

Эволюция принципа полета воздушного змея: от древнейших летательных аппаратов к планетным атмосферным зондам

© В.А. Воронцов, Б.В. Любезный, В.П. Украинская

Московский авиационный институт, Москва, 125993, Российская Федерация

Рассмотрена эволюция принципа использования силы ветра для полета — от древних воздушных змеев до перспективных планетных атмосферных зондов. Показано, как фундаментальный аэродинамический принцип полета, основанный на взаимодействии с набегающим потоком, последовательно развивался и адаптировался для решения новых задач. Изложены концептуально близкие полеты планетров, использующие восходящие термические или динамические потоки для набора высоты и последующего планирования. Рассмотрены альтернативные пути развития — воздухоплавание с помощью таких летательных аппаратов, как аэростаты и дирижабли, в том числе управляемые аэростатные зонды для Венеры. Особое внимание уделено применению принципа использования силы ветра для полета в планетных исследованиях. На основе успешного опыта аэростатных зондов проекта «Вега» и разработок дрейфующего зонда проекта «Веста» для изучения атмосферы Венеры рассмотрена актуальная задача по созданию долгоживущего, энергонезависимого летательного аппарата «Ветролёт» для исследования планет, имеющих атмосферу. Описаны основные конструктивные элементы, условия функционирования и возможность управления атмосферным зондом. Приведены математические формулы для расчета проектных характеристик и параметров движения зонда в атмосфере. Представлен сравнительный анализ концепции «Ветролёт» с современными международными проектами изучения атмосферы Венеры.

Ключевые слова: воздушный змей, градиент ветра, атмосферный зонд, Венера, «Ветролёт», «Вега», планирующий полет, летательный аппарат

Введение. История покорения воздушной стихии неразрывно связана с идеей использования природных сил. Одним из древнейших и наиболее универсальных принципов, заложенных в основу многих летательных аппаратов (ЛА), является принцип полета воздушного змея: создание подъемной силы и управляемого движения за счет взаимодействия с набегающим потоком воздуха — ветром. Этот принцип, зародившийся в глубокой древности, прошел долгий путь эволюции, воплотившись в конструкциях разнообразных аппаратов — от простейших игрушек до сложных инженерных систем, предназначенных для научных исследований, спорта, транспорта и даже генерации энергии.

Сейчас, в эпоху освоения космоса, этот принцип переживает новый виток развития, находя применение в проектах по исследованию планет Солнечной системы. Атмосфера Венеры в верхних слоях тропосферы по плотности воздуха, давлению и температуре подобна

земной, что открывает уникальные возможности для применения атмосферных зондов, способных месяцами дрейфовать в потоках ветра, собирая научные данные. Анализ исторического пути развития воздухоплавательных аппаратов позволяет не только оценить преемственность технической мысли, но и выделить ключевые идеи, наиболее перспективные для современных планетных миссий.

Целью данной работы является обзор этой эволюции — от воздушных змеев Древнего Китая до перспективных проектов венерианских атмосферных зондов проекта «Ветролёт».

Древние истоки и первые практические воплощения. Первые документально зафиксированные воздушные змеи появились в Китае в III веке до н. э. [1]. Изготовленные из дерева и бумаги или шелка, эти аппараты использовались не только для развлечений, но и в военных и религиозных целях: для сигнализации, измерения расстояний и, по некоторым данным, для попыток подъема наблюдателей [2]. Первые воздушные змеи в Древнем Китае показаны на рис. 1. Конструкция плоского змея с балансировочным хвостом реализовывала основы аэродинамики: создание подъемной силы наклонной пластиной и обеспечение устойчивости относительно вертикальной оси [3].

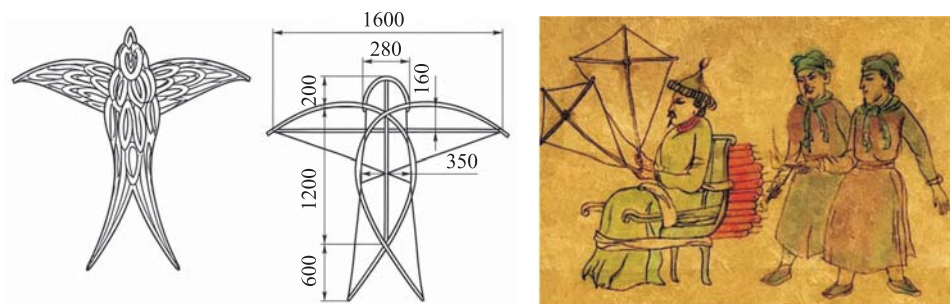


Рис. 1. Воздушные змеи в Древнем Китае

В Средние века технология воздушных змеев распространилась в Японию, Корею, а затем и в Европу, где они постепенно стали инструментом научных экспериментов. Ярким примером являются опыты Бенджамина Франклина в 1752 г. по изучению атмосферного электричества (рис. 2), в которых воздушный змей с металлическим проводником сыграл ключевую роль [4].

Михаил Ломоносов с помощью воздушных змеев изучал атмосферу и природу молний. Ученый 26 июня 1753 г. запустил воздушного змея в грозу и по бечевке, используемой как проводник, извлек разряд статического электричества.

К XIX в. воздушных змеев начали применять и для подъема метеорологических приборов, что стало прообразом будущих научных

зондов [5]. Во время Первой и Второй мировых войн воздушные змеи использовались для подъема наблюдателей, грузов, антенн и обеспечения связи для разведки на большие расстояния [6].



