

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ ДЕСАНТИРОВАНИЯ И ПОСАДКИ ВЕНЕРИАНСКОГО АППАРАТА С РОТОРНОЙ СИСТЕМОЙ В РЕЖИМЕ АВТОРОТАЦИИ

А. А. Шеремет, В. А. Воронцов, М. Ю. Яценко✉

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
г. Москва, Российская Федерация

Статья посвящена анализу вопросов, связанных с десантированием и посадкой венерианского аппарата на поверхность Венеры с использованием роторной системы, функционирующей в режиме авторотации. В условиях экстремальных параметров атмосферы Венеры, таких как высокая температура, плотность и давление, а также сильные порывы бокового ветра, традиционные методы торможения с использованием аэродинамического экрана и парашюта оказываются недостаточно эффективными. Роторная система, использующая авторотацию, предлагает энергоэффективное, многоразовое и точное решение для управляемого спуска и посадки на поверхность Венеры. В ходе исследования были разработаны и проанализированы две основные схемы посадки: десантирование и авторотация после отделения от спускаемого аппарата, а также полет по заданной траектории с последующей посадкой в режиме авторотации. Эти методы обеспечивают безопасную и точную посадку, снижают риски и значительно увеличивают научную ценность миссии. Были выявлены потенциальные проблемы, связанные с проектированием венерианского аппарата с роторной системой, и разработана подробная матрица проблем, которая позволит наиболее эффективно использовать результаты проведенных исследований и применять их для проработки и оптимизации будущих миссий.

Ключевые слова: Венера, роторная система, авторотация, венерианский аппарат, винт.

Введение

Для исследования Венеры важно не только успешно запустить космический аппарат, но также обеспечить его безопасную и контролируемую посадку на поверхности планеты. Как показала практика, основным способом посадки были пассивные средства торможения – аэродинамический экран и парашют (рисунок 1) [1]. Аэродинамический экран не может обеспечить безопасную посадку на поверхность и совершить посадку в назначенную область, а парашюты, как правило, не могут быть использованы повторно.

В условиях экстремальной температуры, плотной атмосферы и высокого поверхностного давления на Венере (рисунок 2) одним из подходов к контролируемому спуску является использование аппарата с роторной системой. Предлагается выполнять спуск в режиме авторотации, при котором не требуется работа электродвигателя, что повы-

шает энергоэффективность. Венерианский аппарат с роторной системой способен регулировать скорость как во время авторотации, так и во время полета, что позволит избежать нештатных ситуаций, например, при посадке, вызванных препятствиями (трещины, уступы, крутые склоны и др.) на поверхности Венеры.

Авторотация позволяет контролировать спуск на Венеру за счет применения аэродинамического управления роторной системой, что делает этот метод привлекательным для будущих исследовательских миссий на планете [2]. В то время как авторотация не является новой технологией и используется вертолетами для посадки в случае отказа двигателя, на других планетах она не применялась, но идея использования данного способа для исследовательских миссий на других планетах известна уже давно. Прототипы и конструкции исследовались в течение длительного времени. На рисунке 3 показана временная шкала, включающая изображения концепций авторотационных аппаратов. Это включает в себя такие прототипы, как Auto-Rotation in Martian Descent and Landing AMDL [3]

✉ misha-yacenko@mail.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2024

и ARMADA [4], разработанные в качестве демонстрационных образцов для полета на Марс в 2009 году. В 2013 году были реализованы проекты Daedalus 1 [5; 6] и Daedalus 2 [7], в ходе которых были протестированы два аппарата с авторотацией, названные Spaceseed v1, который был успешно запущен в 2019 году, и Spaceseed v2. Другие варианты подробно описаны в работе Диаса [8].

1. Предлагаемые схемы посадки в режиме авторотации

В ходе работы были предложены и рассмотрены схемы посадки в режиме авторотации, такие как:

- схема десантирования и посадки в режиме авторотации после отделения от спускаемого аппарата (рисунок 4);
- схема полёта по заданной траектории с посадкой в режиме авторотации (рисунок 5).

2. Цели и задачи исследования

Цель работы состоит в том, чтобы разработать и провести анализ схемы посадки венерианского аппарата с роторной системой на поверхность Венеры в режиме авторотации для обеспечения безопасной и точной посадки.

