

## Обзор проблемных вопросов создания мультироторного летательного аппарата для исследования Венеры

© М.Ю. Яценко, В.А. Воронцов, В.В. Рыжков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ), Москва, 125993, Россия

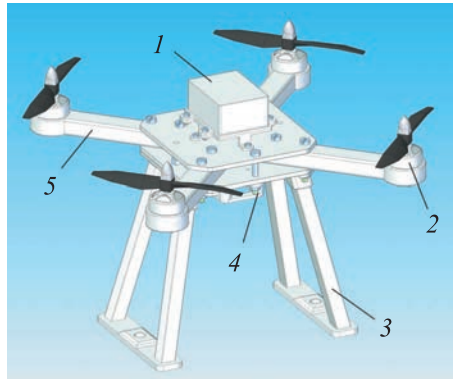
*Рассмотрены проблемы, которые могут возникнуть в процессе исследования проектных ситуаций при создании мультироторного летательного аппарата (ЛА), впервые предложенного как техническое средство для исследования планеты Венера в составе перспективного венерианского космического аппарата. В ходе его создания были выявлены критические ситуации, которые должны быть проработаны уже на ранних этапах проектирования мультироторного ЛА как сложной технической системы исследования Венеры и учтены при разработке программы его непосредственного функционирования на этой планете. Для того чтобы наглядно представить ее результаты, была составлена сводная матрица проблем, в которой отражены различные подлежащие разрешению ситуации, возникающие в ходе реализации схемы эксперимента по контактному изучению атмосферы и поверхности планеты Венера. Для этого мультироторный ЛА был декомпозирован на несколько подсистем и были рассмотрены основные этапы его функционирования в атмосфере Венеры.*

**Ключевые слова:** Венера, мультироторный летательный аппарат, спускаемый аппарат, венерианский космический аппарат, техническое средство, схема эксперимента, проблемная ситуация, матрица проблем, сложная техническая система

**Введение.** Венера, являющаяся наряду с Марсом и Меркурием планетой земной группы, привлекает ученых-исследователей и инженеров своей схожестью с Землей, в частности, размерами, массой, получаемым от Солнца количеством теплоты и пр. Исследование планеты Венера сейчас находится на этапе «Планомерное исследование» [1], в связи с чем требуется увеличить количество венерианских миссий и разработать новые технические средства для ее изучения.

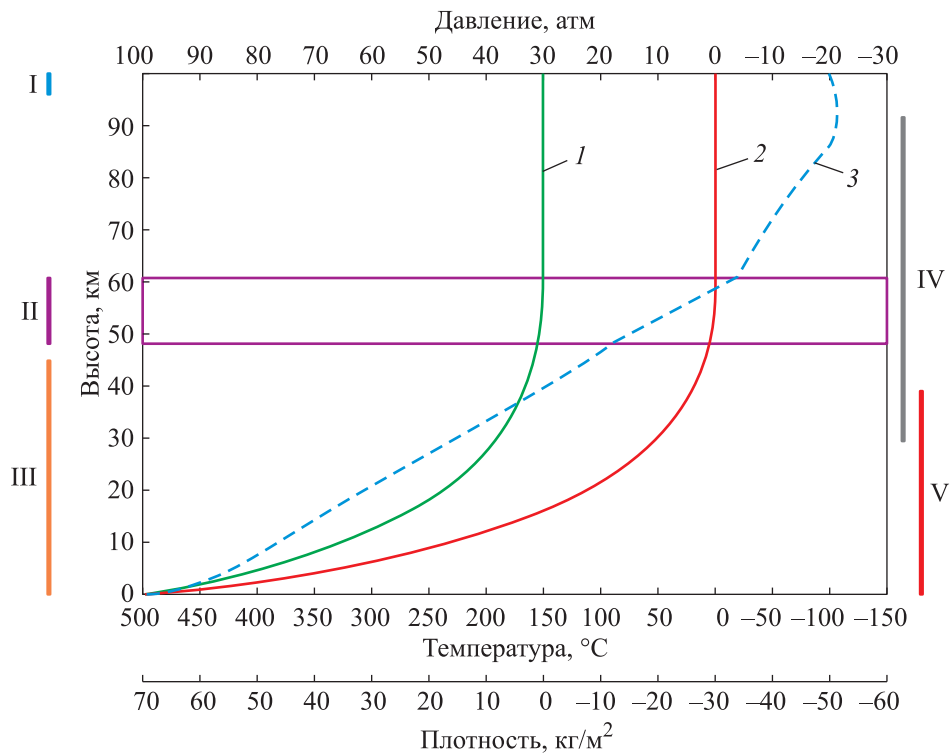
В представленной работе объектом исследования выступает мультироторный летательный аппарат (МРЛА), который впервые предлагается использовать как техническое средство для исследования Венеры в составе перспективного венерианского космического аппарата (рис. 1) [2].

