с возможным смещением акцентов между различными критериями) обуславливают необходимость разработки нескольких альтернативных вариантов программ на предварительном этапе. Утверждаемый к реализации вариант должен представлять наиболее оптимальное решение задач подготовки [1, 2]. Данная постановка задачи исследований подчеркивает необходимость применения системного подхода и современных методов оптимизации для обеспечения эффективного процесса подготовки к полету при соблюдении всех нормативных требований и операционных ограничений.

Для выбора оптимальной программы подготовки экипажей ПКК предлагается следующий системный подход на основе методов многокритериальной оптимизации [2–6], который в себя включает определение множества допустимых проектов программ  $Q = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ , где каждый вариант  $D_i$  соответствует нормативным требованиям, предъявляемым ограничениям по времени и ресурсам, начальному уровню подготовленности экипажа и построение векторного критерия эффективности  $K = (k_1, k_2, \dots, k_m)$ .

Для уменьшения возможных вариантов программ  $D_i$  целесообразным является подход, при котором варианты планов  $D_i$  формируются по отработанным экспертами алгоритмам с использованием автоматизированной системы планирования и в той или иной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к плану подготовки экипажа [7, 8]. Использование автоматизированной системы планирования позволяет исключать заведомо нерациональные комбинации, учитывать опыт предыдущих подготовок, оптимизировать расписание по приоритетным критериям. Для математического моделирования процесса формирования программ подготовки с учетом разработки автоматизированных информационных систем может быть использован математический аппарат дискретной математики [9].

Оценка качества проектов программ подготовки экипажей ПКК требует применения прогностических методов, поскольку должна осуществляться до начала тренировочного процесса и не может быть основана на анализе

результатов подготовки. В исследовании предложена система показателей качества программ подготовки, основанная на их соответствии ключевым методическим принципам подготовки, сформированным на основе анализа многолетнего опыта тренировок космонавтов [1, 2].

Разработанная математическая модель формирования программы подготовки экипажей ПКК представляет собой формализованную последовательность действий для координаторов и инструкторского состава, обеспечивающую комплексный учет влияющих на процесс факторов.

### Основная часть

Задачу планирования программы подготовки экипажа ПКК можно представить в целом как последовательность взаимосвязанных оптимизационных подзадач, при этом окончательный выбор решений из множества возможных вариантов осуществляется руководителем на основе заданных критериев эффективности с учетом выявленных системных ограничений [2, 5, 6].

Далее представлена математическая формализация процесса планирования программы тренировок экипажей ПКК и взаимосвязь составляющих данного процесса. Процесс планирования подготовки экипажей ПКК требует диалогового режима с использованием автоматизированной системы для согласования множества разнородных факторов: различных видов подготовки и дисциплин подготовки, сотен занятий  $\{Y_i\}$  и ограничений  $\beta$ , накладываемых на формирование программы подготовки.

Имеется:

1. Множество видов подготовки космонавтов в составе экипажа

$$V_{ЭК} = \{V_i\} \in V,$$

где  $V$  – множество видов подготовки космонавтов на всех этапах.

2. Множество занятий для программы подготовки  $D$  экипажа ПКК.

Множество теоретических занятий  $Y_3$  и тренировок  $Y_{ТР}$ , требующих включения в программу подготовки, зависит от должности членов экипажа и его квалификации на борту РС МКС

$$Y = \{Y_y, y \in N\}, N = \{1, \dots, n\}.$$

Каждый вид подготовки экипажей включает в себя множество занятий:

- по комплексной подготовке экипажей ПКК

$$K = \{Y_v, v \in \Omega\}, \Omega = \{1, \dots, d\};$$

- технической подготовке по бортовым системам

$$T = \{Y_x, x \in \Lambda\}, \Lambda = \{1, \dots, w\};$$

- НПИ

$$N = \{Y_s, s \in \Xi\}, \Xi = \{1, \dots, q\};$$

- подготовке к ВКД

$$W = \{Y_c, c \in Z\}, Z = \{1, \dots, k\};$$

- подготовке к действиям после посадки

$$P = \{Y_p, p \in \Theta\}, \Theta = \{1, \dots, u\};$$

- медико-биологической подготовке

$$B = \{Y_b, b \in \Psi\}, \Psi = \{1, \dots, l\}.$$

Тогда

$$Y = K \cup T \cup N \cup W \cup P \cup B. \quad (1)$$

3. Множество членов экипажа  $S = \{S_\mu, \mu \in M\}$ ,  $M = \{1, \dots, p\}$ .