Задачи исследования:

- 1) разработка и анализ схемы посадки: создание и анализ концептуальной схемы посадки, включающей в себя выбор оптимального момента перехода в режим авторотации и высоты начала спуска;
- 2) идентификация рисков и обзор возможных решений: определение потенциальных проблем, связанных с посадкой в режиме авторотации, и анализ рисков.

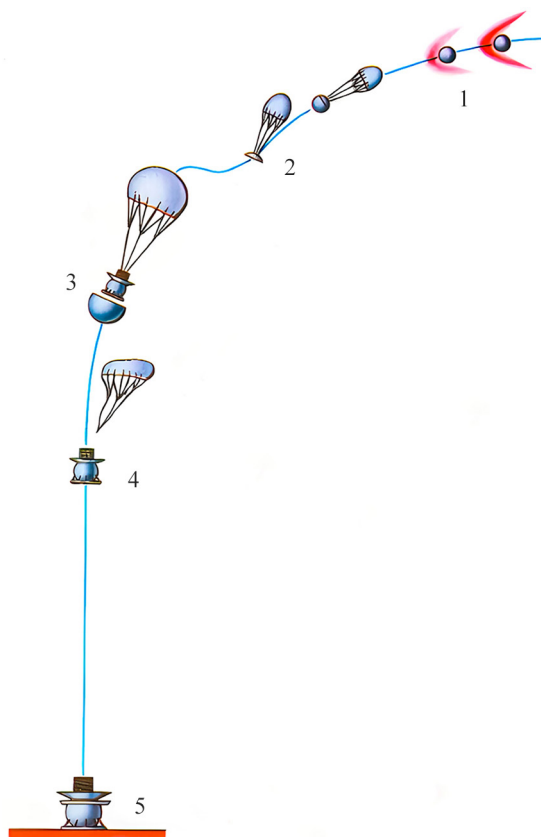


Рисунок 1. Схема посадки посадочного модуля «Вега»: 1 – вход в атмосферу; 2 – отделение верхней полусферы; 3 – раскрытие тормозного парашюта, сброс нижней полусферы, начало измерений в атмосфере; 4 – отделение тормозного парашюта; 5 – посадка, исследование на поверхности

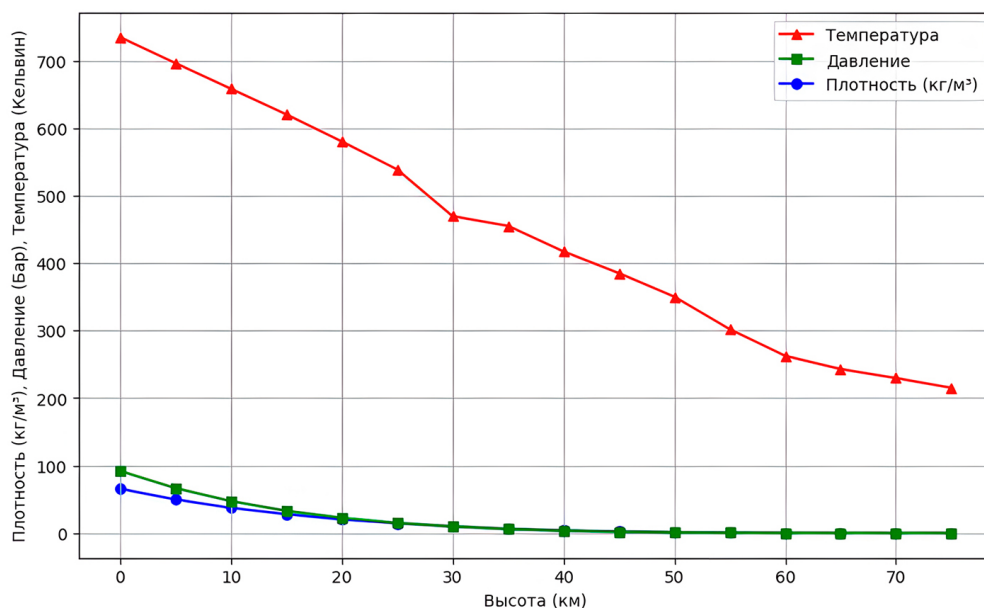


Рисунок 2. Зависимость давления, температуры и плотности от высоты в атмосфере Венеры

