

АТМОСФЕРНЫЕ ЗОНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНЕРЫ

ATMOSPHERIC PROBES FOR VENUS EXPLORATION

В.А. Воронцов¹,
профессор, доктор
технических наук,
victor-vorontsov@yandex.ru;
V.A. Vorontsov

Б.В. Любезный¹,
аспирант,
laplandia2009@bk.ru;
B.V. Liubeznyi

Д.С. Хмель¹,
аспирант,
rotor_fly@mail.ru;
D.S. Khmel

М.В. Киспе Мендоза¹,
аспирант,
dixwmichael@gmail.com;
M.V. Quispe Mendoza

А.А. Шеремет¹,
аспирант,
mr.sheremet.98@gmail.com;
A.A. Sheremet

М.Ю. Яценко¹,
аспирант,
misha-yacenko@mail.ru;
M.Yu. Yatsenko

В статье приводится анализ результативности исследования атмосферы планеты Венера аэростатными зондами и вопросы создания новых технических средств с учётом новых задач и технических требований. Рассматриваются вопросы создания управляемых атмосферных зондов аэростатного типа, мультироторных летательных аппаратов и комбинированных технических устройств, позволяющих расширить области проведения исследований, увеличить длительность полёта в атмосфере и объём получаемой информации.

Ключевые слова:
Венера; атмосферные зонды;
аэростаты; роторные устройства;
длительность исследований.

DOI: 10.26162/LS.2024.96.14.020

ВВЕДЕНИЕ

Серия последовательных, интенсивных исследований Венеры советскими космическими аппаратами завершилась одной из самых успешных планетных экспедиций. Наиболее информативными стали контактные исследования с помощью посадочных аппаратов и первых в мире атмосферных зондов, плавающих аэростатных станций (*Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований*, 2010; Косенкова А.В., Ефанов В.В., Седых О.Ю., 2023). После длительного перерыва отечественные перспективные проекты должны способствовать продолжению изучения ближайшей к Земле планеты на новом уровне и решению новых задач с помощью различных технических средств.

The article covers analysis of outcome of the Venus atmosphere study by balloon probes and issues of development of next-generation hardware and software subject to new challenges and technical requirements. The article considers issues of creating of controlled atmospheric balloon probes, multirotor aircraft and combined hardware capable of expanding the research area, increasing the atmosphere flight duration and scope of received data.

Keywords:
Venus; atmospheric probes;
balloons; rotary devices;
research duration.

1. Аэростатные зонды

Аэростатные зонды (АЗ), как технические средства и инструменты проведения научных исследований в атмосфере Венеры, впервые в мире были использованы в 1985 году. Был разработан способ ввода аэростатного зонда непосредственно в процессе спуска в атмосферу на парашютной системе. Для исследования атмосферы Венеры было предложено схемное решение, в котором ввод АЗ осуществляется в Северное и Южное полушария в низких широтах на ночную сторону планеты на границе прямой радиовидимости с Земли. В процессе дрейфа осуществлялось измерение координат и скорости аэростатных станций и приём информации в нескольких широко разнесённых пунктах, для которых они находятся в зоне видимости. После ввода аэростатных станций они

¹ ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Москва.

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

под действием естественной циркуляции атмосферы планеты дрейфовали в сторону направления вращения планеты со скоростью зональной составляющей скорости ветра. При этом, так как в северном полушарии меридиональный компонент скорости ветра направлен к северному полюсу, а в южном – к южному, предполагалось, что они будут по спирали дрейфовать по направлению к полюсам. Такое движение будет происходить до средних широт, где по имеющимся наблюдениям меридиональный компонент меняет знак. Дрейф аэростатных станций по описанным траекториям обеспечивает получение информации о глобальной атмосферной циркуляции в полушариях планеты. Эта информация помогает решить вопрос об одном из наиболее загадочных явлений в физике Венеры, упомянутом выше – суперротации атмосферы. Ввод станций на ночную сторону планеты на границе прямой радиовидимости с Земли позволяет увеличить время их активного функционирования, поскольку в отличие от ввода на дневную сторону на ночной стороне отсутствуют перегрев газа в оболочке и увеличение избыточного давления, из-за которого может произойти её разрушение. Траектории движения дрейфующих аэростатных станций определялись с помощью радиоинтерферометрии с большой базой, с использованием наземных станций всего мира, что позволило обеспечить практически круглосуточное непрерывное наблюдение за ними. Результаты измерений передавались непосредственно на Землю.