Предполагается, что такие аппараты будут функционировать в течение определенного времени  $\Delta t$  [мин] в потребных эшелонах высот  $\mathcal{E} = (\Delta H_1, \dots, \Delta H_N)$  [км]. Для того чтобы выявить проблемные вопросы функционирования МРЛА в атмосфере Венеры, рассмотрим эшелоны высот атмосферы с различными условиями, в том числе и экстремальными, а также приповерхностный слой и посадку (рис. 2).



**Рис. 1.** Мультироторный летательный аппарат для исследования Венеры:

1 — приборный отсек; 2 — винтомоторная группа; 3 — опоры для крепления (посадочные опоры); 4 — адаптер крепления полезной нагрузки; 5 — балка винтомоторной группы



**Рис. 2.** Модель атмосферы Венеры: изменение давления (1), плотности (2) и температуры (3) по высоте:

I — озоновый слой; II — диапазон высот, постоянно закрытый облаками; III — диапазон высот прямой видимости в оптическом диапазоне днем; IV — диапазон высот с дымкой на ночной стороне; V — диапазон высот высокой температуры и плотности атмосферы

Такое техническое средство, как МРЛА, создают в целях решения следующих научных задач:

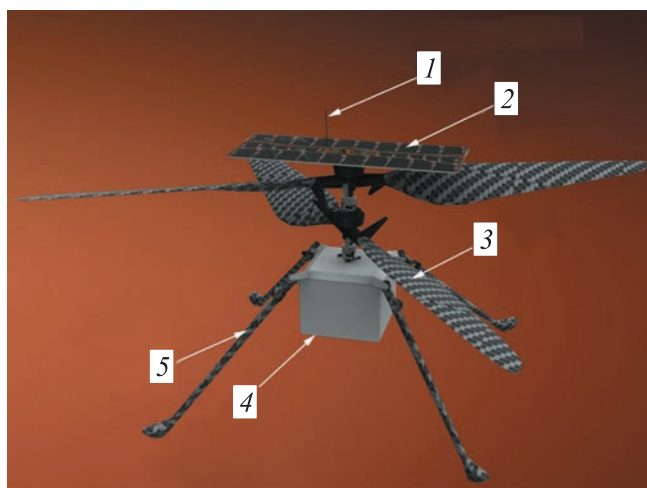
- сбора данных о составе и свойствах атмосферы;
- фото- и видеосъемки атмосферы и поверхности;
- проведения измерений сейсмической активности планеты.

В частности, предполагается провести исследования, позволяющие определить температуру, давление, тепловые потоки, скорость ветра; строение, состав и микрофизические параметры облаков; химический состав атмосферы; скорость потерь в составе атмосферы; состав и строение облачного слоя.

Цель настоящей работы — обзор проблемных вопросов и исследование проблемных ситуаций на начальном этапе проектирования МРЛА.

**Обзор разработанных технических средств.** В ходе работы были рассмотрены существующие роторные (винтовые) технические средства в составе спускаемых аппаратов исследовательских миссий, способные функционировать в атмосфере других планет, в частности, марсианский вертолет NASA Ingenuity, а также перспективный винтовой летательный аппарат вертикального взлета и посадки (ВЛАВВП).

**Марсианский вертолет Ingenuity.** Техническим средством с роторным устройством, запущенным на Марс в конце июля 2020 г., является вертолет NASA Ingenuity массой 1,8 кг (рис. 3). Двигатель у Ingenuity — лопастной винт, а именно две пары лопастей, каждая диаметром 1210 мм.