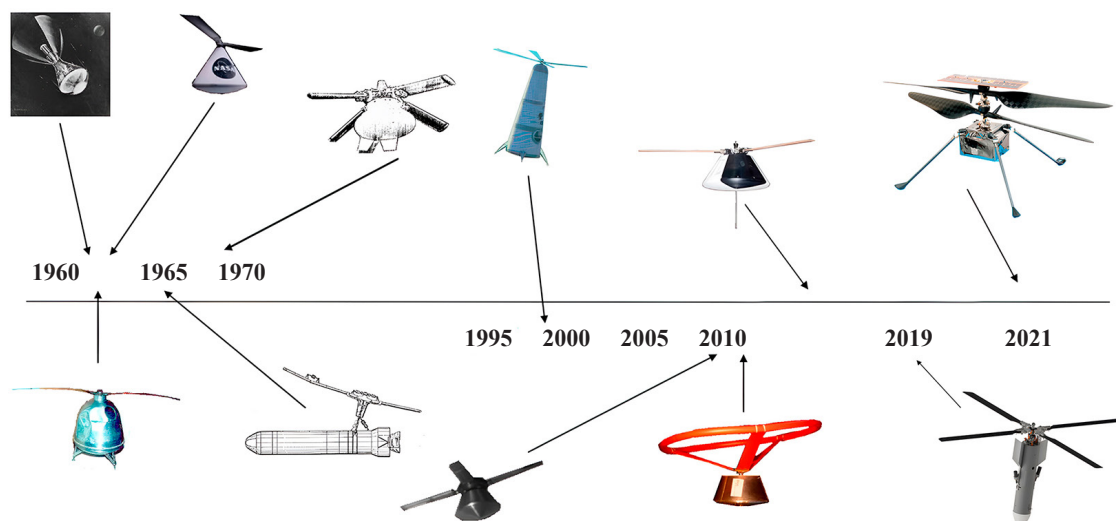


Рисунок 3. Временная шкала прототипов с роторной системой

Далее более подробно рассмотрим предлагаемые схемы движения венерианского аппарата в режиме авторотации в атмосфере.

3. Схемы движения венерианского аппарата в атмосфере Венеры

На рисунках 4–5 показаны схемы десантирования и посадки в режиме авторотации после отделения от спускаемого аппарата и полёта по заданной траектории с посадкой в режиме авторотации, а также описаны этапы движения в атмосфере Венеры.

Этап 1. Ввод тормозной парашютной системы на уровне верхней границы облачного слоя 65 км.

Этап 2. Увод верхней теплозащитной оболочки.

Этап 3. Частичное раскрытие несущего винта. После увода верхней теплозащитной оболочки начинается частичное раскрытие несущего винта. Лопасти несущего винта разворачиваются частично, создавая подъемную силу, которая помогает замедлить аппарат и подготовить его к полной авторотации [9].

Этап 4. Отстрел нижней теплозащитной оболочки. Нижняя теплозащитная оболочка, которая защищает аппарат от экстремальных температур во время атмосферного входа, сбрасывается, чтобы раскрыть посадочные опоры.

Этап 5. Полное раскрытие несущего винта + авторотация. Лопасти несущего винта полностью разворачиваются, создавая достаточную подъемную силу для авторотации. Аппарат начинает