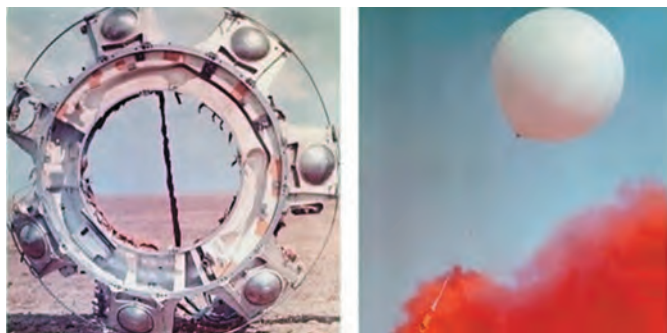


рисунок 1. Конструкция аэростатного зонда и плавающая аэростатная станция

Около двух суток неуправляемый аэростат дрейфовал в атмосфере, на высоте 55 километров в облачном слое Венеры пролетев около 11000 километров (Воронцов В.А., Дерюгин В.А., Пичхадзе К.М., 1988).

2. Управляемые аэростатные зонды

Необходимость решения новых научных задач, требование увеличения дальности полёта и длительности проведения контактных исследований привели к постановке новой научно-технической задачи по созданию управляемых венерианских атмосферных

зондов (Воронцов В.А., Хмель Д.С., 2020). В ходе проведения научно-исследовательских работ была разработана методика определения параметров управляемых аэростатных зондов перспективных космических аппаратов для исследования атмосферы и поверхности планеты Венера. На основе опыта создания первого в мире отечественного аэростатного зонда для исследования Венеры, классификации и анализа земных аэростатных летательных аппаратов, для перспективных космических аппаратов (Седых О.Ю., Сысоев В.К., Ткаченко А.И., Хмель Д.С., 2024), в состав которых входят аэростаты, для изучения Венеры предлагается управлять высотой аэростата регулированием объёма газа в оболочке с использованием клапанов и вентиляторов, а также предложено два типа оболочек: тандем из оболочек нулевого и избыточного давления или двойная комбинированная «оболочка в оболочке», у которой внутренняя прочная оболочка не соприкасается с сернокислотными облаками. Разработана математическая модель аэростатного зонда с управлением движением при помощи таких собственных средств, как, например, сброс балласта, расширение или компрессирование газа с использованием нескольких оболочки или стягивания оболочки. Расчёты показывают устойчивость и управляемость аэростатов при колебаниях температуры и вертикальных порывах ветра в облаках Венеры. Проведены расчёты траекторий движения управляемого аэростатного зонда при изменении высоты, широты и долготы с использованием винтовых двигателей для достижения новых приполярных районов и проведения там научных исследований. Проведено моделирование управляемого движения аэростатного зонда в земных условиях (Воронцов В.А., Клименко Н.Н., Пичхадзе К.М., Хмель Д.С., 2024) и верификация математической модели по данным движения