**Рис. 3.** Марсианский вертолет Ingenuity:

1 — антенна; 2 — солнечная батарея; 3 — лопасть ротора; 4 — электронный блок фюзеляжа с основной электроникой (батареи, сенсоры и камера); 5 — посадочные опоры (шасси)

Основные технические характеристики вертолета Ingenuity [3, 4]:

Масса ЛА, кг .....	1,8
Габариты ЛА, мм .....	136×195×163
Диаметр лопастей (×2), мм .....	1210
Дальность полета, м .....	300
Высота полета, м .....	12
Скорость, м/с:	
полета .....	10
набора высоты .....	4
снижения .....	1
Частота вращения винта, об/мин .....	2400–2900
Зона радиовидимости, м .....	1000
Ресурс шасси, число посадок .....	100
Критическая температура, °С .....	–15
Габариты солнечных батарей, мм .....	425×165
Разрешение камеры, Мп .....	13

Основная задача этого марсианского вертолета — технологическая демонстрация первого полета на Марс. Однако следует заметить, что условия на Марсе и Венере сильно различаются. На поверхности Венеры средняя температура составляет 462 °С, а на поверхности Марса она равна –60 °С, что обусловлено разным расстоянием этих планет до Солнца (Венера — ближе, Марс — значительно дальше) и разной плотностью атмосферы (плотность атмосферы Венеры примерно в 5000 раз больше, чем у Марса). Таким образом, результаты сравнительного анализа позволяют сделать вывод о том, с точки зрения плотности атмосфера Венеры более благоприятна, чем у Марса, для использования роторных устройств в конструкции технических средств, предназначенных для исследования.

**Перспективный винтовой летательный аппарат вертикального взлета и посадки.** Авторы работы [5] предлагают оснащать аппараты для исследовательских миссий на другие планеты техническими средствами, совершающими управляемый полет с помощью винтов, например, таким как ВЛАВВП (рис. 4), облик которого представлен в работе [6].

Данный аппарат, относящийся к классу скоростных вертолетов, имеет вытянутую форму, хорошую с точки зрения аэродинамики. На его продольной оси закреплены два воздушных винта, вращающихся в противоположных направлениях, а на хвостовой части установлены рули тангажа, крена и рыскания. Предполагается, что этот ЛА способен осуществлять вертикальный взлет с поверхности и затем изменять свое положение практически на горизонтальное во время полета. Аппараты такого типа подходят для движения в атмосфере Венеры.

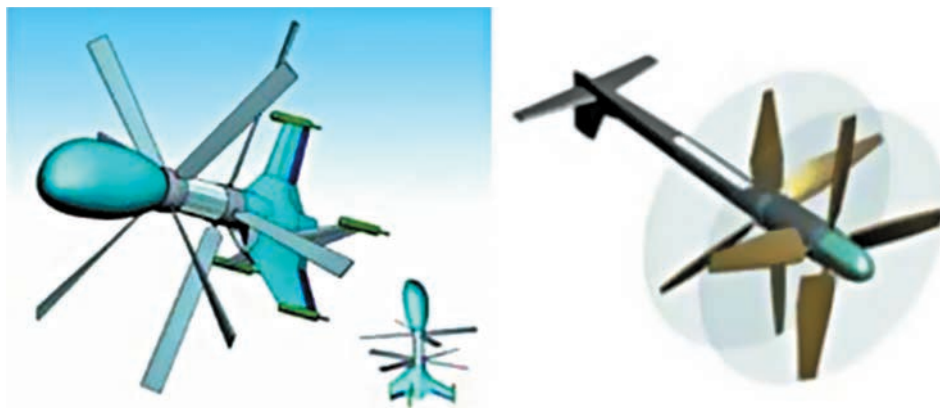


Рис. 4. Общий вид (двух вариантов) перспективного ВЛАВВП

Они могут развивать более высокие скорости, чем обычные вертолеты и МРЛА, а их горизонтальное передвижение отличается улучшенной устойчивостью и управляемостью за счет размеров и хорошей с точки зрения аэродинамики формы корпуса.

Однако у рассматриваемого ВЛАВВП имеются недостатки, для устранения которых требуется разрешить следующие проблемы:

- неопределенность, касающаяся времени функционирования и типа системы накопления энергии (источники питания для систем);
- сложности размещения в спускаемом аппарате и определения способа ввода в действие в атмосфере исследуемой планеты;
- необходимость использования сложных двигательных установок с широким диапазоном скоростей вращения винтов, в связи с чем увеличивается масса аппарата.