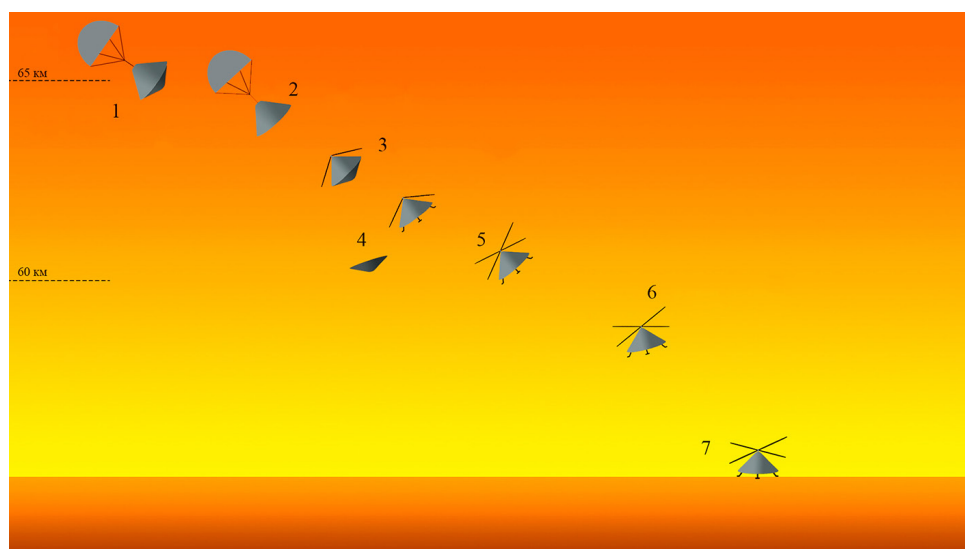


Рисунок 4. Схема десантирования и посадки в режиме авторотации после отделения от спускаемого аппарата: 1 – ввод тормозной парашютной системы; 2 – увод верхней теплозащитной оболочки; 3 – частичное раскрытие несущего винта; 4 – отстрел нижней теплозащитной оболочки; 5 – полное раскрытие несущего винта + авторотация; 6 – спуск в режиме авторотации; 7 – посадка

контролируемый спуск, используя принцип авторотации.

Этап 6. Спуск в режиме авторотации. Аппарат способен маневрировать для коррекции траектории и подготовки к точной посадке на поверхность Венеры.

Этап 7. Посадка. Аппарат совершает мягкую посадку на поверхность Венеры, а также осуществляет анализ данных, собранных во время спуска в режиме авторотации, чтобы оценить успешность посадки.

Ниже показана схема полёта по заданной траектории с посадкой в режиме авторотации (рисунок 5).

Этап 4. Отключение электродвигателя. Как только электродвигатель венерианского аппарата будет выключен, аппарат начнёт постепенно входить в режим авторотации.

Этап 5. Авторотация + маневрирование – во время авторотации, когда аппарат начинает процедуру посадки, данные о параметрах полета и состоянии аппарата будут активно собираться и контролироваться. Параметры посадки с помощью авторотации будут ограничены определенными значениями (скорость посадки, **угол атаки лопастей и др.**). В случае каких-либо отклонений от требуемых значений данных параметров режим

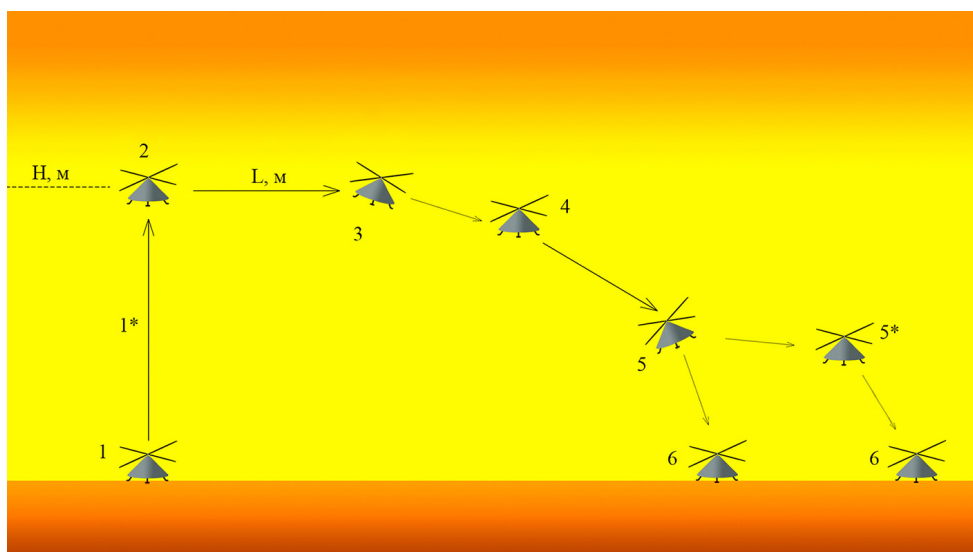


Рисунок 5. Схема полёта по заданной траектории с посадкой в режиме авторотации:
1 – подготовительные действия аппарата для взлёта; 1* – взлёт на заданную высоту; 2 – зависание аппарата на заданной высоте; 3 – полёт на определенную дистанцию; 4 – отключение электродвигателя;
5 – авторотация + маневрирование; 5* – авторотация + режим полёта; 6 – посадка

Этап 1. Аппарат на поверхности выполняет подготовительные действия, такие как проверка систем, калибровка инструментов и сбор начальных данных, чтобы обеспечить успешный и безопасный подъем.

