

УДК 519.854.2

ББК 22.1

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ RCPSP ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ

Лазарев А.А.¹

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва,

(ФГБОУ ВПО Московский государственный университет

им. М.В. Ломоносова, Москва,

*(ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики», МЛАВР,*

Москва,

(ФГБОУ ВПО Московский физико-технический институт

(государственный университет), Москва)

Бронников С.В.²

(Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им.

С.П. Королёва, Королёв)

Герасимов А.Р.³

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Мусатова Е.Г.⁴

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Петров А.С.⁵

¹ Александр Алексеевич Лазарев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, (jobmath@mail.ru), г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, тел. (495) 334-87-51).

² Бронников Сергей Васильевич, кандидат технических наук, начальник отделения (sergey.bronnikov@rsce.ru).

³ Герасимов Алексей Романович, техник, (alexey9113@gmail.com).

⁴ Мусатова Елена Геннадьевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, (nekolyap@mail.ru).

⁵ Петров Алексей Сергеевич, техник, (petrovalexeyserg@gmail.com).

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*(ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики», МЛАВР,
Москва)*

Пономарев К.В.¹

*(Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звёздный
городок)*

Харламов М.М.²

*(Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звёздный
городок)*

Хуснуллин Н.Ф.³

(ФГБУН Институт проблем управления им.

В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Ядренцев Д.А.⁴

*(Научно-исследовательский испытательный центр
подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звёздный
городок)*

*Рассматривается задача планирования подготовки
космонавтов для работы на Международной космической
станции. Разработана математическая модель календарного
планирования, описывающие подготовку космонавтов.*

*1 Пономарев Константин Владимирович, зам. начальника отдела,
(k.ponomarev@gctc.ru).*

*2 Харламов Максим Михайлович, зам. начальника,
(m.kharlamov@gctc.ru).*

*3 Хуснуллин Наиль Фаридович, старший инженер-разработчик,
(nhusnullin@gmail.com).*

*4 Ядренцев Денис Александрович, начальник отдела,
(D.Yadrentsev@gctc.ru).*

Предложены методы решения задачи, а также проведено исследование на реальных исходных данных.

теория расписаний, комбинаторная оптимизация, планирование,
Международная космическая станция

1. Введение

Среди множества разнообразных задач, возникающих в космонавтике, особое место занимают задачи планирования. Для успешной работы экипажей Международной космической станции (МКС) требуется составление подробного расписания подготовки космонавтов.

В данный момент расписания подготовки космонавтов составляются специалистами ЦПК «вручную». Соответственно каждое изменение плана подготовки при возникновении нестандартных ситуаций приводит к значительным трудозатратам, так как необходимо решать задачу большой размерности с горизонтом планирования до 2-3 лет. Кроме этого, на подготовке на разных этапах, находится около 30 космонавтов (10 экипажей), каждый обучаемый имеет индивидуальный план и объем подготовки, который зависит от опыта прошлых экспедиций и роли в предстоящем полёте [1,2,3].

Вышеперечисленные факторы обусловили необходимость разработки новых методов построения расписаний и автоматизации процесса планирования подготовки экипажей для работы на МКС.

2. Постановка задачи

Зададим временные интервалы.

W - множество рабочих недель в планируемом периоде. Максимально $|W| = 156$ недель (3 года).

$D_w = \{1,2,3,4,5\}$ множество рабочих дней в неделе $w \in W$. При необходимости оператор может изменить данное множество для любой из недель, уменьшив количество дней

(например, планируемый период начинается не с понедельника, на данную неделю выпадают праздничные дни и т.д.) или, в некоторых случаях, увеличив.

$H_{wd} = \{1, 2, \dots, 18\}$ множество получасовых интервалов в рабочий день $d \in D$ недели $w \in W$. Например, первый интервал начинается в 9:00, а последний заканчивается в 18:00. В некоторых случаях возможно изменение длительности рабочего дня. В ЦПК при планировании также используется получасовой интервал в качестве единицы времени.

В случае, когда все недели и рабочие дни стандартные (т.е. $D_w = D = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $H_{wd} = H = \{1, 2, \dots, 18\}$), имеем $|T| = |W| \cdot |D| \cdot |H| = 14040$, а значение $t(w, d, h)$ может быть вычислено по формуле $t(w, d, h) = (w - 1) \cdot |D| \cdot |H| + (d - 1) \cdot |H| + h$.