**Исследование проблемных ситуаций при создании мультироторного летательного аппарата.** При разработке МРЛА для исследования атмосферы и поверхности Венеры, как и любой другой сложной технической системы, требуется решить множество проблемных вопросов и противоречий [7]. Большинство из них (в первую очередь, наиболее критические) должны быть выявлены и решены еще на ранних этапах проектирования и формирования схемы эксперимента.

В рамках подготовки такого исследования была разработана математическая модель, представляющая собой совокупность уравнений и неравенств, которые приведены ниже. Эта модель отражает массогабаритные характеристики МРЛА, а также распределение параметров атмосферы Венеры по высоте. Предполагается, что МРЛА будет функционировать в нескольких эшелонах высот (в зависимости от решаемых задач), каждый из которых содержит диапазон высот ( $\Delta H$ ), соответствующих набору уникальных значений параметров атмосферы Венеры:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{рот}} \geq 3, \\ N_{\text{рот}} = 2n (n \in \mathbb{Z}_0), \\ m_{\text{рамы}} = \frac{(N_{\text{рот}})^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \sin \frac{\pi}{N_{\text{рот}}}\right)^{\frac{5}{3}}} \rightarrow \min; \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R + r_{\text{в}} \leq 0,5D_{\text{max}}, \\ r_{\text{в}} < R \sin \left( \frac{\pi}{N_{\text{рот}}} \right), \\ \frac{r_{\text{в}}}{R} = \alpha; \end{array} \right. \quad (2)$$

$$M_{\text{МРЛА}} = \pi \rho \frac{r_{\text{в}}^2 h^2 n^2 N_{\text{рот}}}{g_{\text{в}}}; \quad (3)$$

$$\mathcal{E}_N(\Delta H) = \begin{pmatrix} H_1 : (\rho_1^N, t_1^N, p_1^N, w_1^N) \\ \vdots \\ H_i : (\rho_i^N, t_i^N, p_i^N, w_i^N) \\ \vdots \\ H_m : (\rho_m^N, t_m^N, p_m^N, w_m^N) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$i = \overline{1, m}$ .

Здесь  $N_{\text{рот}}$  — число винтов;  $m_{\text{рамы}}$  — масса рамы винтомоторной группы (балок);  $n$  — число оборотов винта;  $\mathbb{Z}_0$  — множество целых неотрицательных чисел;  $R$  — радиус окружности, проходящей через ось винта;  $D_{\text{max}}$  — диаметр зоны размещения МРЛА в спускаемом аппарате;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности (габаритных параметров);  $r_{\text{в}}$  — радиус винта;  $M_{\text{МРЛА}}$  — взлетная масса МРЛА;  $h$  — шаг винта;  $g_{\text{в}}$  — ускорение свободного падения на Венере;  $H$  — высота над поверхностью Венеры;  $\rho$  — плотность атмосферы Венеры;  $N$  — номер рассматриваемого эшелона высот;  $t$  — температура в атмосфере Венеры;  $p$  — давление в атмосфере Венеры;  $w$  — величина ветровой нагрузки.

В ходе исследования составлен перечень возможных проблемных ситуаций, которые могут возникнуть при функционировании МРЛА на Венере. Впоследствии этот перечень был переработан для

представления в виде матрицы проблем. Для этого укрупненно были выделены подсистемы МРЛА (рис. 5) [8] и этапы его функционирования.



**Рис. 5.** Основные подсистемы мультироторного летательного аппарата

Так, были определены следующие подсистемы МРЛА:

- система отделения, обеспечивающая жесткое закрепление МРЛА в десантном модуле и последующее разделение с ним с заданными параметрами;
- силовая установка с винтомоторной группой (ВМГ), которая служит для жесткой установки ВМГ и создания тяги аппарата;
- система управления электродвигателями, обеспечивающая требуемые динамические параметры МРЛА при выполнении траекторных операций;
- система накопления энергии, необходимая для автономного питания различных подсистем и элементов МРЛА;
- система обеспечения функционирования аппаратуры, которая гарантирует корректность работы элементов полезной нагрузки МРЛА при реализации схемы эксперимента.