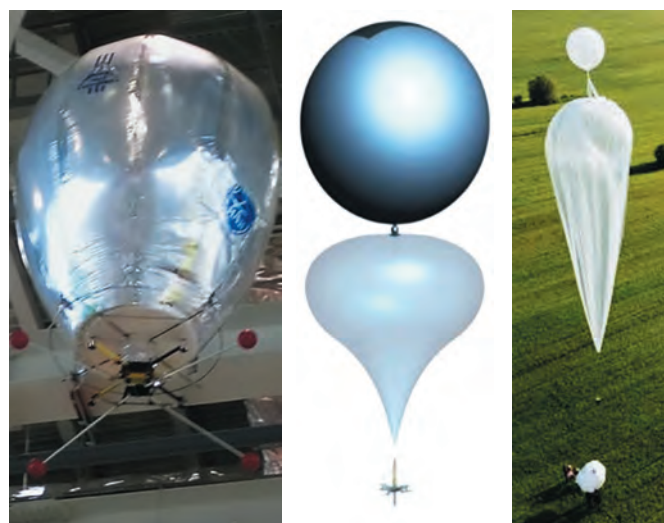


рисунок 2. Аэростат, управляемый винтами и аэростат с двойной оболочкой; испытания в земных условиях

стратостатов (Клименко Н.Н., Хмель Д.С., 2024). Предлагаемая методика может быть использована для решения задачи расширения области исследований за счёт маневрирования в заданном диапазоне высот, увеличения длительности проведения научных измерений и объёма получаемой информации, как минимум, на порядок.

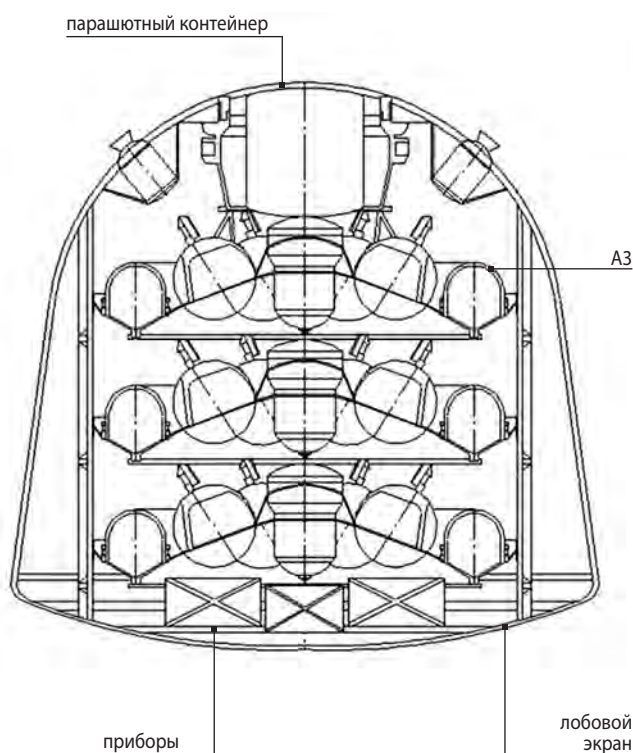
3. Флотилия аэростатов

Вслед за проектом по исследованию Венеры и кометы Галлея 1984–1986 годов последовала разработка нескольких новых технических предложений. Перспективный венерианский проект 1988 года предусматривал исследование атмосферы Венеры уже несколькими атмосферными зондами. Это и два аэростата, размещаемые в одном десантном аппарате (ДА), и планирующий зонд «вертолёт», и дроб-зонды, сбрасываемые в процессе спуска на парашюте. В проекте «Тайфун» космические технологии предлагалось использовать и для земных нужд (Байбаков С.Н., Мартынов А.И., 1986). Три (и более) аэростатных зонда, размещённые в одном ДА, могли быть введены последовательно на разных высотах в зону таких экстремальных атмосферных явлений, как тайфун, смерч и т.п. с целью их изучения и прогнозирования последствий.