Рис. 2. Опыты американского ученого Б. Франклина с атмосферным электричеством с помощью воздушного змея

Коробчатый змей Харгрейва: переход от игрушки к прототипу летательного аппарата. Качественный скачок в развитии идеи произошел в конце XIX в. благодаря австралийскому инженеру Лоуренсу Харгрейву. В 1893 г. он изобрел «коробчатого змея» — конструкцию, состоящую из двух или более прямоугольных ячеек, соединенных в жесткую пространственную решетку [7]. Воздушные змеи конструкции Харгрейва изображены на рис. 3.

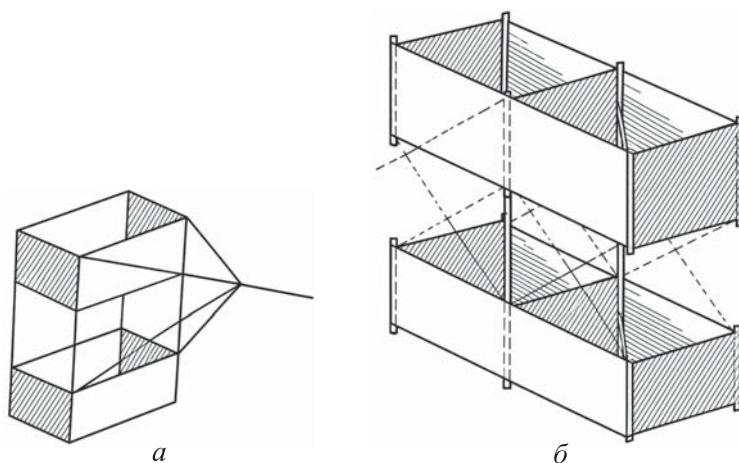


Рис. 3. Воздушные змеи конструкции Харгрейва, созданные в 1894 г. (а) и в 1895 г. (б)

Эта конструкция обладала рядом революционных преимуществ:

- исключительная устойчивость — благодаря распределенным воздушным потокам через ячейки змей автоматически выравнивался и сохранял стабильность даже при сильных порывах ветра;
- высокая подъемная сила — конструкция отличалась высоким аэродинамическим качеством по сравнению с плоскими змеями;
- жесткость без излишней массы — каркасная структура была прочной, но легкой.



Рис. 4. Первый самолет братьев Райт

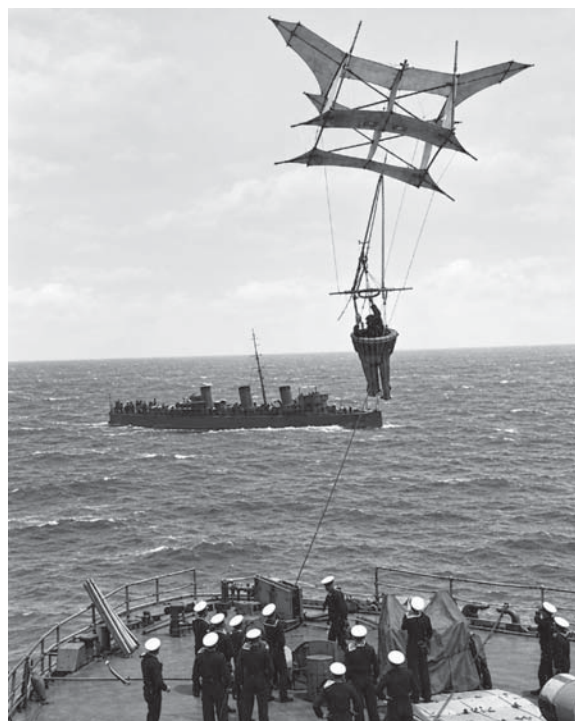


Рис. 5. Подъем наблюдателя с помощью коробчатого змея

Харгрейв не только проводил эксперименты с подъемом грузов, но и использовал коробчатых змеев для изучения аэродинамики. Его работы оказали непосредственное влияние на братьев Райт, которые изучали труды Харгрейва при создании своего первого самолета [7] (рис. 4).

Таким образом, коробчатый змей стал важнейшим связующим звеном между древней идеей и зарождающейся практической авиацией. В XX в. большие коробчатые змеи устанавливали рекорды по высоте подъема, их использовали для подъема наблюдателей и антенн в военных целях (рис. 5).

В наши дни коробчатые змеи продолжают использоваться в спорте, а их конструкционные принципы вдохновляют разработчиков на создание дронов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Кайты: от буксировки судов к экстремальному спорту и энергетике. Дальнейшим развитием управляемого полета стали кайты. В 1826 г. Джордж Покок использовал кайт с четырехстропной системой управления для буксировки морских судов (рис. 6), что впервые позволило двигаться против ветра [8].



Рис. 6. Перемещение морских судов с помощью кайтов

В 1994 г. Билл Росселер и его сын Кори изобрели систему KiteSki, состоящую из водных лыж и двухстропного кайта (рис. 7), что положило начало современному кайтсерфингу [9].

В XXI в. кайты нашли широкое применение:

- в спорте (кайтсерфинг, кайтбординг, сноукайтинг) [9];
- промышленности (системы буксировки крупных морских судов, например, SkySails, с кайтами площадью 150...600 м² (рис. 8), что позволяет экономить до 20 % топлива за рейс [10]);



Рис. 7. Доска для серфинга и двухстропный кайт



Рис. 8. Кайты для буксировки больших океанских контейнеровозов

- энергетике (разрабатываются системы генерации электроэнергии, где кайты, совершая циклические маневры, приводят в движение наземные генераторы, используя более стабильные и сильные ветра на больших высотах (рис. 9) [8, 11]);
- транспорте (наземные транспортные средства на колесах (кайт-багги), использующие кайт для движения по песку или земле [12]).