Были выделены такие этапы функционирования МРЛА, как:

- ввод в действие (со спускаемого, посадочного аппарата или с аэростатической платформы-носителя);
- управляемое движение в атмосфере (взлет, полет, посадка, стыковка);
- функционирование научной аппаратуры;
- движение в режиме авторотации.

С учетом условий окружающей среды на Венере [9–12] рассмотрим выявленные проблемы, которые могут вызывать вопросы на этапах функционирования МРЛА:

на этапе «Ввод в действие»:

- выбор высоты и способа ввода в действие;
- гарантированное срабатывание средств разделения и последующее отделение МРЛА согласно схеме проведения эксперимента;
- обеспечение безударного расхождения МРЛА и спускаемого (СА), посадочного аппарата (ПА) или аэростатической платформы-носителя (АСПН);
- воздействие ударных и прочих нагрузок как на МРЛА, так и на СА, ПА и АСПН;
- повреждение элементов подсистем МРЛА и научной аппаратуры;
- повреждение аккумуляторной батареи МРЛА при посадке в составе ПА или при развертывании АСПН;
- обеспечение системой управления гарантированного запуска двигателей в заданный момент и возвращения МРЛА в положение равновесия после отделения;

на этапе «Движение в атмосфере» (с учетом обозначенного выше):

- стабилизация МРЛА и поддержание его в таком состоянии;
- функционирование силовой установки с ВМГ и узлов трения на заданных режимах, а также в условиях агрессивной атмосферы, ее суперротации и ветров;
- соответствие времени работы системы накопления энергии требуемому;
- нарушение связи системы накопления энергии с ВМГ;
- преждевременное начало работы и выход из строя научной аппаратуры МРЛА при выполнении траекторных операций;
- воздействие перегрузок и подготовка к посадке;
- повреждение аккумуляторной батареи МРЛА при посадке на поверхность Венеры;

на этапе «Движение в режиме авторотации»:

- гарантированный переход МРЛА в этот режим и разблокирование винтов для обеспечения их самовращения;
- корректная работа подсистем МРЛА, прежде всего системы накопления энергии для обеспечения ее подзарядки от привода авторотирующего винта;

на этапе «Функционирование научной аппаратуры»:

- корректная работа в условиях окружающей среды планеты;
- динамика движения, соответствующая созданию условий, которые необходимы для работы аппаратуры;
- осуществление оптимального управления МРЛА;
- выполнение программы научных исследований путем реализации схемы эксперимента согласно требуемым параметрам.

**Матрица проблем.** Все выявленные в ходе исследования проблемы наглядно представлены в виде матрицы (табл. 1–3), которую можно использовать в качестве одного из инструментов поддержки



для формирования набора технических решений при проектировании МРЛА для исследования Венеры. В данной статье для удобства единая матрица проблем разделена на три таблицы.

Матрица проблем представляет собой таблицу, в которой по горизонтали расположены основные этапы функционирования рассматриваемого технического средства исследования (в данном случае — МРЛА) в атмосфере Венеры (с требуемой степенью детальности), а по вертикали — системы этого технического средства.

Таблица 1

**Матрица проблем при разработке МРЛА на этапе «Ввод в действие» в атмосфере Венеры (с борта другого технического средства)**

Система	СА	ПА	АСПН
Система отделения	Выбор высоты и способа ввода в действие. Гарантированное срабатывание средств разделения и последующее отделение МРЛА согласно схеме эксперимента. Обеспечение безударного расхождения МРЛА и СА, ПА или АСПН		
Силовая установка с винтомоторной группой	Воздействие ударных и прочих нагрузок на элементы силовой установки и ВМГ МРЛА		
Система управления электродвигателями	Обеспечение гарантированного запуска двигателей в заданный момент и возвращения МРЛА в положение равновесия после отделения		
Система накопления энергии — аккумуляторные батареи (АБ)	—	Повреждение АБ при посадке в составе ПА	Повреждение АБ при разворачивании АСПН
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Повреждение научной аппаратуры и приборов	Повреждение элементов подсистем МРЛА и научной аппаратуры при посадке в составе ПА	Повреждение элементов подсистем МРЛА и научной аппаратуры при разворачивании АСПН