Возможные должности членов экипажа на борту ПКК:

- командир экипажа (КЭ),
- бортиженер (БИ),
- участник космического полета (УКП).

Возможные квалификации членов экипажа на борту ПКК для учета при подготовке:

- специалист,
- оператор,
- пользователь,
- зарубежный КЭ.

4. Длительность подготовки –  $T_n$ , включающая в себя множество недель подготовки  $\Gamma = \{\gamma\}$  в программе подготовки.

5. Длительность теоретического занятия –  $T_3$ .

6. Длительность тренировки –  $T_{тр}$ .

7. Длительность подготовки в течение недели (дня) (без учета административного времени, времени на физподготовку и медконтроль) –  $T_H = 30$  ч ( $T_D = 6$  ч).

Необходимая длительность подготовки  $T_{ТРЕБ}$  определяется по формуле

$$T_{ТРЕБ} = \sum_{j=1}^N \tau_{Y_{ji}} n_{ji}(Y_{ji}), \quad (2)$$

где  $N$  – количество видов подготовки для данного этапа;

$\tau_{Y_{ji}}$  – длительность  $i$ -го занятия (тренировки) для  $j$ -го вида подготовки;

$n_{ji}$  – количество занятий (тренировок) для вида подготовки.

При разработке программы подготовки учитывается множество условий  $C_i$  планирования  $i$ -го занятия (тренировки). Для занятий (тренировок) множество условий для формирования программы подготовки

$$C_i = \langle C_{i1}, \dots, C_{i8} \rangle, i \in Z, \quad (3)$$

где  $C_{j1}$  – важность для подготовки (высокая – влияет на обеспечение безопасности полета, средняя – влияет на обеспечение выполнения программы полета, низкая);  $C_{j2}$  – сложность для подготовки (уровень 3 сложности – тренировки, связанные со сложной операторской деятельностью (тренировки

на центрифуге, гидролаборатории, тренировки на тренажере транспортного пилотируемого корабля (ТПК) с комплексом средств спасения, тренировки на комплексных тренажерах в аварийных ситуациях), уровень 2 сложности – тренировки на технических средствах подготовки (ТСПК); уровень 1 сложности – практические и теоретические занятия), сложность определяется с учетом конкретного периода планирования (дискретность 2 ч);  $C_{j3}$  – продолжительность занятия;  $C_{j4}$  – число членов экипажа для ее выполнения;  $C_{j5}$  – отношение к члену экипажа (КЭ, БИ, УКП);  $C_{j6}$  – наличие предварительной подготовки;  $C_{j7}$  – специализация (специалист, оператор, пользователь, иностранный КЭ);  $C_{j8}$  – отношение к виду подготовки.

Формально, внесение занятия  $Y_i$  в программу подготовки экипажа можно представить как действие, описываемое кортежем

$$Y_i \leftrightarrow u_i = \langle \gamma_i, S_i, \tau_i \rangle, \quad (4)$$

где  $\gamma_i$  – номер недели подготовки, когда проводится  $i$ -е занятие (тренировка);  $S_i$  – множество членов экипажа, участвующих в  $i$ -м занятии (тренировке);  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го занятия (тренировки).

Добавление занятия  $Y_i$  в программу  $D$  есть функция  $D' = D \oplus Y_i$ , где проверяется выполнение условий, длительность промежутка между занятиями  $\tau_{пр}$  находится между нижней и верхней допустимой границей  $\tau_{пр}^u \leq \tau_{пр} \leq \tau_{пр}^b$ ; обеспечивается непротиворечивость с другими элементами программы; корректируются ресурсные параметры.

Предварительная программа подготовки космонавтов формируется по неделям подготовки. Затем составляется расписание на предстоящую неделю.

#### Процесс формирования программы подготовки экипажа ПКК

Имеется множество вариантов  $D_j$  программ подготовки, предусматривающих последовательность выполнения действий  $u_i, u_i \in Y_j$ .

Все множество  $D_j^B$  возможных вариантов программ подготовки  $D_j^B \subseteq D_j$ .