Этап 1*. Венерианский аппарат поднимается на заданную высоту над поверхностью ($H, м$). Важно иметь достаточную высоту, необходимую для раскрутки несущего винта во время снижения [10].

Этап 2. Зависание аппарата на высоте и проверка системы. После достижения определенной высоты аппарат зависает для тщательной проверки всех параметров перед активацией режима авторотации.

Этап 3. Полёт на определенную дистанцию ($L, м$). Аппарат пролетает определенное расстояние L в горизонтальном направлении и набирает достаточную горизонтальную скорость для быстрого перевода кинетической энергии движения венерианского аппарата в энергию вращения винта [10].

авторотации будет отменен и будет выполнена посадка с включенным электродвигателем.

Этап 5*. Авторотация + режим полёта – аппарат в режиме авторотации может спуститься на высоту H_{min} , где произойдет включение роторной системы и аппарат сможет выполнить полёт на определенное расстояние ($L, м$).

Этап 6. Посадка. После успешного режима авторотации аппарат благополучно совершит посадку на поверхность.

4. Матрица проблем

В результате исследования были выделены проблемы, которые систематизированы в форме матрицы (таблицы 1–3). Эта матрица может быть использована как инструмент поддержки для разработки технических решений при создании аппарата с роторной системой для исследования Венеры. Она отображает основные этапы работы аппарата в атмосфере Венеры по горизонтали и системы аппарата по вертикали [11].

Таблица 1

Матрица проблем при разработке венерианского аппарата с роторной системой на этапе «Отделение от спускаемого аппарата»

Система	Спускаемый аппарат
Система отделения	Обеспечение надежного функционирования системы разделения
Силовая установка с роторной системой	Воздействие ударных и других нагрузок на детали роторной системы
Система управления электродвигателем	–
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Повреждение научной аппаратуры и приборов
Система накопления энергии – аккумуляторные батареи	–

Таблица 2

Матрица проблем при разработке венерианского аппарата с роторной системой на этапе «Десантирование и посадка в режиме авторотации после отделения от спускаемого аппарата»

Система	Десантирование и посадка в режиме авторотации
Система отделения	–
Силовая установка с роторной системой	Раскрытия лопастей; Разблокирование винта для обеспечения самовращения; Воздействие аэродинамических, вибрационных нагрузок на роторную систему
Система управления электродвигателем	Переход аппарата на режим с включенным электродвигателем
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Отказ научной аппаратуры аппарата
Система накопления энергии – аккумуляторные батареи	Выход из строя научной аппаратуры аппарата

Таблица 3

Матрица проблем при разработке венерианского аппарата с роторной системой на этапах «Взлёт с поверхности, полёт, посадка в режиме авторотации и посадка с включенным электродвигателем»

Система	Взлёт с поверхности	Полёт	Посадка в режиме авторотации	Посадка с включенным электродвигателем
Система отделения	–	–	–	–
Силовая установка с роторной системой	Функционирование роторной системы в условиях агрессивной атмосферы			
Система управления электродвигателем	Гарантированный запуск электродвигателя	Стабилизация аппарата в положение равновесия	–	Воздействие аэродинамических, вибрационных нагрузок на роторную систему; Переход аппарата на этот режим
Система обеспечения функционирования аппаратуры	Отказ научной аппаратуры аппарата во время выполнения траекторных маневров			
Система накопления энергии – аккумуляторные батареи	Перегрев батарей	Потеря мощности из-за длительного использования	–	Недостаточно энергии для активации электродвигателя

Заключение

Использование роторной системы в режиме авторотации для посадки венерианского аппарата на Венеру представляет собой перспективное и инновационное решение. В условиях экстремальных температур, плотной атмосферы, высокого поверхностного давления и сильных ветров на Венере этот метод обеспечивает несколько значительных преимуществ: энергоэффективность, точность посадки и возможность многократного использования.