Рис. 9. Кайты для генерации электроэнергии

Планеры и использование восходящих потоков. Параллельно развивалось направление аппаратов тяжелее воздуха, способных к планирующему полету. После работ Джорджа Кейли и Отто Лилиенталь планеры превратились в высокоэффективные спортивные и исследовательские летательные аппараты.

Первый успешный планирующий полет совершил француз Жан-Мари Ле Бри в 1856 г. на планере, сконструированном по образу альбатроса [9], изображение которого представлено на рис. 10. Лилиенталь на своем «стандартном» планере совершал парящие полеты до 250 м [13].



Рис. 10. Планер, который создал Жан-Мари Ле Бри

Суть полета планера — использование восходящих термических или динамических потоков для набора высоты и последующего планирования. Советский планер СК-3 «Красная звезда», созданный при участии С.П. Королёва (1930), имел аэродинамическое качество около 20, и с высоты 1 км он мог пролететь 20 км [13]. Современные

планеры, такие как планер АС 4-115 (рис. 11), достигают значений аэродинамического качества 40–50. Этот принцип пассивного использования энергии атмосферы концептуально близок к идее долгоживущих планетных зондов.



Рис. 11. Планер АС 4-115

Аэростаты и дирижабли: аэростатическая подъемная сила. Другим направлением стало использование аэростатической подъемной силы. От первых тепловых аэростатов братьев Монгольфье (1783) человечество пришло к созданию управляемых аэростатов, изображения которых представлены на рис. 12.

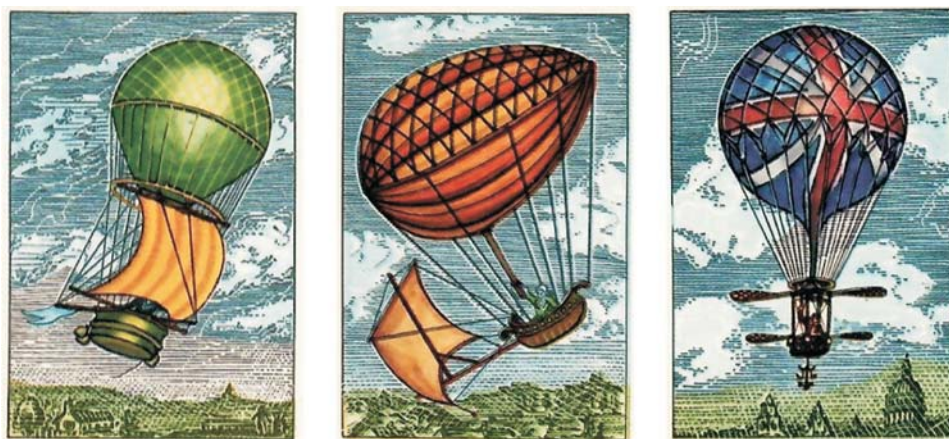


Рис. 12. Парусные аэростаты 1783–1784 гг. Первая попытка управлять аэростатом 1785 г.

Первый управляемый полет на дирижабле с паровым двигателем (рис. 13) совершил француз Анри Жиффар в 1852 г. [14].



Рис. 13. Первый полет на дирижабле Анри Жиффара

Расцвет дирижаблестроения пришелся на первую половину XX в. с появлением жестких дирижаблей графа Цеппелина, таких как «Гинденбург», использовавшихся для трансатлантических пассажирских перевозок и военных целей [15]. Несмотря на спад интереса после катастрофы «Гинденбурга» (1937), идея дирижабля остается актуальной для выполнения специальных задач: патрулирования, наблюдения, транспортировки крупногабаритных грузов в труднодоступные районы [16].

Для научных целей свободные аэростаты и стратостаты долгое время были и остаются незаменимым инструментом для изучения верхних слоев атмосферы Земли. Привязанные аэростаты использовались как аэростаты заграждения во время мировых войн.

Аэростатные зонды для Венеры. Логическим продолжением эволюции стало применение аэростатных зондов в межпланетных миссиях. Планета Венера с ее плотной атмосферой (давление у поверхности в десятки раз выше земного), высокой температурой у поверхности и сильными ветрами (скорость зонального ветра на верхней границе облаков около 100 м/с) стала первым и пока единственным полигоном для испытания атмосферных зондов за пределами Земли [17, 18].

Историческим прорывом стал советский проект «Вега» (1984–1986). Спускаемые аппараты «Вега-1» и «Вега-2» (рис. 14) успешно доставили в атмосферу Венеры аэростатные зонды [19, 20]. Каждый зонд представлял собой гондолу с научной аппаратурой (массой 6,7 кг), подвешенную к оболочке шарообразного баллона избыточного давления объемом около 23 м³, наполненного гелием. Аэростаты были введены на ночной стороне, на высоте ~54 км и дрейфовали в облачном слое около 46 ч, пройдя расстояние свыше 11 000 км. Несмотря на воздействие нисходящих потоков со скоростью до 3 м/с, они сохраняли заданную высоту, и успешно передавали данные о температуре,



Рис. 14. Аэростатный зонд КА «Вега»

давлении, скорости ветра и вертикальных потоках [21, 22]. Этот успех доказал возможность длительного функционирования сложных систем в агрессивной венерианской среде и эффективность использования естественной суперротации атмосферы для глобальных исследований.