Успех двух венерианских миссий 1984–1986 годов, дал толчок развитию нескольких направлений исследований и технологий, в частности технологии надувных тормозных устройств (Финченко В.С.,

Пичхадзе К.М., Ефанов В.В., 2019). Зонды-пенетраторы с гибкой тепловой защитой, малые автономные станции с надувными амортизирующими устройствами вошли в состав КА для исследования Марса. Марсианский аэростат наряду с марсоходом стали основными техническими средствами исследований в альтернативном проекте, прорабатывавшемся в 1992–1998 годах. В свою очередь наработки проекта марсианского пенетратора дали возможность разработать прототип мини марсианских метеорологических станций, основанных на тех же принципиальных технических решениях технологии надувных устройств (Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М., 2021). Идея создания сети исследовательских зондов для исследования Марса может быть использована и для планеты Венера, причём не только на поверхности, но и в атмосфере. При формировании проектного облика перспективного космического аппарата для исследования Венеры (Воронцов В.А., Лохматова М.Г., Пичхадзе К.М. и др., 2010) было предложено включить в состав КА, помимо большого десантного аппарата, несколько малых или мини десантных модулей.

Они, в свою очередь, могли иметь в своём составе аэростатные зонды, которые вводились бы в действие в различных районах планеты и на различных высотах. Таким образом, возможно создание флотилии аэростатных станций или целой сети зондов для глобального исследования динамики атмосферы Венеры и решения ряда научных задач.

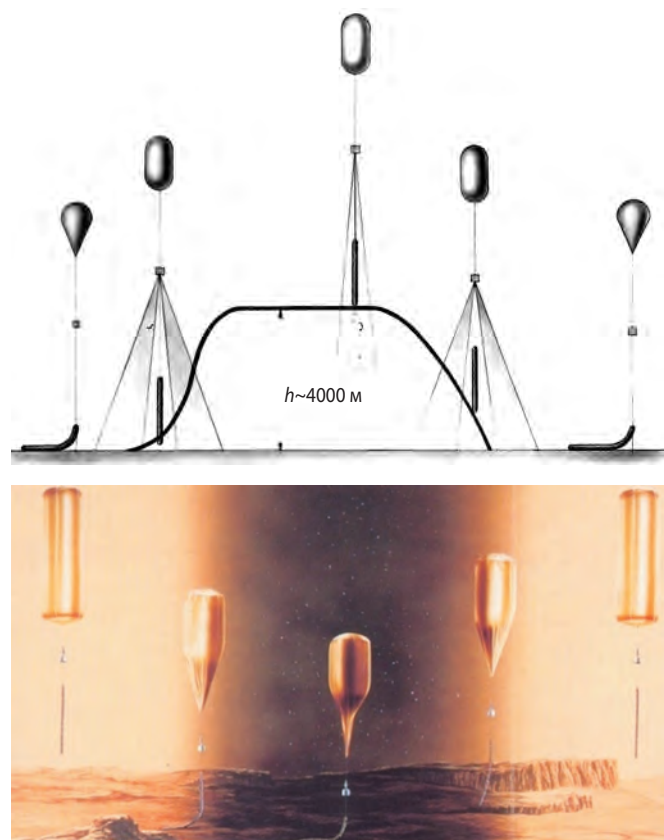


рисунк 3. Общий вид СА и схема доставки АЗ с орбиты Земли

4. «Прыжковый аэростат». Челночный дрейф

Развитие технологий, применение новых материалов и высокотемпературной электроники позволяют расширить возможности проведения научных исследований не только в атмосфере, но и на поверхности планет. Были разработаны принципы создания аэростатной станции для перемещения в нижних слоях атмосферы Венеры, исследовались материалы оболочки, разрабатывались газогенераторы, балластные устройства. Рассматривался вариант спуска и подъёма всего посадочного аппарата. Аэростатную оболочку предлагалось изготовить из двух баллонетов, удерживаемых в фиксированном друг относительно друга положении при помощи механизмов разведения. Баллонеты выполнены из тонкой металлической фольги. Блок управления вертикальным перемещением представляет собой устройство, в котором изменение веса аэростатной станции осуществляется за счёт сорбции углекислого газа из окружающей атмосферы окислом щёлочноземельного металла. Хемосорбция происходит в период, в течение которого станция сначала поднимается, а затем опускается, перелетая с места на место за счёт ветрового переноса (Балыбердин В.В., Пичхадзе К.М., Подгорный А.М. и др., 1988; Балыбердин В.В., Береговой С.Н., Воронцов В.А., Пичхадзе К.М., 2010). Посадка в различных местах позволит проводить контактные исследования, а также забор и сравнительный анализ грунта. Кроме того, при дальнейшей проработке принятых принципиальных решений может быть осуществлена ещё более амбициозная задача по забору грунта, подъёму на необходимую высоту для следующих операций: старта взлётной ракеты и доставки грунта на орбиту планеты, а потом и на Землю.