Упорядочение  $j$  занятий (тренировок) в программе  $D_j^B$ , выбранных для подготовки по  $\gamma$  неделям координатором подготовки вводится в соответствии с необходимостью соблюдения последовательности проведения занятий (тренировок) при освоении соответствующей дисциплины подготовки. При этом

$$\bigcup_j u_{j\gamma} = \bigcup_j \langle \gamma_j, S_j, \tau_j \rangle. \quad (5)$$

Потенциальные возможности выполнения набора действий  $u_{j\gamma}$  для программы  $D_j^B$  описываются множеством

$$\Delta = \{ \langle \gamma_j, \mu_j, y_j \rangle \in \Gamma \times S \times Y, j \in F \}. \quad (6)$$

Каждый кортеж в множестве  $\Delta$  однозначно характеризуется функцией  $D_{\gamma, \mu, y}: \Delta \rightarrow \{0, 1\}$ .

Задача планирования сводится к поиску функции

$$D_{\gamma,\mu,y} \leftrightarrow u_{j\gamma} = \langle \gamma_j, \mu_j, y_j \rangle. \quad (7)$$

Исходя из вышесказанного, программу подготовки  $D$  экипажа ПКК можно формализовать как конечномерный вектор

$$D = \{ | D_{\gamma,\mu,y} |, \gamma \in \Gamma, \mu \in M, y \in N. \quad (8)$$

Множество альтернатив  $\Delta$  соответствует множеству векторов  $D$ . Множество допустимых альтернатив

$$\Delta_\beta = \{ D = \{ | D_{\gamma,\mu,y} |, \text{при } r_i^\beta, i = \overline{1,7} \}, \quad (9)$$

где  $\{ r_i^\beta, i = \overline{1,7} \}$  – множество ограничений, тогда математическая задача сводится к определению оптимально возможной программы

$$D_{\text{опт. воз.}} = \text{Sel} \{ D_{\text{воз.}} = \{ | D_{\gamma,\mu,y} | \text{ при } r_i^\beta \} / \text{ по критериям } f \text{ и } \pi. \quad (10)$$

Ниже приведен перечень ограничений:

1. *Обязательное включение в программу всех тренировок, необходимых для комплексной подготовки экипажа к выполнению программы полета с учетом основных режимов полета (старт, выведение, стыковка, расстыковка, перестыковка, спуск, действия на борту ПКК)*

$$\beta 1: \sum_{\gamma,\mu,y} D_{\gamma,\mu,y} = I_1 \mid I_1 \in \Omega, \forall y, \quad (11)$$

где  $I_1$  – подмножество тренировок, необходимых для комплексной отработки программы полета,  $I_1 \subseteq \Omega$ .

2. *Обязательное включение в программу всех тренировок, необходимых для подготовки экипажа к выполнению программы НПИ*

$$\beta 2: \sum_{\gamma,\mu,y} D_{\gamma,\mu,y} = I_2 \mid I_2 \in \Xi, \forall y, \quad (12)$$

где  $I_2$  – подмножество занятий, необходимых для отработки программы ЦР,  $I_2 \subseteq \Xi$ .

3. *Обязательное включение в программу всех тренировок, необходимых для подготовки экипажа к выполнению программы ВКД*

$$\beta 3: \sum_{\gamma,\mu,y} D_{\gamma,\mu,y} = I_3 \mid I_3 \in Z, \forall y, \quad (13)$$

где  $I_3$  – подмножество занятий, необходимых для отработки циклограмм ВКД,  $I_3 \subseteq Z$ .

4. *Длительность подготовки экипажа ограничена и соответственно суммарный временной ресурс каждого члена экипажа на выполнение всех занятий (тренировок) ограничен*

$$\beta 4: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \times \tau_{y, \mu, \gamma} \leq T_{\text{п}}, \quad \forall \mu \in M. \quad (14)$$

5. Продолжительность подготовки в течение недели ограничена и соответственно суммарный временной ресурс каждого члена экипажа на выполнение всех занятий (тренировок) в течение недели ограничен

$$\beta 5: \sum_{\mu, y} D_{\mu, y} \times \tau_{y, \gamma} \leq T_{\text{н}}, \quad \forall \mu \in M. \quad (15)$$

6. Занятие (тренировка)  $y_l$  может быть выполнено только после выполнения  $y_n$

$$\beta 6: D_{y_n, \gamma_n, \mu_n} - D_{y_l, \gamma_l, \mu_l} \leq 0, \quad \forall y = n, l, y_n < y_l, y_n, y_l \in N_{\text{пр.}}, \quad (16)$$

где  $N_{\text{пр.}}$  – множество занятий (тренировок), связанных между собой условием предшествования.