На основе этого опыта был предложен и проанализирован целый спектр усовершенствованных проектов венерианских аэростатов [23, 24]:

- аэростаты с регулируемой плавучестью;
- термические (монгольфьеры) и эндотермические аэростаты;
- управляемые дирижабли с винтовыми двигателями;
- аэростаты для малых высот и поверхности.

Такие проекты направлены на увеличение длительности миссий (от суток до месяцев), расширение диапазона исследуемых высот (от поверхности до 70 км и выше) и повышение информативности. Однако большинство из них в той или иной степени требуют расхода рабочего тела (гелия, балласта), сложных систем регулирования давления или значительных бортовых запасов энергии для маневра.

Атмосферный зонд «Ветролёт». Особый интерес представляет концепция дрейфующего атмосферного зонда «Ветролёт» (рис. 15),



Рис. 15. Атмосферный зонд «Ветролёт» (рисунок сгенерирован ИИ)

которая представляет собой синтез древнейшего принципа воздушного змея и современных технологий и предлагает принципиально иной, энергонезависимый подход к движению и маневрированию в атмосфере Венеры [25–27].

Принцип действия и конструкция «Ветролёта». Безмоторный аэродинамический аппарат «Ветролёт» использует для движения не запасенную энергию, а силу ветра в атмосфере Венеры. Его принцип действия аналогичен полету воздушного змея в атмосфере, обладающей сильным и постоянным ветром, и увеличивающимся с высотой градиентом скорости ветра. Аппарат состоит из трех основных элементов, соединенных тросом (леером) [25, 26]:

- несущий аэродинамический элемент, располагающийся на большей высоте, где скорость ветра V_h максимальна; в качестве него можно рассматривать жесткий планер, коробчатого змея, парашют-крыло или иную аэродинамическую поверхность с высоким качеством;
- гондола, которая содержит комплекс приборов для исследований;
- тормозное устройство, которое находится на меньшей высоте, где скорость ветра V_H меньше ($V_h > V_H$); им может быть парашют или специальный ротор, выполняющий также функцию ветрогенератора; схематическое изображение атмосферного зонда «Ветролёт» и атмосферный зонд «Ветролёт» с тормозной роторной системой представлены на рис. 16 и 17.

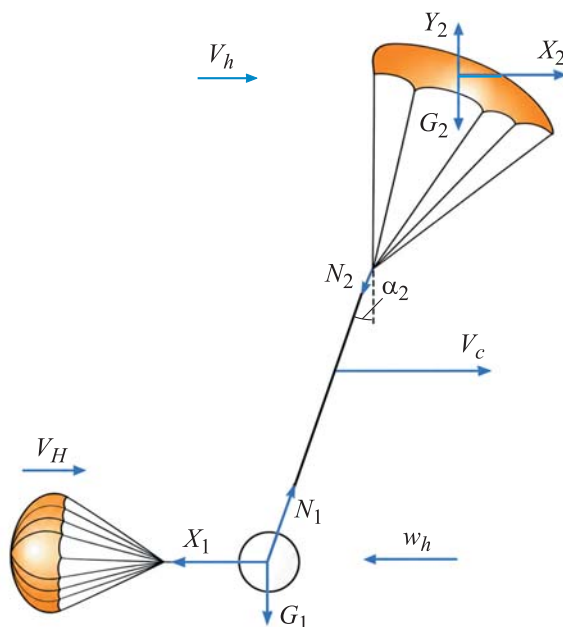


Рис. 16. Схематичное изображение атмосферного зонда «Ветролёт»



Рис. 17. Атмосферный зонд «Ветролёт» с тормозной роторной системой

В процессе движения несущий элемент создает подъемную силу и силу дрейфа, а тормозящий парашют — тормозящее усилие, обеспечивающее натяжение леера для работы несущего парашюта.

Поскольку на Венере с увеличением высоты повышается и скорость ветра, скорость набегающего потока на несущий элемент будет больше, чем на тормозной парашют. Поскольку зонд будет двигаться как единое жесткое целое с результирующей скоростью, скорость движения тормозного парашюта будет больше, чем скорость ветра на этой же высоте. Таким образом, на несущую и тормозную поверхности действуют противоположно направленные скоростные напоры, в связи с чем зонд удерживается в потоке.

Управление высотой полета гондолы осуществляется путем изменения длины леера с помощью автоматической лебедки. Для изменения тормозного усилия, и как следствие, скорости и высоты, может регулироваться степень раскрутки ротора [25, 27].

Основные преимущества и научный потенциал «Ветролёта» следующие:

энергонезависимость движения — аппарат не требует двигателей, расхода гелия или балласта для поддержания дрейфа. Энергия для горизонтального движения возникает непосредственно от воздействия ветровых потоков — природного ресурса атмосферы Венеры;

потенциальная долговечность и надежность — отсутствие сложных герметичных систем с клапанами, компрессорами и баллонами высокого давления для регулирования плавучести упрощает конструкцию, снижает количество потенциальных точек отказа и повышает надежность;

активное управление высотой — изменяя длину леера, можно оперативно регулировать высоту гондолы в пределах сотен метров

или километров, выбирая интересующий слой атмосферы для детальных измерений или производя зондирование по вертикали;

генерация энергии на борту — тормозной ротор может быть раскручен набегающим потоком и использован в качестве ветрогенератора для подзарядки аккумуляторов научной аппаратуры, систем связи и управления;

широкий профиль исследований — зонд может нести комплекс приборов для измерения температуры, давления, скорости и направления ветра, химического и изотопного состава атмосферы и облачных частиц, регистрации электромагнитных полей, молний, инфразвука (для детектирования вулканической активности) и проведения съемки поверхности в различных диапазонах [25, 28];

большая длительность миссии — срок активного существования «Ветролёта» ограничен в основном стойкостью материалов к агрессивной среде и ресурсом научной аппаратуры, что открывает путь к многомесячным и даже многолетним исследовательским миссиям.