Таблица 2

**Матрица проблем при разработке МРЛА на этапе «Управляемое движение» в атмосфере Венеры**

Система	Взлет	Полет	Посадка
Система отделения	—	—	—
Силовая установка с винтомоторной группой	Функционирование силовой установки с ВМГ и узлов трения на заданных режимах и высотах, а также в условиях агрессивной атмосферы, ее суперротации и ветров. Воздействие перегрузок		

Система	Взлет	Полет	Посадка
Система управления электродвигателями	Обеспечение гарантированного запуска двигателей в заданный момент и возвращения МРЛА в положение равновесия после отделения	Стабилизация МРЛА и поддержание его в таком состоянии	Стабилизация МРЛА и поддержание его в таком состоянии. Подготовка к посадке
Система накопления энергии	Нарушение связи с ВМГ	Соответствие времени работы системы накопления энергии заданному	Повреждение АБ при посадке на поверхность
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Выход из строя научной аппаратуры МРЛА при совершении траекторных операций. Включение во время движения		Выход из строя научной аппаратуры МРЛА при совершении траекторных операций

Таблица 3

**Матрица проблем при разработке МРЛА на этапах «Движение в режиме авторотации» и «Функционирование научной аппаратуры»**

Система	Движение в режиме авторотации	Функционирование научной аппаратуры
Система отделения	—	—
Силовая установка с винтомоторной группой	Разблокирование винтов для обеспечения их самовращения	Нужная динамика движения для создания потребных условий для работы аппаратуры
Система управления электродвигателями	Гарантированный переход МРЛА на этот режим	Нужная динамика движения для создания потребных условий для работы аппаратуры.
Система накопления энергии	Гарантированный переход МРЛА на этот режим	Осуществление оптимального управления мультироторным летательным аппаратом
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Выход из строя научной аппаратуры МРЛА при совершении траекторных операций	Выполнение программы научных исследований путем реализации схемы эксперимента согласно заданным параметрам. Работа в условиях среды атмосферы

**Заключение.** В результате проведенного исследования выделены проблемные вопросы и ситуации, которые могут возникнуть при создании мультироторного летательного аппарата как технического средства, их следует учитывать уже на ранних этапах проектирования МРЛА и разработки схемы эксперимента по исследованию Венеры. В итоге составлена матрица проблем для наиболее практичного использования результатов работы.

Мультироторный летательный аппарат — сложная техническая система, при создании которой требуются детальная комплексная проработка ряда проектно-конструкторских проблем, а также взаимовязывание подсистем. Не менее важным и трудоемким является исследование критических ситуаций, которые могут возникнуть в ходе эксплуатации МРЛА, т. е. в течение его функционирования непосредственно в атмосфере Венеры при выполнении траекторных операций для реализации схемы эксперимента. Как следует из приведенной матрицы проблем, наиболее ответственным и определяющим является этап «Ввод в действие». Поскольку риск возникновения нештатных ситуаций существует для каждой из подсистем, это может повлечь частичное или полное нарушение программы функционирования аппарата на планете и, как следствие, невыполнение поставленных задач. Поэтому при дальнейшем проектировании необходимо провести углубленные расчеты и разработать требуемые математические модели; уточнить конструктивно-компоновочную схему и состав систем; обосновать выбор материалов для изготовления узлов и агрегатов мультироторного аппарата, способных функционировать в условиях среды Венеры; рассмотреть вопросы работы узлов трения в венерианских условиях; проработать и обосновать перечень научных приборов как полезной нагрузки для оснащения аппарата.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Полищук Г.М., Пичхадзе К.М., ред. *Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований*. Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, 660 с.
- [2] Яценко М.Ю., Воронцов В.А. К вопросу о включении в программу исследования Венеры дополнительных технических средств. *Космические аппараты и технологии*, 2022, т. 6, № 1, с. 5–13.  
<https://doi.org/10.26732/j.st.2022.1.01>
- [3] MARS HELICOPTER. *NASA Science*.  
URL: <https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#> (дата обращения 01.12.2021).
- [4] Balam J., MiMi Aung, Golombek M.P. The Ingenuity Helicopter on the Perseverance Rover. *Space Science Reviews*, 2021, vol. 217 (56), 11 p. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-021-00815-w> (дата обращения 01.12.2021).
- [5] Воронцов В.А., Хмель Д.С. Использование винтовых летательных аппаратов для исследования планет. *Материалы 53-х Научных чтений памяти*