В общем случае получаем

$$t(w, d, h) = \sum_{w'=1}^{w-1} \sum_{d' \in D_{w'}} |H_{w'd'}| + \sum_{d'=1}^{d-1} |H_{wd'}| + h.$$

Обозначим множество всех троек (w, d, h) через Y :

$$Y = \{(w, d, h) | w \in W, d \in D_w, h \in H_{wd}\}.$$

Введем обозначения.

- I – множество всех космонавтов.
- J – множество всех этапов подготовки (занятий).
- C – множество экипажей.
- I_c – множество космонавтов из экипажа $c \in C$.
- J_c – множество занятий экипажа $c \in C$.
- V_i – множество бортовых комплексов, которые необходимо изучить космонавту i , $i \in I$.
- J_i – множество занятий космонавта i .
- J_i^F – множество этапов физической подготовки космонавта i .
- p_j – длительность занятия $j \in J$.
- R – множество возобновляемых ресурсов. Каждый космонавт также является ресурсом, доступным в количестве 1 в течение рабочего дня.

- JR_r – множество занятий, для проведения которых требуется ресурс $r \in R$.
- ra_{rwdh} – количество ресурса $r \in R$, доступное в интервале h дня d недели w .
- rc_{jr} – количество ресурса $r \in R$, требуемое для проведения занятия $j \in J$.
- $G_i = (J_i, \Gamma_i)$ – граф отношений предшествования между занятиями космонавта i . Если $(j_1, j_2) \in \Gamma_i$, то занятие j_1 должно выполняться раньше, чем занятие j_2 .

Введем булеву переменную x_{jwdh} , которая равна 1 тогда и только тогда, когда в интервал h дня d недели w начинается занятие $j \in J$. В противном случае переменная равна 0.

3. Ограничения задачи.

В каждый интервал времени должно быть достаточно ресурсов:

$$(3.1) \quad \sum_{j \in JR_r} rc_{jr} \sum_{\substack{h' > 0, \\ h - p_j + 1 \leq h' \leq h}} x_{jwdh'} \leq ra_{rwdh},$$

$$\forall r \in R, \forall (w, d, h) \in Y.$$

В неравенстве 3.1. для каждого $(w, d, h) \in Y$ рассматриваются только занятия, выполняемые в данный момент, т.е. начавшиеся в интервале $[h - p_j + 1; h]$. Количество необходимых для данных занятий ресурсов не должно превосходить ra_{rwdh} .

Все космонавты должны пройти все этапы в необходимом объеме:

$$(3.2) \quad \sum_{\substack{(w, d, h) \in Y, \\ h + p_j - 1 \leq |H_{wd}|}} x_{jwdh} = 1, \quad \forall j \in J.$$

Неравенство $h + p_j - 1 \leq |H_{wd}|$ под знаком суммы означает, что необходимо проведение каждого занятия в течение дня, без переноса на следующий день.

В неделю у каждого космонавта должно быть не более a_f занятий физической подготовкой:

$$(3.3) \quad \sum_{j \in J_i^F} \sum_{d \in D_w} \sum_{h \in H_{wd}} x_{jwdh} \leq a_f, \quad \forall i \in I, \forall w \in W.$$

При этом не может быть больше b_f занятий физической подготовкой в день:

$$(3.4) \quad \sum_{j \in J_i^F} \sum_{h \in H_{wd}} x_{jwdh} \leq b_f, \quad \forall i \in I, \forall w \in W, \forall d \in D_w.$$

Аналогичные ограничения вводятся для изучения иностранного языка.

Отношения предшествования принимают следующий вид:

$$(3.5) \quad \sum_{(w,d,h) \in Y} t(w, d, h)(x_{j_2wdh} - x_{j_1wdh}) \geq p_{j_1},$$

$$\forall i \in I, \quad \forall (j_1, j_2) \in \Gamma_i.$$

Ограничения на одновременное проведение занятий:

(3.6)

$$x_{j_1wdh} = x_{j_2wdh}, \quad \forall (j_1, j_2) \in J_{12}^c, \quad \forall (w, d, h) \in Y, \quad \forall c \in C,$$

$$(3.7) \quad x_{j_1wdh} = x_{j_2wdh} = x_{j_3wdh},$$

$$\forall (j_1, j_2, j_3) \in J_{123}^c, \quad \forall (w, d, h) \in Y, \quad \forall c \in C,$$

где J_{12}^c , J_{123}^c — множества занятий, проводимых одновременно двумя или тремя членами экипажа с соответственно.

Таким образом, ставится задача построения расписания, удовлетворяющего ограничениям (3.1)–(3.7). В общем случае данная задача является NP-трудной в сильном смысле.