Математическая модель и эволюционная связь «Ветролёта». Приведенная ниже математическая модель базируется на следующих допущениях:

- стационарность горизонтального потока ветра, нестационарные порывы не рассматриваются;
- пренебрежение динамическим провисом леера;
- отсутствие влияния турбулентности и вертикальных потоков атмосферы Венеры (осредненные скорости ветра по высотам);
- плоское движение — все силы действуют в одной вертикальной плоскости;
- постоянство плотности атмосферы на каждой фиксированной высоте;
- аэродинамические коэффициенты несущего элемента постоянны в рабочем диапазоне углов атаки.

Установившийся полет зонда в атмосфере описывается системой уравнений и геометрическими соотношениями [25, 26].

Сила сопротивления несущего элемента равна силе сопротивления тормозящего парашюта и гондолы:

$$c_{xk} \rho_H \frac{(V_H - V_c)^2}{2} S_k = (c_{xp} S_p + c_{xg} S_g) \rho_h \frac{(V_c - V_h)^2}{2}.$$

Здесь c_{xk} — коэффициент сопротивления несущего элемента; ρ_H — плотность атмосферы на высоте полета несущего элемента, кг/м^3 ; V_H — скорость ветра на высоте полета несущего элемента, м/с ; V_c — скорость полета зонда, м/с ; S_k — площадь несущего элемента, м^2 ; c_{xp} — коэффициент сопротивления парашюта; S_p — площадь

парашюта, м^2 ; c_{Xg} — коэффициент сопротивления гондолы; S_g — площадь миделя гондолы, м^2 ; ρ_h — плотность атмосферы на высоте полета гондолы, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_h — скорость ветра на высоте полета гондолы, $\text{м}/\text{с}$.

Подъемная сила несущего элемента уравнивает общий вес системы:

$$c_{Yk} \rho_H \frac{(V_H - V_c)^2}{2} S_k = (m_k + m_l + m_g + m_p) g_b,$$

где c_{Yk} — коэффициент подъемной силы несущего элемента; m_k — масса несущего элемента, кг ; m_l — масса леера, кг ; m_g — масса гондолы, кг ; m_p — масса парашютной системы, кг ; g_b — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; $k = \frac{C_{Yk}}{C_{Xk}}$ — аэродинамическое качество несущего элемента.

Скорость «Ветролёта» рассчитывается по следующей формуле:

$$V_c = V_h + \sqrt{\frac{2(m_k + m_l + m_g + m_p) g_b}{k(c_{Xp} S_p + c_{Xg} S_g) \rho_h}}.$$

Минимальная скорость набегающего потока на тормозящий парашют $w_{h\min}$ для его стабильной работы определяется из выражения

$$w_h > \sqrt{\frac{m_{\text{уд}} g_b}{0,8 \rho_h}} = w_{h\min},$$

где w_h — скорость потока, набегающего на тормозящий парашют; $m_{\text{уд}}$ — удельная масса парашютной ткани.

Угол наклона леера α_1 к горизонтальной плоскости в точке соединения с гондолой вычисляется из условия равновесия гондолы:

$$\text{tg} \alpha_1 = \frac{(m_g + m_p) g_b}{(c_{Xp} S_p + c_{Xg} S_g) \rho_h \frac{(V_c - V_h)^2}{2}} = \frac{2(m_g + m_p) g_b}{(c_{Xp} S_p + c_{Xg} S_g) \rho_h (V_c - V_h)^2},$$

где α_1 — угол наклона леера к горизонтальной плоскости в точке соединения с гондолой.

Для определения длины леера L_l нужно аппроксимировать форму изогнутого леера дугой окружности:

$$L_l = \frac{(H-h)(\alpha_2 - \alpha_1)}{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2},$$

где α_2 — угол наклона леера к горизонтальной плоскости в точке соединения с несущим элементом.

«Ветролёт» является потомком и кульминацией развития принципа воздушного змея. Подобно древнему змею, он использует силу встречного потока воздуха для создания полезной силы (подъемной и движущей). Как и коробчатый змей Харгрейва, он должен обладать высокой аэродинамической устойчивостью в турбулентной среде, и подобно современным кайтам он обладает системой активного управления своим положением и энергией. При этом «Ветролёт» преодолевает ключевое ограничение классического аэростата «Вега» — пассивность дрейфа строго по ветру — и приобретает способность к управляемому перемещению в атмосфере с минимальными энергозатратами.

Сравнение «Ветролёта» с современными международными проектами. Наряду с концепцией «Ветролёт», за рубежом разрабатываются альтернативные платформы для изучения Венеры. Проект VAMP (Venus Atmospheric Maneuverable Platform) компании Northrop Grumman представляет собой гибрид дирижабля и самолета, поскольку он использует аэростатическую подъемную силу и винтовые движители, что позволяет ему активно маневрировать, но ему требуются энергозатраты и сложная система управления. Аэростатные платформы JPL/NASA ориентированы на длительное дрейфующее зондирование, но, как и советские аэростаты «Вега», не может активно изменять высоту и курс без расхода балласта или гелия.