- К.Э. Циолковского. Калуга, 18–19 сентября 2018 г. Калуга, Изд-во АКФ «Политоп», 2018, с. 132–133.
- [6] Хмель Д.С. *Способ полета в расширенном диапазоне скоростей на винтах с управлением вектором силы*. Пат. № 2371354 Российская Федерация, 2009, бюл. № 30, 133 с.
- [7] Ревенков А.В., Резчикова Е.В. *Теория и практика решения технических задач*. 3-е изд. Москва, Изд-во «ФОРУМ», 2013, 384 с.
- [8] Лебедев А.А. *Курс системного анализа*. Москва, Машиностроение, 2010, 256 с.
- [9] Засова Л.В., Мороз В.И., Линкин В.М., Хатунцев И.В., Майоров Б.С. Стрoение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км. *Космические исследования*, 2006, т. 44, № 4, с. 381–400.
- [10] *Научно-технический отчет Объединенной научной рабочей группы (ОНРГ) по проекту «Венера-Д» (IKI/Roscosmos — NASA Venera-D Joint Science Definition Team, JSDT)*, озаглавленный «Venera-D: Expanding our Horizon of Terrestrial Planet Climate and Geology through the Comprehensive Exploration of Venus» [«Венера-Д»: Расширяя горизонты наших представлений о климате и геологии планеты земного типа с помощью всестороннего изучения Венеры], 31 января 2019 г., 174 с.  
URL: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/Venera-DPhaseIIFinalReport.pdf> (дата обращения 01.12.2021).
- [11] Буслаев С.П., Воронцов В.А., Графодатский О.С. Анализ отработки посадки космических аппаратов «Венера-9–14» и «Вега-1, -2» на венерианский грунт для разработки перспективных космических аппаратов «Венера-Д». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1790>
- [12] Пичхадзе К.М., Малышев В.В. *Математическое обеспечение для проектно-баллистического исследования динамики неуправляемого движения спускаемых аппаратов*. Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2018, 219 с.

Статья поступила в редакцию 08.12.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Яценко М.Ю., Воронцов В.А., Рыжков В.В. Обзор проблемных вопросов создания мультироторного летательного аппарата для исследования Венеры. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255>

**Яценко Михаил Юрьевич** — аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ, специалист МАИ. Область научных интересов: проектирование и конструкция ракетно-космической техники. Автор более 10 научных публикаций.  
e-mail: [yatsenkomy@mai.ru](mailto:yatsenkomy@mai.ru)

**Воронцов Виктор Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» и кафедры «Системный анализ и управление» Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов для исследования дальнего космоса. Автор более 300 научных публикаций. e-mail: [victor-vorontsov@yandex.ru](mailto:victor-vorontsov@yandex.ru)

**Рыжков Владислав Валентинович** — аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Область научных интересов: системный анализ и специальные организационно-технические системы космического назначения.  
e-mail: [dinozavr.ru@mail.ru](mailto:dinozavr.ru@mail.ru)

## **Review of problematic issues in creation of a multicopter aircraft for Venus exploration**

© M.Yu. Yatsenko, V.A. Vorontsov, V.V. Ryzhkov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

*The paper considers problematic issues that could arise in the process of studying design situations when creating a multicopter aircraft, which was first proposed as the technical means in studying the planet Venus as part of the promising Venusian spacecraft. The course of work identified a number of critical situations that should be analyzed already at the early stages of designing and developing the multicopter aircraft being a complex technical system in Venus exploration and taken into account when developing a program for its direct operation on the planet. The summary matrix of problems was compiled for visual presentation of the study results. This matrix reflects the probable problem situations in implementing the experiment scheme in the Venus atmosphere and surface contact study. For this purpose, the multicopter aircraft was decomposed into subsystems, and main stages of its operation were considered in the Venus atmosphere.*

**Keywords:** *Venus, multicopter aircraft, descent vehicle, Venusian spacecraft, technical tool, experiment scheme, problem situation, subsystem, matrix of problem issues, complex technical system*