В ходе исследования была разработана и проанализирована концептуальная схема посадки, включающая оптимальный момент перехода в режим авторотации и высоту начала спуска. В результате были предложены две основные схемы посадки:

1) авторотация после отделения от спускаемого аппарата;

2) взлёт и полёт по заданной траектории с последующей посадкой в режиме авторотации.

Применение предложенных схем может значительно повысить точность посадки на Венеру, а также снизить вероятность возникновения нештатных ситуаций. Дальнейшие исследования и разработки в этой области помогут улучшить предлагаемые методы и обеспечить успешное выполнение будущих миссий по изучению Венеры.

В ходе исследования также были выявлены потенциальные проблемы, которые могут возникнуть при проектировании венерианского аппарата с роторной системой. Эти вопросы необходимо учитывать на начальных этапах проектирования и при разработке схемы десантирования и посадки для исследования Венеры. В результате была составлена матрица проблем, что позволит наиболее эффективно использовать результаты работы и применять их для проработки будущих миссий.

Список литературы

- [1] Воронцов В. А., Малышев В. В., Пичхадзе К. М. Системное проектирование космических десантных аппаратов. М.: МАИ, 2021. 256 с.
- [2] Clemens R., Hakan K. Towards Использование авторотации в межпланетных исследованиях на примере Венеры // 73-й Международный астронавтический конгресс (IAC), Париж, Франция, 18–22 сентября 2022.
- [3] AMDL: Автоматическое вращение при спуске и посадке на Марс. Контракт с ЕКА No. 21233/07/NL/CB. – URL: http://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/952/C_21233ExS.pdf (дата обращения 15.05.2024).
- [4] Peters T., Cadenas R., Tortora P., Talamelli A., Giulietti F., Pulvirenti B., Saggiani G., Rossetti A., Corbelli A., Kervendal E. Armada: Автоматическое вращение при спуске и посадке на Марс // техн. отч., ЕКА, EADS и GMV. 2009. 25 с.
- [5] Riegler C., Angelov I., Kohmann F., Neumann T., Bilican A. и др. Проект «Daedalus», управляемый несущим винтом спуск и посадка на gexus23 // 2-ой Симпозиум по космической образовательной деятельности. – 2018. С. 278–282.
- [6] Riegler C., Angelov I., Appelt T. и др. Проект «Daedalus»: На пути к посадке и спуску на основе авторотации // 71-й Международный астронавтический конгресс (IAC), 2020.
- [7] Mehringer, Werner L., Riegler C., Dunschen F. Демонстратор суборбитальной посадки с авторотацией на gexus 29 // 4-й симпозиум по космической образовательной деятельности. 2022. 6 с.
- [8] Diaz-Silva R. A., Arellano D., Sarigulklijn M., Sarigul-Klijn N. Вращающиеся замедлители для космических аппаратов: исторический обзор и результаты моделирования // Конференция и экспозиция AIAA SPACE 2013, Американский институт аэронавтики и астронавтики. Сент., 2013. 20 с.
- [9] Шеремет А. А., Рыжков В. В. Развертывание десантного модуля с роторной системой в атмосфере Венеры // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник.г. Евпатория, 2–9 июля 2023 года. 2023. С. 128–130.
- [10] Куприков М. Ю. Авторотация // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. 2017. – URL: http://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4137761?ysclid=lx67akkajf866922201 (дата обращения 08.06.2024).
- [11] 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>.

ANALYSIS OF THE ISSUES OF DESCENT AND LANDING OF A VENUSIAN VEHICLE WITH A ROTARY SYSTEM IN AUTOROTATION MODE

A.A. Sheremet, V.A. Vorontsov, M. Yu. Yatsenko

Moscow Aviation Institute
Moscow, The Russian Federation

The article is devoted to the analysis of issues related to the descent and landing of the Venusian vehicle on the surface of Venus using a rotary system operating in autorotation mode. In conditions of extreme atmospheric parameters of Venus, such as high temperature, density and pressure, as well as strong gusts of crosswind, traditional braking methods using an aerodynamic shield and a parachute are not effective enough. The rotary system using autorotation offers an energy-efficient, reusable and precise solution for controlled descent and landing on the surface of Venus. During the study, two main landing schemes were developed and analyzed: landing and autorotation after separation from the lander, as well as flight along a given trajectory followed by landing in autorotation mode. These methods ensure a safe and accurate landing, reduce risks and significantly increase the scientific value of the mission. Potential problems related to the design of the Venusian vehicle with a rotary system were identified, and a detailed matrix of problems was developed that will allow the most effective use of the results of the research and apply them to the elaboration and optimization of future missions.