Данные для сравнения аппарата «Ветролёт» с указанными проектами по ключевым параметрам приведены в таблице.

Характеристики «Ветролёта» и альтернативных платформ

Параметр	«Ветролёт»	VAMP (Northrop Grumman)	Аэростатные платформы (JPL/NASA)
Принцип движения	Аэродинамика за счет градиента ветра	Винтовые движители, аэростатика	Пассивный дрейф по ветру
Управление высотой	Изменение длины леера	Активное (движители, балласт)	Ограниченное (сброс балласта/газа)
Энерго-независимость	Высокая (не требуется топливо для движения)	Низкая (требуется топливо/батареи)	Средняя (только для приборов)

Окончание табл.

Параметр	«Ветролёт»	VAMP (Northrop Grumman)	Аэростатные платформы (JPL/NASA)
Длительность миссии (потенциал)	Месяцы	Недели–месяцы	Недели
Наличие летного прототипа	Нет (концепция)	Нет	Да («Вега», 1984–1986)

Таким образом, «Ветролёт» занимает нишу энергонезависимого, долгоживущего аппарата, дополняя возможности управляемых дирижаблей и дрейфующих аэростатов.

Закключение. Эволюция принципа воздушного змея представляет собой яркий пример того, как простая, наблюдаемая в природе идея, пройдя через века технологического развития, не только не устаревает, но и открывает новые горизонты в самых передовых областях человеческой деятельности — в исследовании космоса.

Успех аэростатов «Вега» стал историческим прорывом, впервые подтвердившим жизнеспособность и высочайшую эффективность атмосферных зондов для исследования Венеры. Дальнейшее развитие пошло по пути усложнения систем: управления плавучестью, создания двигательных установок, разработки жаростойких материалов для работы у поверхности.

Проект «Ветролёт» предлагает возврат к истокам — к аэродинамике. Он не нуждается в больших запасах энергии для движения в пользу использования неисчерпаемого природного ресурса — энергии ветра. В этом смысле «Ветролёт» представляет собой высшую на сегодняшний день ступень эволюции принципа воздушного змея: от пассивного дрейфа по ветру (аэростат) — к активному, управляемому и энергонезависимому полету за счет ветра.

Таким образом, древний принцип не просто сохранил актуальность, но и указал путь к созданию принципиально нового класса долгоживущих исследовательских зондов для планет с атмосферой.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Броуде Б.Г. *Воздухоплавательные летательные аппараты*. Москва, Машиностроение, 1976, 140 с.
- [2] Попов В.А., ред. *Энциклопедия воздухоплавания и авиации*. Москва, Большая Российская энциклопедия, 2005, 720 с.
- [3] Королев С.П., ред. *Аэродинамика летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 2019, 564 с.
- [4] Попов В.А. *История авиации и воздухоплавания*. Москва, Воениздат, 1986, 480 с.

- [5] Крылов А.Н. *История метеорологических наблюдений*. Москва, Наука, 2012, 296 с.
- [6] Попов В.А. *Военное воздухоплавание*. Санкт-Петербург, Политехника, 2007, 328 с.
- [7] Дузь П.Д. *История воздухоплавания и авиации в России*. Москва, Машиностроение, 1989, 336 с.
- [8] Морозов И.В. *Альтернативные источники энергии*. Санкт-Петербург, Судостроение, 2020, 412 с.
- [9] Соболев Д.А. *История воздухоплавания и авиации в СССР*. Москва, Машиностроение, 1985, 400 с.
- [10] Михеев В.Р. *Экстремальные виды транспорта*. Москва, Транспорт, 2019.
- [11] Jones J.A. Innovative balloon buoyancy techniques for atmospheric exploration. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, vol. 7, pp. 397–402.
- [12] Петров Г.А. *Основы аэростатики*. Москва, Машиностроение, 2015, 320 с.
- [13] Шавров В.Б. *История конструкций самолетов в СССР до 1938 года*. Москва, Машиностроение, 2002, 703 с.
- [14] Горошко В.А., Данилов Ю.И. Воздухоплавание в XXI веке: новые технические решения и задачи. *Общероссийский научно-технический журнал «Полёт»*, 2021, № 12, с. 35–45.
- [15] Грумондз В.Т. *Золотой век дирижаблей*. Москва, Вече, 2015, 384 с.
- [16] Грумондз В.Т. *Перспективные летательные аппараты*. Москва, Наука, 2020, 416 с.
- [17] Москаленко Г.М. *Механика полета в атмосфере Венеры*. Москва, Машиностроение, 1978, 232 с.
- [18] Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М. *Системное проектирование космических десантных аппаратов*. Москва, Изд-во МАИ, 2021, 255 с.
- [19] Воронцов В.А., Дерюгин В.А., Карягин В.П., Кремнев Р.С., Кузнецов В.В., 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.
- [20] Linkin V.M., et al. The VEGA Venus Balloon Experiment. *Science*, 1986, vol. 231, pp. 1407–1408.
- [21] Бержанович В.В., Александров Ю.Н., Андреев Р.А., Арманд Н.А., Бакитько Р.В., Бламон Ж. [и др.]. Аэростатный эксперимент проекта «Вега»: мелкомасштабная турбулентность в среднем облачном слое Венеры. *Письма в Астрономический журнал*, 1986, т. 12, № 1, с. 46–52.
- [22] Андреев Р.А., Алтунин В.И., Арманд Н.А., Аким Э.Л., Бакитько Р.В., Бламон Ж. и др. Аэростатный эксперимент проекта «Вега». Средняя скорость ветра в атмосфере Венеры по доплеровским измерениям аэростатных станций. *Письма в Астрономический журнал*, 1986, т. 12, № 1, с. 41.
- [23] Микрин Е.А., Лопота В.А., Филатов В.В. (ред.) *Автоматические космические аппараты и комплексы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 576 с.
- [24] Воронцов В.А., Любезный Б.В., Хмель Д.С., Киспе Мендоза М.В., Шеремет А.А., Яценко М.Ю. Атмосферные зонды для исследования Венеры. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2024, № 4, с. 144–150.
- [25] Воронцов В.А., Полищук Г.М., Пичхадзе К.М. *Способ управления полетом исследовательского аппарата в атмосфере планеты*. Патент на изобретение № 2402467, 2009.
- [26] 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.