В проекте создания марсианского аэростата разработчики сталкивались с другой задачей – обеспечение функционирования в совершенно других условиях. Низкая плотность атмосферы, в первую очередь, требовала существенного увеличения объёма оболочки и применения тонких плёночных материалов (Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М., 2021). Однако ряд технических решений может быть использован и в венерианских условиях. В частности, челночный дрейф, включающий днём – подъём и дрейф на сравнительно небольшой высоте в атмосфере, ночью – опускание и «волочение» по поверхности с использованием специального устройства – гайдропа, может быть применён для забора и анализа грунта в разных местах посадки.



рисунки 4. Прыжковый аэростат и челночный дрейф

5. Атмосферный зонд «ветролёт»

Атмосферный зонд «ветролёт», использует динамику атмосферы Венеры, не нуждается в каких-либо дополнительных источниках энергии и запасах рабочего газа, и может на порядок, по сравнению с аэростатным зондом, увеличить время активного функционирования. Схема спуска в атмосфере планеты и ввода в действие планирующего зонда идентична схеме, реализованной при вводе в действие аэростатных венерианских зондов. После входа десантного аппарата в атмосферу планеты по достижении заданных условий торможения вводят в действие систему блока научной аппаратуры и аэродинамическую поверхность (парашют). Условия ввода могут быть определены в зависимости от научных задач эксперимента, например, для проведения исследований на верхней границе облачного слоя планеты Венера. Исходя из принципа функционирования системы, желательно, чтобы ввод её в действие был осуществлён в области максимальных атмосферных градиентных течений (Воронцов В.А., Пичхадзе К.М., Полищук Г.М., 2009; Соболев И.А., 2017). Отделение блока научной аппаратуры и аэродинамической поверхности от спускаемого аппарата осуществляются последовательно, причём перед отделением уменьшается расстояние между ними до минимально возможного значения, которое определяется границей взаимной

аэродинамической интерференции аэродинамической поверхности и блока научной аппаратуры. Это позволяет провести отделение организованно с минимальными возмущениями. После ввода зонда в действие крыло затягивается ветровым потоком W_1 , а приборный отсек, снабжённый дополнительным тормозным парашютом – ветровым потоком со скоростью W_2 ($W_1 > W_2$). В результате действия на зонд аэродинамических сил он движется со скоростью V ($W_2 < V < W_1$). При разнесении блока аппаратуры и аэродинамической поверхности необходимо контролировать длину связи между ними и, по достижении заданных условий движения, осуществлять вытормаживание вертикальной скорости движения блока научной аппаратуры с помощью дополнительного тормозного устройства, после чего его необходимо перевести в горизонтальное положение. После этого система осуществляет дрейф в заданных слоях атмосферы и проводятся научные измерения. Для изменения уровня плавания либо восстановления требуемого уровня при отклонении от него в силу изменения внешних условий регулируется величина подъёмной силы путём изменения расстояния между блоком научной аппаратуры и аэродинамической поверхностью или посредством изменения величины тормозной силы, действующей на блок научной аппаратуры. Увеличение тормозных свойств блока научной аппаратуры может быть достигнуто путём раскручивания дополнительного тормозного устройства набегающим потоком. Раскручивание тормозного устройства, кроме того, может обеспечить питание блока научной аппаратуры за счёт преобразования механической энергии вращения в электрическую. Время активного существования, безусловно, можно оценить при проведении экспериментальной отработки в земных условиях. Самые первые методические лётные испытания макета «вертолёт» показали возможность технической реализации.