### REFERENCES

- [1] Polishchuk G.M., Pichkhadze K.M., ed. *Avtomaticheskie kosmicheskie apparaty dlya fundamentalnykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Automated spacecraft for theoretical and applied research]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, 660 p.
- [2] Yatsenko M.Yu., Vorontsov V.A. K voprosu o vkluchenii v programm issledovaniya Venery dopolnitelnykh tekhnicheskikh sredstv [To the question of including additional technical means in the Venus exploration program]. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii — Spacecraft and Technologies*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 5–13. <https://doi.org/10.26732/j.st.2022.1.01>
- [3] MARS HELICOPTER. *NASA Science*. Available at: <https://mars.nasa.gov/technology/helicopter/#> (accessed December 1, 2021).
- [4] Balaram J., MiMi Aung, Golombek M.P. The Ingenuity Helicopter on the Perseverance Rover. *Space Science Reviews*, 2021, vol. 217 (56), 11 p. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-021-00815-w> (accessed December 1, 2021).
- [5] Vorontsov V.A., Khmel D.S. Ispolzovanie vintovykh letatelnykh apparatov dlya issledovaniya planet [The use of propeller-driven aircraft for planetary exploration]. In: *Materialy 53-kh Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g.* [Proceedings of the 53rd Scientific readings in the memory of K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 18–19, 2018]. Kaluga, AKF Politop Publ., 2018, pp. 132–133.
- [6] Khmel D.S. *Sposob poleta v rasshirennom diapazone skorostey na vintakh s upravleniem vektorom sily* [Method of flight in the extended range of speeds on propellers with the force vector control], Pat. No. 2371354, Russian Federation, 2009, Bull. no. 30, 133 p.
- [7] Revenkov A.V., Rezhnikova E.V. *Teoriya i praktika resheniya tekhnicheskikh zadach* [Theory and practice of technical problem solving]. 3rd ed. Moscow, FORUM Publ., 2013, 384 p.

- [8] Lebedev A.A. *Kurs sistemnogo analiza* [Systems Analysis Course]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010, 256 p.
- [9] Zasova L.V., Moroz V.I., Linkin V.M., Khatuntsev I.V., Mayorov B.S. Stroenie atmosfery Venery ot poverkhnosti do 100 km [The structure of the Venus atmosphere from the surface up to 100 km]. *Kosmicheskiye issledovaniya — Space Research*, 2006, vol. 44, no. 4, pp. 381–400.
- [10] *Scientific and Technical Report of IKI/Roscosmos — NASA Venera-D Joint Science Definition Team, JSST on “Venera-D: Expanding our Horizon of Terrestrial Planet Climate and Geology through the Comprehensive Exploration of Venus”*, January 31, 2019, 174 p. Available at: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/Venera-DPhaseIIFinalReport.pdf> (accessed December 1, 2021).
- [11] Buslaev S.P., Vorontsov V.A., Grafodatskiy O.S. Analiz otrabotki posadki kosmicheskikh apparatov «Venera-9–14» i «Vega-1, -2» na venerianskiy grunt dlya razrabotki perspektivnykh kosmicheskikh apparatov «Venera-D» [Analysis of the landing practice of the “Venus-9–14” and “Vega-1, -2” spacecraft on the Venusian soil for the development of promising “Venus-D” spacecraft]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1790>
- [12] Pichkhadze K.M., Malyshev V.V. *Matematicheskoe obespechenie dlya proektno-ballisticheskogo issledovaniya dinamiki neupravlyaemogo dvizheniya spuskaemykh apparatov* [Mathematical software for the design-ballistic study of the dynamics of unguided descent vehicles]. Moscow. MAI-PRINT Publ., 2018, 219 p.

**Yatsenko M.Yu.**, PG, Aerospace Institute No. 6, Moscow Aviation Institute, MAI Specialist; author of more than 10 scientific publications. Research interests: design and construction of the rocket and space systems. e-mail: yatsenkomy@mai.ru

**Vorontsov V.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Space Systems and Rocket Engineering and Department of System Analysis and Control, Aerospace Institute No. 6, Moscow Aviation Institute; author of more than 300 scientific publications. Research interests: design of automatic spacecraft for deep space exploration. e-mail: victor-vorontsov@yandex.ru

**Ryzhkov V.V.**, PG, Aerospace Institute No.6, Moscow Aviation Institute. Research interests: system analysis and special organizational and technical systems for space application. e-mail: dinozavr.ru@mail.ru