- [27] Любезный Б.В., Воронцов В.А. Анализ возможности управления движением планирующего зонда в атмосфере Венеры. *23-я Международной конференции «Авиация и Космонавтика» г. Москва*. 18–22 ноября 2024 г. Москва, МАИ, 2024.
- [28] Воронцов В.А., Крайнов А.М., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М., Хартов В.В. Предложения по расширению программы исследований Венеры с учетом опыта проектных разработок НПО им. С.А. Лавочкина. *Труды МАИ*, 2012, № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29449&eng=N>

Статья поступила в редакцию 05.03.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Воронцов В.А., Любезный Б.В., Украинская В.П. Эволюция принципа полета воздушного змея: от древнейших летательных аппаратов к планетным атмосферным зондам. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 9. EDN FPPPRC

Воронцов Виктор Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры 601 и кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов для исследования дальнего космоса. Автор более 300 научных публикаций. e-mail: victor-vorontsov@yandex.ru Author ID: 840814

Любезный Борис Викторович — аспирант кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: проектирование и моделирование движения атмосферных зондов для исследования планеты Венеры. e-mail: laplandia2009@bk.ru Author ID: 1235914

Украинская Виталия Павловна — студент кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: атмосферные зонды для исследования планеты Венеры. e-mail: vitaucr3103@gmail.com

Evolution of the Kite Flight Principle: From the Earliest Aircraft to Planetary Atmospheric Probes

© V.A. Vorontsov, B.V. Lyubeznny, V.P. Ukrainskaya

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993,
Russian Federation

The evolution of the principle of using wind force for flight is considered — from ancient kites to advanced planetary atmospheric probes. It is shown how the fundamental aerodynamic principle of flight, based on interaction with the oncoming flow, has been successively developed and adapted to solve new problems. Conceptually similar glider flights, which use ascending thermal or dynamic currents to gain altitude and subsequent gliding, are outlined. Alternative development paths are considered — aeronautics using such aircraft as balloons and airships, including controlled balloon probes for Venus. Special attention is paid to the application of the principle of using wind force for flight in planetary research. Based on the successful experience of balloon probes of the Vega project and the development of a drifting probe of the Vesta project for studying the atmosphere of Venus, the current task of creating a long-lived, energy-independent aircraft “Vetrolyot” for the exploration of planets with an atmosphere is considered. The main structural elements, operating conditions and the possibility of controlling the atmospheric probe are described. Mathematical formulas for calculating the design characteristics and motion parameters of the probe in the atmosphere are presented. A comparative analysis of the “Vetrolyot” concept with modern international projects for studying the atmosphere of Venus is presented.

Keywords: kite, wind gradient, atmospheric probe, Venus, Vetrolyot, Vega, gliding flight, aircraft

REFERENCES

- [1] Broude B.G. *Vozdukhoplavatelnye letatel'nye apparaty* [Aircraft for aeronautics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 140 p.
- [2] Popov V.A., ed. *Entsiklopediya vozdukhoplavaniya i aviatsii* [Encyclopedia of aeronautics and aviation]. Moscow, Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya Publ., 2005, 720 p.
- [3] Korolev S.P., ed. *Aerodinamika letatel'nykh apparatov* [Aerodynamics of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2019, 564 p.
- [4] Popov V.A. *Istoriya aviatsii i vozdukhoplavaniya* [History of aviation and aeronautics]. Moscow, Voenizdat Publ., 1986, 480 p.
- [5] Krylov A.N. *Istoriya meteorologicheskikh nablyudeniy* [History of meteorological observations]. Moscow, Nauka Publ., 2012, 296 p.
- [6] Popov V.A. *Voennoe vozdukhoplavanie* [Military aeronautics]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2007, 328 p.
- [7] Duz' P.D. *Istoriya vozdukhoplavaniya i aviatsii v Rossii* [History of aeronautics and aviation in Russia]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 336 p.
- [8] Morozov I.V. *Alternativnye istochniki energii* [Alternative energy sources]. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2020, 412 p.
- [9] Sobolev D.A. *Istoriya vozdukhoplavaniya i aviatsii v SSSR* [History of aeronautics and aviation in the USSR]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 400 p.
- [10] Mikheev V.R. *Extremal'nye vidy transporta* [Extreme transport]. Moscow, Transport Publ., 2019.