7. Ограничение на суммарную сложность занятий (тренировок) в течение одной недели

$$\beta 7: \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \times C_{y2} \leq h_{\gamma}, \quad \forall \gamma. \quad (17)$$

Критериями оценки плана являются следующие показатели эффективности плана:

1. Включение в программу наиболее важных  $Y$ .

Все занятия (тренировки), имеющие наибольший уровень важности для выполнения программы полета в соответствии с должностными обязанностями и квалификацией на борту ПКК с учетом представленных ограничений, должны быть включены в программу подготовки.

Таким образом, для важных  $Y_j$

$$f_1(D) = \sum_y D_y \times C_{y1B} \rightarrow \max. \quad (18)$$

2. Включение в программу максимального числа  $Y$  с учетом представленных ограничений

$$f_2(D) = \sum_{\gamma, \mu, y} D_{\gamma, \mu, y} \rightarrow \max, \quad \forall \gamma \in N. \quad (19)$$

Исходя из предложенных критериев (18, 19) интегральный критерий оценки плана подготовки космонавтов к полету  $f$  будет иметь вид:

$$f = a_1 f_1 + a_2 f_2, \quad (20)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  – весовые коэффициенты (исходя из проведенной экспертной оценки, в которой участвовали 7 космонавтов, имеющих опыт подготовки и космических полетов,  $a_1 = 0,75$ ,  $a_2 = 0,25$ ).

Значения показателей рассчитываются по формулам:

$$f_1 = \frac{N_B^{\Pi}}{N_B}, \quad (21)$$

где  $N_B^{\Pi}$  – число занятий с высокой важностью, включенных в программу подготовки экипажа,

$N_B$  – общее возможное число занятий с высокой важностью;

$$f_2 = \frac{N_{\Pi}}{N}, \quad (22)$$

где  $N_{\Pi}$  – число занятий, включенных в программу подготовки экипажа;

$N$  – общее возможное число занятий.

Дополнительными критериями оценки плана в виде «штрафных функций» являются:

1. *Учет располагаемых возможностей по числу тренировок по ТПК и ПКК.*

Результирующее число тренировок  $K_{\text{ТР}}$  должно соответствовать возможному числу тренировок  $K_{\text{ТРВ}}$  [1, 2]. В соответствии с методическими подходами к проведению подготовки экипажей ПКК на ТСПК и на основании опыта подготовки космонавтов для каждого из направлений подготовки определено оптимальное значение между двумя последовательными тренировками  $\tau^o = \{t^o_1, t^o_2, \dots, t^o_\infty\}$ . С учетом допустимой длительности подготовки экипажей ТП можно определить оптимальное количество тренировок в планируемой программе подготовки по каждому направлению  $K_{\text{ТР}}^*$  и, соответственно, оптимальный вектор перерывов между соседними тренировками

$$\tau^* = \{t^*_1, t^*_2, \dots, t^*_{K_{\text{ТР}}^* - 1}\}, \quad (23)$$

тогда

$$\sum_{j=1}^{K_{\text{ТР}}^* - 1} t^*_j = T_n^{K_{\text{ТР}}^*}, \text{ при } t^* = t^o. \quad (24)$$

Влияние различных факторов (изменение программы полета, календарь, изменение числа тренировок и т. д.) могут привести к отклонению от  $\tau^*$ , тогда реальный вектор значений между соседними тренировками будет

$$\tau^p = \{t_1, t_2, \dots, t_{N^p - 1}\} \neq \tau^*, \quad (25)$$

где  $K_{\text{ТР}}^p$  – реальное количество тренировок в программе.