Keywords: Venus, rotary system, autorotation, Venusian vehicle, propeller.

References

- [1] Vorontsov V.A., Malyshev V.V., Pichkhadze K.M. System design of space landing vehicles. Moscow: MAI, 2021. 256 p.
- [2] Clemens R., Hakan K. Towards Utilization of Autorotation in In-terplanetary Exploration on the example of Venus // 73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18–22 September 2022.
- [3] AMDL: Auto-Rotation in Martian Descent and Landing. ESA Contract No.21233/07/NL/CB. – URL: http://nebula.esa.int/sites/default/files/neb_study/952/C_21233ExS.pdf (Accessed May 15, 2024).
- [4] Peters T., Cadenas R., Tortora P., Talamelli A., Giulietti F., Pulvi-renti B., Saggiani G., Rossetti A., Corbelli A., Kervendal E. Armada: Auto-rotation in martian descend and landing // tech. rep., ESA, EADS and GMV. 2009. 25 p.
- [5] Riegler C., Angelov I., Kohmann F., Neumann T., Bilican A., Hof-mann K., Pielucha J., Böhm A., Fischbach B., Appelt T., Willand L., Wizemann O., Menninger S., von Pichowski J., Staus J., Hemmelmann E., Seisl S., Fröhlich C., Plausonig C., Rath R. Project daedalus, rotor con-trolled descent and landing on reus23 // 2nd Symposium on Space Educa-tional Activities. 2018, pp. 278–282.
- [6] Riegler C., Angelov I., Appelt T., Bilican A., Böhm A., Fischbach B., Fröhlich C., Pielucha J.G., Hartl A., Hemmelmann E., Hofmann K., Kappl P., Kohman F., Menninger S., Neumann T., von Pichowski J., Plauso-nig C., Rath R., Seisl S., Staus J., Willand L., Wizemann O., Bergmann P., Dunschen F., Holzer P., Wagner U., Werner L. Project Daedalus: Towards Autorotation based Landing and Descent // 71st IAC Proceedings, 2020.
- [7] Mehringer, Werner L., Riegler C., Dunschen F. Suborbital autorota-tion landing demonstrator on reus 29 // 4th Symposium on Space Educa-tional Activities Universitat Politècnica de Catalunya. 2022. 6 p.
- [8] Diaz-Silva R. A., Arellano D., Sarigulklijn M., Sarigul-Klijn N. Ro-tary decelerators for space-craft: Historical review and simulation results // AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition, American Institute of Aero-nautics and Astronautics. Sept, 2013. 20 p.
- [9] Sheremet A.A., Ryzhkov V.V. Deployment of a landing module with a rotary system in the atmosphere of Venus // System analysis, control and navigation: Abstracts of reports. Collection. Yevpatoria, July 2–9, 2023, pp. 128–130.
- [10] Kuprikov M. Yu. Autorotation // The Great Russian Encyclopedia. The electronic version. 2017. – URL: http://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4137761?ysclid=lx67akkajf866922201 (Accessed June 08, 2024).
- [11] Yatsenko M. Yu., Vorontsov V.A., Ryzhkov V.V. Review of problematic issues of creating a multirotor aircraft for the exploration of Venus // Engineering Journal: Science and Innovation. 2023. Issue 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2255>.

Сведения об авторах

Шеремет Алексей Алексеевич – аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Область научных интересов: проектирование и конструкция ракетно-космической техники.

Воронцов Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» и кафедры «Системный анализ и управление» Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Окончил МАИ с отличием в 1975 году. Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов для исследования дальнего космоса.

Яценко Михаил Юрьевич – аспирант Института № 6 «Аэрокосмический» МАИ. Окончил МАИ с отличием в 2021 году. Область научных интересов: проектирование и конструкция ракетно-космической техники и космических аппаратов для исследования дальнего космоса.