- [11] Jones J.A. Innovative balloon buoyancy techniques for atmospheric exploration. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, vol. 7, pp. 397–402.
- [12] Petrov G.A. *Osnovy aerostatiki* [Fundamentals of aerostatics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015, 320 p.
- [13] Shavrov V.B. *Istoriya konstruktsey samoletov v SSSR do 1938 goda* [History of aircraft designs in the USSR until 1938]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002, 703 p.
- [14] Goroshko V.A., Danilov Yu.I. Vozdukhoplavanie v XXI veke: novye tekhnicheskies resheniya i zadachi [Aeronautics in the 21st century: new technical solutions and challenges]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal "Polyot" — All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*, 2021, no. 12, pp. 35–45.
- [15] Grumondz V.T. *Zolotoy vek dirizhabley* [The golden age of airships]. Moscow, Veche Publ., 2015, 384 p.
- [16] Grumondz V.T. *Perspektivnye letatelnye apparaty* [Advanced aircraft]. Moscow, Nauka Publ., 2020, 416 p.
- [17] Moskalenko G.M. *Mekhanika poleta v atmosfere Venery* [Flight mechanics in the atmosphere of Venus]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 232 p.
- [18] Vorontsov V.A., Malyshev V.V., Pichkhadze K.M. *Sistemnoe proektirovanie kosmicheskikh desantnykh apparatov* [System design of space landing vehicles]. Moscow, MAI Publ., 2021, 255 p.
- [19] Vorontsov V.A., Deryugin V.A., Karyagin V.P., Kremnev R.S., Kuznetsov V.V., Pichkhadze K.M., et al. Metod issledovaniya planety Venera s pomoschyu plavayuschikh aerostatnykh stantsiy. Matematicheskaya model [Research method for the planet Venus using floating balloon stations. Mathematical model]. *Kosmicheskoe issledovaniya — Cosmic Research*, 1988, vol. 26, iss. 3, pp. 430–433.
- [20] Linkin V.M., et al. The VEGA Venus Balloon Experiment. *Science*, 1986, vol. 231, pp. 1407–1408.
- [21] Berzhanovich V.V., Aleksandrov Yu.N., Andreev R.A., Armand N.A., Bakit'ko R.V., Blamon Zh., et al. Aerostatnyy eksperiment proekta "Vega": melkomashtabnaya turbulentnost' v srednem oblachnom sloe Venery [The Vega balloon experiment: small-scale turbulence in the middle cloud layer of Venus]. *Pisma v Astronomicheskiiy zhurnal — Astronomy Letters*, 1986, vol. 12, no. 1, pp. 46–52.
- [22] Andreev R.A., Altunin V.I., Armand N.A., Akim E.L., Bakitko R.V., Blamon Zh., et al. Aerostatnyy eksperiment proekta "Vega". Srednyaya skorost vetra v atmosfere Venery po doplerovskim izmereniyam aerostatnykh stantsiy [The Vega balloon experiment. Average wind speed in the atmosphere of Venus from Doppler measurements of balloon stations]. *Pisma v Astronomicheskiiy zhurnal — Astronomy Letters*, 1986, vol. 12, no. 1, p. 41.
- [23] Mikrin E.A., Lopota V.A., Filatov V.V., eds. *Avtomaticheskies kosmicheskies apparaty i kompleksey* [Automatic spacecraft and systems]. Moscow, Bauman Press, 2018, 576 p.
- [24] Vorontsov V.A., Lyubeznny B.V., Khmel D.S., Kiske Mendoza M.V., Shereemet A.A., Yatsenko M.Yu. Atmosfernye zondy dlya issledovaniya Venery [Atmospheric probes for the exploration of Venus]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2024, no. 4, pp. 144–150.
- [25] Vorontsov V.A., Polischuk G.M., Pichkhadze K.M. *Sposob upravleniya poletom issledovatel'skogo apparata v atmosfere planety* [Method of controlling research spacecraft in planet atmosphere]. Patent RU 2402467 C1 Russian Federation, applicant Lavochkin Association, JSC, appl. September 1, 2009, publ. October 27, 2010.

- [26] Sobolev I.A. Analiz proektnykh kharakteristik atmosferykh zondov zmeyskovogo tipa (vetrolyotov) dlya izucheniya atmosfery Venery [Analysis of design characteristics of kite-type atmospheric probes (vetrolyots) for studying the atmosphere of Venus]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 4, pp. 108–115.
- [27] Lyubeznny B.V., Vorontsov V.A. Analiz vozmozhnosti upravleniya dvizheniem planiruyushchego zonda v atmosfere Venery [Analysis of the possibility of controlling the motion of a gliding probe in the atmosphere of Venus]. In: *23-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Aviatsiya i kosmonavtika"* [23rd International Conference "Aviation and Cosmonautics"]. Moscow, November 18–22, 2024. Moscow, MAI Publ., 2024, pp. 204–205.
- [28] Vorontsov V.A., Kraynov A.M., Martynov M.B., Pichkhadze K.M., Khartov V.V. Predlozheniya po rasshireniyu programmy issledovaniy Venery s uchetom opyta proektnykh razrabotok NPO im. S.A. Lavochkina [Proposals for expanding the Venus exploration program based on the experience of design developments at Lavochkin Association]. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. Available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29449&eng=Y>.

Vorontsov V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor of Department 601 and Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: design of automatic spacecraft for deep space exploration; author of more than 300 scientific publications. e-mail: victor-vorontsov@yandex.ru Author ID: 840814

Lyubeznny B.V., Postgraduate Student, Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: design and motion simulation of atmospheric probes for the exploration of Venus. e-mail: laplandia2009@bk.ru. Author ID: 1235914

Ukrainskaya V.P., Student, Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: atmospheric probes for the exploration of Venus. e-mail: vitaukr3103@gmail.com