При этом

$$\sum_{j=1}^{K_{\text{ТР}}^p - 1} t_j = T_n^{K_{\text{ТР}}^p} \leq T_n. \quad (26)$$

Промежуток между тренировками должен быть в пределах допустимых границ

$$t_j \in [t_j^H, t_j^B] = \Delta t_j^* \quad (27)$$

Для оценки степени несоблюдения рациональной частоты тренировок используется аддитивный квадратичный критерий [1, 2, 10]

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ТР}}^P - 1} \sum_{j=1}^{K_{\text{ТР}}^P - 1} \frac{4(t_j^* - t_j)^2}{(t_j^*)^2}} \quad (28)$$

В формуле (23) учитывалось

$$t_j - t_j^H = t_j^B - t_j \quad (29)$$

## 2. Соблюдение оптимальной длительности тренировок.

Длительность проведения занятия или тренировки должна быть наиболее рациональной с учетом методических, психологических и физиологических условий. Опыт подготовки показывает, в большинстве случаев наиболее оптимальным является двухчасовая длительность теоретических занятий, а наиболее оптимальной длительностью тренировки является три полетных витка [10]

$$T_{\text{ТР}}^* \approx 3T_{\text{витка}} \pm \Delta T_{\text{ТР}} \quad (30)$$

Время выполнения каждой полетной операции космонавтом зависит от уровня его подготовленности. Для каждой полетной операции определено нормативное время ее выполнения

$$\bar{t}_i^{\text{но}} = f(\lambda_i), \quad (31)$$

где  $\lambda_i$  – уровень тренированности по  $i$ -й полетной операции.

Тогда реальная длительность  $j$ -й тренировки

$$T_{\text{ТР}j}^P = \sum_{i=1}^{N_j^T} \bar{t}_i^{\text{но}}, \quad (32)$$

где  $N_j^T$  – число последовательных операций, выполняемых при проведении  $j$ -й тренировки.

Тогда степень соблюдения  $T_{\text{ТР}}^*$  можно охарактеризовать величиной

$$\theta = \sqrt{\frac{1}{K_{\text{ТР}}^P} \sum_{j=1}^{K_{\text{ТР}}^P} \frac{(T^* - T_{\text{ТР}j}^P)^2}{T_{\text{ТР}}^{*2}}} \quad (33)$$

## 3. Учет отработки необходимых медицинских мероприятий и занятий по физической подготовке.

Все необходимые медицинские мероприятия при подготовке к космическому полету и программа физической подготовки с учетом индивидуальных особенностей космонавта должны быть включены в программу подготовки

$$\eta = \begin{cases} 0, & \text{если мероприятия включены в программу;} \\ 1, & \text{если мероприятия не включены в программу.} \end{cases} \quad (34)$$

4. *Выдерживание порядка возрастания сложности подготовки экипажей по неделям подготовки.*

В процессе подготовки должна сохраняться тенденция постепенного возрастания сложности подготовки по неделям (идеальная функция  $C^*(t_{\text{п}})$  – монотонно возрастающая). Также не допускается резкого возрастания сложности подготовки, например, планирования в один день два занятия высокого уровня сложности. Обозначим:

$C_i(Y_i)$  – сложность  $i$ -го занятия (тренировки);

$C_H(Y_i) = \sum_{i=1}^n C_i(Y_i)$  – сложность занятий (тренировок) за неделю, где  $n$  – число полетных занятий, запланированных на неделю подготовки (учитываются каждые 2 ч подготовки в соответствии с дискретностью планирования).

С точки зрения рассматриваемого показателя, программа составлена наилучшим образом, когда в ней осуществляется последовательное возрастание сложности подготовки. Стремление к такому построению упражнений аналогично требованию минимизации функционала по примеру использования в процессе комплексных тренировок [1, 10]

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{K_H} \sum_{i=1}^{K_H} \left[ \frac{\max_{i=1, K_H} C_H(Y_i) - \min_{i=1, K_H} C_H(Y_i)}{K_H} i + \min_{i=1, K_H} C_H(Y_i) - C_H(Y_i) \right]^2}, \quad (35)$$

где  $K_H$  – количество недель подготовки в программе.

*Интегральный критерий оценки плана в виде «штрафных функций»*  $\pi$  будет иметь следующий вид:

$$\pi = b_1 \cdot \chi + b_2 \cdot \theta + b_3 \cdot \eta + b_4 \cdot \varepsilon, \quad (36)$$

где  $b_1, \dots, b_4$  – весовые коэффициенты (исходя из проведенной экспертной оценки, в которой участвовали 7 космонавтов, имеющих опыт подготовки и космических полетов,  $b_1 = 0,3$ ,  $b_2 = 0,2$ ,  $b_3 = 0,3$ ,  $b_4 = 0,2$ ).