6. Мультироторный летательный аппарат

Широкое использование на Земле беспилотных летательных аппаратов различного типа, выполненных по самолётной, вертолётной и комбинированной схемам, наводит на мысль о возможности их применения в исследовательских целях на других планетах и, в частности, на Венере, плотность атмосферы которой позволяет применять различные роторные устройства и аппараты, оснащённые крылом или воздушным винтом. Удачное конструкторское решение аэростатного зонда, возможность размещения баков со сжатым гелием и парашютного контейнера на кронштейнах зонда, организованного ввода в действие, может быть также использовано для размещения в модернизированной конструкции дополнительных технических устройств, таких как мультироторные летательные аппараты (МРЛА). Предполагается использование винтового мультироторного летательного аппарата в составе спускаемого аппарата. Мультироторный ЛА относится к классу летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки, выполненных по вертолётной мультикоптерной схеме (Яценко М.Ю., Воронцов В.А., 2020; Воронцов В.А., Яценко М.Ю., 2022).



- 1 – конструкция аэростатного зонда; 2 – МРЛА;
3 – мотогондола; 4 – ползковое шасси;
5 – адаптер крепления полезного груза.

рисунок 6. Мультироторный летательный аппарат, размещаемый в конструкции аэростатного зонда

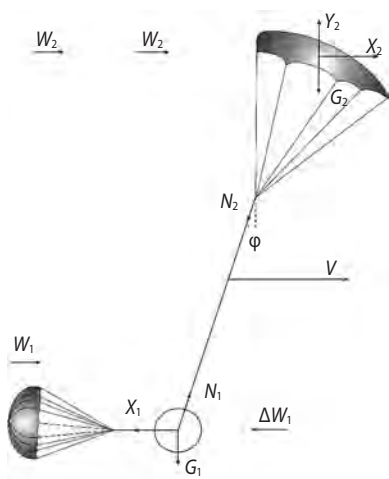


рисунок 5. Принципиальная схема функционирования зонда «ветролёта» и фрагмент методических испытаний

Проектный облик мультироторного летательного аппарата представлен на рисунке 6. Полезным грузом могут быть: камеры для фото- и видеосъёмки; заборники газа и газоанализаторы для взятия проб с атмосферы Венеры; прочая исследовательская аппаратура, исходя из потребностей науки. Проектируемый мультироторный летательный аппарат способен: к вертикальному взлёту и вертикальной посадке; к зависанию на определённой высоте на заданное время; спускаться в режиме авторотации (самовращения) винтов; к корректировке высоты полёта.

Предлагается несколько вариантов использования МРЛА.

Вариант 1. МРЛА устанавливается в спускаемом аппарате и вводится в действие на «ветке» спуска посадочного аппарата в атмосфере Венеры после срабатывания системы разделения.

Вариант 2. МРЛА устанавливается в спускаемом аппарате и вводится в действие на «ветке» спуска и развёртывания аэростатного зонда в атмосфере Венеры после срабатывания системы разделения.

Вариант 3. МРЛА устанавливается на посадочном аппарате. Запуск МРЛА осуществляется после посадки посадочного аппарата на поверхность Венеры.

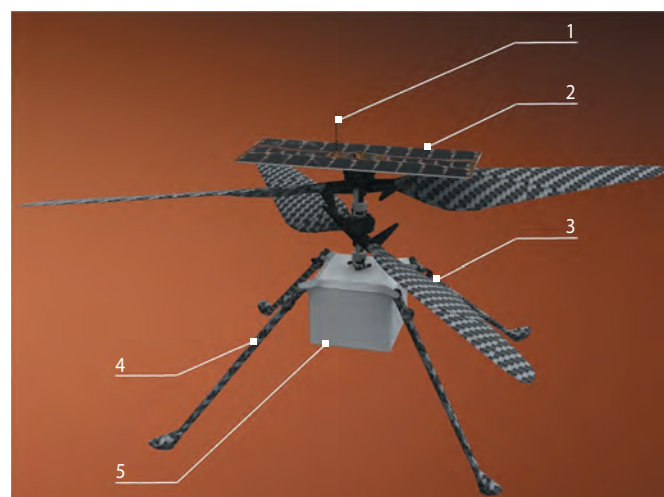
Вариант 4. МРЛА устанавливается на другом техническом средстве исследования Венеры, например, на аэростатической платформе-носителе (АСПН). Запуск МРЛА осуществляется во время движения АСПН после её развёртывания и введения в действие (рисунок 7).