4. Методы решения и вычислительный эксперимент

Для решения задачи (3.1)-(3.7) использовалось два подхода на базе решателей IBM ILOG CPLEX. Первый подход — применение, решателя MIP Optimizer, предназначенного для решения задач целочисленного линейного программирования. Второй подход к решению задачи календарного планирования заключался в использовании решателя программирования в ограничениях CP Optimizer.

В качестве исходных данных для вычислительного эксперимента были использованы реальные данные по подготовке космонавтов для работы с ТПК «Союз», предоставленные ЦПК.

В вычислительном эксперименте БК были расположены цепочкой. Рассматривалась задача составления расписания для одного экипажа из трех космонавтов.

В таблице 1 представлены сравнительные результаты решения задачи 3.1-3.7 с использованием IBM ILOG CPLEX MIP и IBM ILOG CPLEX CP. Вычисления осуществлялись на рабочей станции с процессором Intel Xeon E5-2673, 2.4GHz и 15Gb оперативной памяти. В таблице использовались следующие обозначения: # — номер тестового примера, Время, с — время в секундах, Перем. — количество переменных в задаче, Огр. — количество ограничений, Итер. — количество итераций алгоритма, Ветв. — количество ветвлений алгоритма. Из эксперимента видно явное преимущество использования подхода программирования в ограничениях.

Таблица 2: Сравнение двух подходов к решению задачи календарного планирования для 1 экипажа

	CPLEX MIP				CPLEX CP			
	Время, с	Перем .	Огр.	Итер.	Время , с	Перем .	Огр .	Ветв .
1	09.06	26820	37620	21922	0.250	291	217 0	1272
2	30.75	52680	60066	54234	0.329	363	278 8	1512
3	374.63	11520 0	12546 6	2022320	0.610	642	434 8	2912
4	346.30	14448 0	15792 0	820534	0.640	654	437 4	2648
5	6657.9 8	20400 0	21064 6	1691701 4	1.317	852	573 8	3448

5. Заключение

В статье описаны особенности планирования подготовки космонавтов к выполнению космических полётов и обоснована актуальность проблемы составления расписания подготовки. Предложена математическая модель планирования подготовки космонавтов к работе на МКС. Предложены методы решения поставленной задачи, проведены вычислительные эксперименты на реальных данных.

В дальнейшем планируется доработка математической модели для поддержки других видов подготовок, в частности, для работы на РС МКС, разработка автоматизированного рабочего места (АРМ), которое позволит ускорить процесс планирования подготовки экипажей для работы на МКС.

Литература

1. БЕЛЯЕВ А.М., БУДНИКОВА Т.С., КОЗЛЕЧКОВ А.Г., КОЛОКОЛЬЦЕВА О.М., СТАНИЛОВСКАЯ В.И. *Автоматизированная система планирования полета российского сегмента междуна- родной космической*

*станции // Программные продукты и системы. - 2013. - №3.
- С.48-54.*

2. БРОННИКОВ С.В., *Разработка требований к подготовке экипажей космической станции //Космическая техника и технологии. - 2015. - №1(8). - С.81-87.*
3. *Рабочие материалы научно-исследовательского испытательного центра подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина.*

MATHEMATICAL MODELING OF THE ASTRONAUT TRAINING SCHEDULING

Alexander Lazarev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow State University, International Laboratory of Decision Choice and Analysis Higher School of Economics, Moscow Institute of Physics and Technology State University, Moscow, Doctor of Science, professor (Moscow, Profsoyuznaya st., 65, (495)334-87-51, jobmath@mail.ru).

Sergey Bronnikov, Rocket and Space Corporation Energia after S.P. Korolev, Moscow, Cand.Sc., Head of Department (sergey.bronnikov@rsce.ru).

Aleksey Gerasimov, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., Researcher, (alexey9113@gmail.com).

Elena Musatova, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., Senior Researcher, (nekolyap@mail.ru).

Aleksey Petrov, Institute of Control Sciences of RAS, International Laboratory of Decision Choice and Analysis, Higher School of Economics, Moscow, Junior Researcher (petrovalexeyserg@gmail.com).

Konstantin Ponomarev, YU.A. Gagarin Research Test Cosmonaut Training Center, Star City, Deputy Head of Department (k.ponomarev@gctc.ru).

Maxim Kharlamov, YU.A. Gagarin Research Test Cosmonaut Training Center, Star City, Deputy Head (m.kharlamov@gctc.ru).

Nail Khusnullin, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Senior Software Developer (nhusnullin@gmail.com).