Разработанные показатели качества программы тренировок являются элементами вектора показателя качества  $K$  и могут быть использованы для выбора окончательного варианта программы подготовки космонавтов к космическому полету.

Результаты расчетов показателей эффективности  $f_1, f_2, \chi, \Theta, \eta, \varepsilon$  программы подготовки к космическому полету экипажа МКС-70/71 в соответствии с формулами 20, 21, 28, 33–35 представлены на рис. 1, 2.

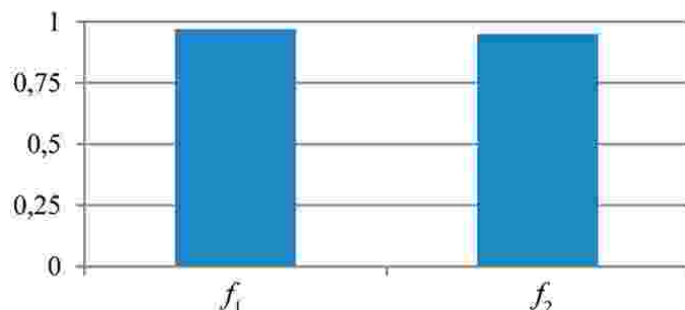


Рис. 1. Значения показателей эффективности программы подготовки экипажа МКС-70/71:

$f_1$  – включение в программу наиболее важных занятий;  $f_2$  – включение в программу максимального числа занятий с учетом предъявляемых ограничений

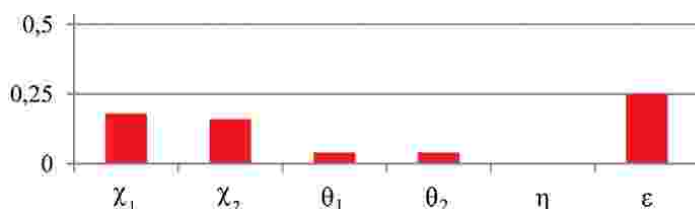


Рис. 2. Значения дополнительных показателей эффективности программы подготовки экипажа (штрафные функции) МКС-70/71:

$\chi_1$  – оценка учета располагаемых возможностей по числу тренировок по ТПК «Союз»;  $\chi_2$  – оценка учета располагаемых возможностей по числу тренировок по РС МКС;  $\theta_1$  – оценка соблюдения оптимальной длительности тренировок по ТПК «Союз»;  $\theta_2$  – оценка соблюдения оптимальной длительности тренировок по РС МКС;  $\eta$  – учет отработки необходимых медицинских мероприятий и занятий по физической подготовке;  $\epsilon$  – оценка выдерживания порядка возрастания сложности подготовки экипажей по неделям подготовки

Оценка эффективности программы подготовки экипажа МКС-70/71 по разработанным показателям указывает, что показатели  $f_1, f_2$  имеют значение близкое к 1, а штрафные функции  $\chi, \theta, \eta, \epsilon$  для указанной программы имеют небольшое значение.

## Выводы

1. Разработанная математическая модель формирования программы подготовки экипажа ПКК предназначена для решения задачи планирования с использованием математического аппарата дискретной математики и реализована как последовательность взаимосвязанных оптимизационных подзадач, при этом окончательный выбор решений из множества возможных вариантов осуществляется руководителем на основе заданных критериев эффективности с учетом выявленных системных ограничений, что обеспечивает

гибкость принятия управленческих решений при сохранении обоснованности предлагаемых вариантов программ подготовки.

2. Разработан многомерный показатель оценки эффективности подготовки космонавтов (6 показателей) для решения условно оптимизационной задачи формирования программы подготовки экипажей ПКК к космическому полету.