7. Атмосферный зонд вертолётного типа и режим авторотации

Вторым в истории после венерианских аэростатных зондов (1985) атмосферным летательным аппаратом для исследования другой планеты стал беспилотный роботизированный вертолёт НАСА Ingenuity («Инджиньюити», в переводе «Изобретательность»), осуществивший в апреле 2021 года первый полёт на Марсе (Balaram J., MiMi Aung, Matthew P. Golombek., 2021).



рисунок 7. МРЛА устанавливаемый на АСПН



1 – антенна; 2 – солнечная батарея;
3 – лопасть ротора; 4 – посадочные опоры;
5 – электроника (батареи, датчики, камера).

рисунок 8. Марсианский вертолёт Ingenuity

До этого полёта был разработан ряд проектов (Шеремет А.А., Рыжков В.В., 2023) с использованием роторных тормозных устройств для спуска в атмосфере Земли и Марса. Доказана работоспособность и эффективность такого рода устройств даже в разреженной атмосфере. Что касается торможения и полёта в плотной атмосфере Венеры, можно рассчитывать на ещё более эффективное их применение. Если в атмосфере Марса всё же предпочтительно применение парашютно-реактивной схемы спуска и посадки, то для Венеры имеет смысл рассмотреть альтернативный вариант. Как известно, на заключительном этапе торможения в атмосфере Венеры, после сброса парашюта, посадочный аппарат спускался на тормозном щитке. При этом скорость посадки составляла несколько метров в секунду. Применение роторного устройства может снизить скорость до нуля. Кроме того, возможен вариант схемы спуска и посадки без парашютной системы. Причём при спуске с роторным устройством в режиме авторотации возможно накопление электроэнергии, которую затем можно использовать для последующего взлёта, и т.д.

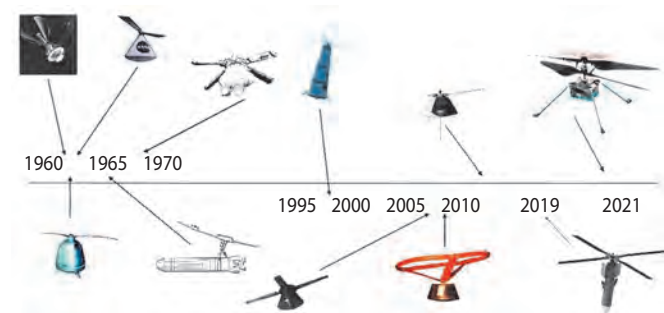


рисунок 9. Проекты роторных систем спуска и посадки и годы разработки

Безусловно, требуется проведение дополнительного исследования всех аспектов применения атмосферных зондов вертолётного типа или роторных тормозных и полётных устройств, включая режимы авторотации и другие проблемные вопросы. Однако, первый опыт и предварительные оценки дают основания рассматривать их как перспективные технические средства исследований для Венеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ опыта создания первых аэростатных станций для исследования Венеры, последовавших за этим проектов и новые разработки атмосферных зондов показывают возможность количественно увеличить объём получаемых научных данных об исследуемой планете, а также решения новых научных и технических задач на качественно более высоком уровне. Проведение научно-исследовательских работ с целью обеспечения перспективных проектов Программы исследования Венеры позволит увеличить длительность и объём получаемой информации, сохранить первенство нашей страны в изучении ближайшей к нам планеты – сестры Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований // Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Г.М. Полищука и д-ра техн. наук, проф. К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 660 с.

Байбаков С.Н., Мартынов А.И. С орбиты спутника – в «глаз» тайфуна. М.: Наука, 1986. 72 с.

Балыбердин В.В., Береговой С.Н., Воронцов В.А., Пичхадзе К.М. Венерианский приповерхностный прыжковый аэростат и новые принципы управления его движением // Доклад на 15 международной науч. конференции «Системный анализ, управления и навигация». Украина, г. Евпатория. 27 июня – 04 июля 2010 г. С. 60-61.

Балыбердин В.В., Пичхадзе К.М., Подгорный А.М. и др. Эндотермические аэростаты. К.: Наукова думка, 1988. 107 с.

Воронцов В.А., Дерюгин В.А., Пичхадзе К.М. и др. Метод исследования планеты Венера с помощью плавающих аэростатных станций. Математическая модель // Космические исследования. 1988. Т. 26, вып. 3. С. 430-433.

Воронцов В.А., Клименко Н.Н., Пичхадзе К.М., Хмель Д.С. Использование стратостатов с переменной высотой дрейфа // Двойные технологии. 2024 № 1. С. 17-25.

Воронцов В.А., Лохматова М.Г., Пичхадзе К.М. и др. Перспективный космический аппарат для исследования Венеры. Проект «ВЕНЕРА-Д» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2010. № 4. С. 62-67.

Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М. Системное проектирование космических десантных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2021. 256 с.

Воронцов В.А., Пичхадзе К.М., Полищук Г.М. Способ управления полетом исследовательского аппарата в атмосфере планеты // Патент РФ № 2402467. 2009.

Воронцов В.А., Хмель Д.С. Управляемый аэростат для исследования Венеры // Тезисы докладов на XLIV Академических чтениях по космонавтике, г. Москва. 2020. Т. 2. С. 287-290.

Воронцов В.А., Яценко М.Ю. К вопросу о включении в программу исследования Венеры дополнительных технических средств // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6, № 1. С. 5-13. DOI: 10.26732/j.st.2022.1.01.

Клименко Н.Н., Хмель Д.С. Стратосферные системы наблюдения открывают новые возможности для космических исследований // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 2. С. 32-38.

Косенкова А.В., Ефанов В.В., Седых О.Ю. Исследование планет земной группы дистанционными и контактными методами. Часть 1. История // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2023. № 4. С. 9-19.

Седых О.Ю., Сысоев В.К., Ткаченко А.И., Хмель Д.С. Аналитический обзор разработок аэростатических зондов для Венеры // Космическая техника и технологии. 2024. № 2 (45). С. 38-52.

Соболев И.А. Анализ проектных характеристик атмосферных зондов змейкового типа (ветролётов) для изучения атмосферы Венеры // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4. С. 108-115.

Финченко В.С., Пичхадзе К.М., Ефанов В.В. Надувные элементы в конструкциях космических аппаратов – прорывная технология в ракетно-космической технике // Под ред. В.А. Колмыкова, Х.Ж. Карчаева. Химки: Изд-ль АО «НПО Лавочкина», 2019. 488 с.

Шеремет А.А., Рыжков В.В. Развертывание десантного модуля с роторной системой в атмосфере Венеры // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник. М.: ООО Буки Веди, 2023. С. 128-130.

Яценко М.Ю., Воронцов В.А. Концепция исследования Венеры с помощью мультироторного летательного аппарата // Сб. избр. науч. докладов по итогам XLVI Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». М.: МАИ, 2020. С. 311-321.

Balaram J., MiMi Aung, Matthew P. Golombek. The Ingenuity Helicopter on the Perseverance Rover // Space Science Reviews. 2021. 217(56). 11 p.

Статья поступила в редакцию 29.08.2024

Статья после доработки 04.11.2024

Статья принята к публикации 04.11.2024