3. Для определения оценки эффективности программы подготовки экипажа экспедиции МКС-70/71 рассчитаны числовые значения показателей эффективности  $f_1, f_2, \chi, \Theta, \eta, \varepsilon$  данной программы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Курицын, А.А. Система подготовки космонавтов в Российской Федерации: монография / А.А. Курицын, М.М. Харламов, В.П. Хрипунов. – Звёздный городок: ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», 2020. – ISBN 978-5-9908008-3-0. – 317 с.
2. Чуб, Н.А. Методика формирования программ подготовки экипажей перспективных пилотируемых космических комплексов: дис... канд. техн. наук: 2.3.1 / Чуб Николай Александрович. – Москва, 2025. – 146 с.
3. Вентцель, Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – Москва, Наука, 1988. – 206 с.
4. Курицын, А.А. Подход к формированию комплексов научной аппаратуры перспективных пилотируемых научных модулей с использованием аппарата дискретной математики / А.А. Курицын, И.В. Кутник, Н.А. Чуб // Космонавтика и ракетостроение. – 2021. – № 4(121). – С. 66–81.
5. Подиновский, В.В. Методы многокритериальной оптимизации / В.В. Подиновский. – Москва: ВИА им. Ф.Э. Дзержинского, 1971. – 93 с.
6. Подиновский, В.В. Лексикографические задачи оптимизации / В.В. Подиновский. – Москва: ВИА им. Ф.Э. Дзержинского, 1972. – 111 с.
7. Кутник, И.В. Метод определения состава целевых работ и научной аппаратуры перспективных пилотируемых космических комплексов: дис... канд. техн. наук: 2.3.1 / Кутник Ирина Владимировна. – М., 2024. – 184 с.
8. Советов, Б.Я. Теоретические основы автоматизированного управления: Учебник для вузов / Б.Я. Советов, В.В. Цехановский, В.Д. Чертовский. – Москва: Высш. шк., 2006. – 463 с. – ISBN 5-06-005496-9.
9. Алексеев, В.Е. Дискретная математика: Учебное пособие / В.Е. Алексеев. – Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2017. – 139 с.
10. Онуфриенко, Ю.И. Повышение эффективности активной эксплуатации орбитальных пилотируемых комплексов на основе методик и моделей информационного обеспечения космических полетов и подготовки космонавтов по нештатным ситуациям: дис... канд. техн. наук: 05.07.10 / Онуфриенко Юрий Иванович. – Москва, 2017. – 207 с.

#### REFERENCES

1. Kuritsyn, A.A. Cosmonaut Training System in the Russian Federation: Monograph / A.A. Kuritsyn, M.M. Kharlamov, V.P. Khripunov. – Zvezdny Gorodok, 2020. – ISBN 978-5-9908008-3-0. – 317 p.

2. Chub, N.A. Methods of Developing Crew Training Program for Spaceflight Onboard Future Space Complexes: Thesis... Candidate of Technical Sciences. – Moscow, 2025. – 146 p.
3. Venttsel, E.S. Analysis of Operations. Tasks, Principles, Methods / E.S. Venttsel. Moscow: Nauka, 1988. – 206 c.
4. Kuritsyn, A.A. Approach to the Creation of the Scientific Equipment Complexes for Future Manned Scientific Modules Using the Apparatus of Discrete Mathematics / A.A. Kuritsyn, I.V. Kutnik, N.A. Chub. Cosmonautics and Rocket Engineering. – 2021. – No 4(121). – P. 66–81.
5. Podinovskiy, V.V. Methods of Multicriterion Optimization / V.V. Podinovskiy. Moscow: VIA named after F.E. Dzerzhinskiy, 1971. – 93 p.
6. Podinovskiy, V.V. Lexicographic Tasks of Optimization / V.V. Podinovskiy. Moscow: VIA named after F.E. Dzerzhinskiy, 1972. – 111 p.
7. Kutnik, I.V. Methods of Determining Composition of Specific Operations and Scientific Equipment of Future Manned Space Complexes: Thesis... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2024. – 184 p.
8. Sovetov, B.Ya. Theoretical Basis of Computer-Assisted Management: Training Manual for Higher Education Institutions / B.Ya. Sovetov, V.V. Tsekhanovskiy, V.D. Chertovskiy. Moscow: Vysshaya Shkola, 2006. – 463 p. – ISBN 5-06-005496-9.
9. Alekseyev, V.E. Discrete Mathematics: Training Manual / V.E. Alekseyev. Nizhniy Novgorod: NGU named after N.I. Lobachevskiy, 2017. – 139 p.
10. Onufriyenko, Yu.I. Improving Efficiency of Orbital Manned Complexes Active Utilization Based on Methods and Models of Data Support During Spaceflights and Cosmonaut Training on Emergency Situations: Thesis... Candidate of Technical Sciences. – Moscow, 2017. – 207 p.