

Авторы:

Гривенко Анастасия Дмитриевна

Деркач Юлия Алексеевна

студенты группы СМ2-31 МГТУ им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель:

Лебедев Юрий Александрович

доцент кафедры химии МГТУ им. Н. Э. Баумана

кандидат технических наук

## Применение воздушных шаров

### для исследования планет Солнечной системы

*Аннотация. В наши дни многочисленные космические аппараты проводят всевозможные исследования планет Солнечной системы, передавая данные на Землю. В данной статье показано, что аэростаты, широко используемые на Земле, могут быть использованы также в качестве исследовательских инструментов при изучении некоторых небесных тел. Рассмотрена возможность применения аэростатов для исследования планет Солнечной системы, исходя из особенностей строения их атмосфер. Представлен исторический и теоретический материал по данной теме. Выведены формулы для расчета основных параметров подобных аэростатов. Сформулированы некоторые задачи исследования для небесных тел, в атмосферах которых возможно применение аэростатов. В результате анализа установлено, что такими небесными телами в Солнечной системе являются Венера и Титан. Описаны характеристики материалов и рабочего тела для аэростатов, предлагаемых для исследования этих планет Солнечной системы.*

Ключевые слова: первые аэростаты, аэростаты на других планетах, химия газов, химия композиционных материалов, исследование планет Солнечной системы, Венера, Титан.

## Введение

Изобретение воздушного шара открыло эру воздухоплавания. С появлением таких более совершенных летательных аппаратов, таких как самолеты, использование аэростатов должно было уйти в прошлое. Однако это не так, и в настоящей работе мы покажем, что сегодня аэростаты могут быть рассмотрены в качестве уникальных аппаратов для изучения атмосфер и поверхностей планет и спутников Солнечной системы.

Воздухоплавание до сих пор связано с космонавтикой. Еще в 1950-х годах автоматические стратостаты поднимали в верхние слои атмосферы маломощные ракеты, обеспечивая им достижение рекордных высот. В 1980-х годах советские аэростаты «Вега-1» и «Вега-2» осуществили дрейф в атмосфере Венеры, собрав ценные сведения о данной планете [1].

### Историческая справка. Первые воздушные шары

Первые упоминания о воздушных шарах относятся к 1830 году. Именно тогда Жозеф и Этьен Монгольфье запустили с Марсова поля первый известный воздушный шар, который поднимался за счет нагрева атмосферного воздуха. Создателем же первого шара, в котором использовался в качестве рабочего тела газ легче воздуха (водород), стал Жак Шарль [2].

Таким образом, возникли 2 вида воздушных шаров, которые летают в атмосфере Земли и сегодня: монгольфьеры и шарльеры, но предпочтение отдается аэростатам, подъемную силу которых обеспечивает газ, плотность которого меньше плотности атмосферы (водород или гелий).

Вышеперечисленные газы и сегодня обеспечивают подъемной силой дирижабли и метеозонды.

### Подъемная сила воздушного шара

Подъемная сила аэростата равна силе Архимеда, действующей на шар за вычетом силы тяжести, действующей на рабочий газ, и силы тяжести, действующей на оболочку шара. Из универсального газового закона следуют выражения для плотностей соответственно забортного и рабочего газов одинакового объема для монгольфьера:

$$\rho_{\text{атм}} = p \cdot M / (R \cdot T_A); \quad \rho_0 = p \cdot M / (R \cdot T_0)$$

Здесь  $\rho_{\text{атм}}$  — плотность атмосферного воздуха;  $\rho_0$  - плотность газа в оболочке;  $p$  – давление в атмосфере и оболочке;  $M$  – молярная масса газа;  $R$  – универсальная газовая

постоянная;  $T_A$  и  $T_0$  — абсолютная температура забортного воздуха и средняя абсолютная температура воздуха внутри оболочки, соответственно.

С учетом этого, нами были выведены формулы для подъемной силы монгольфьера ( $F_M$ ) и шарльера ( $F_{ш}$ ). Формула для монгольфьера имеет вид:

$$F_M = k_2 \times D^3 \times \rho_{атм} \times (1 - T_A/T_0) \times g - k_1 \times D^2 \times z \times \rho_M \times g \quad (1),$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от формы баллона;  $g$  - ускорение свободного падения на рассматриваемой планете;  $D$  - размер шара;  $\rho_M$  — плотность оболочки шара;  $z$  — толщина оболочки баллона аэростата.

Формула для подъемной силы шарльера ( $F_{ш}$ ):

$$F_{ш} = k_3 \times D^3 \times g \times (\rho_{атм} - \rho_0) - k_4 \times D^2 \times z \times \rho_M \times g \quad (2),$$

где  $k_3$  и  $k_4$  — коэффициенты, зависящие от формы баллона.

Подъемная сила шара типа шарльера растет как куб его размера, в то время как вес шара растет как квадрат размера. Иными словами, при достаточно большом размере шара, его подъемная сила превзойдет вес полезной нагрузки. В случае монгольфьера подъем осуществляется при повышении температуры газа в оболочке шара. При обеспечении достаточного нагрева подъемная сила шара также превзойдет вес полезной нагрузки.

### **Строение воздушного шара и его полезная нагрузка**

Рассмотрим основные элементы структуры космических аппаратов для исследования планет. Практически все современные космические аппараты строятся на основе двух составных частей: модуля служебных систем (МСС) и модуля полезной нагрузки (МПН).

К МПН, помимо чисто научной аппаратуры, относятся датчики системы индикации положения аппарата в пространстве, а также антенны.

Что касается МСС воздушного шара, то размещение на нем двигательной установки превратило бы его в воздушный корабль, но сделало бы шар слишком тяжёлым, энергоёмким и дорогим для отправки на другую планету.

Для управления аэростатом было предложено использовать планер, который висит на привязи и позволяет управлять шаром, используя разность скорости воздушных потоков на разных высотах.

Для питания электроники можно использовать солнечную энергию, установив на аэростат специальные панели. Также в качестве источника питания можно использовать РИТЭГ (радиоизотопный термоэлектрический генератор) — радиоизотопный источник

электроэнергии, использующий тепловую энергию, выделяющуюся при естественном распаде радиоактивных изотопов и преобразующий её в электроэнергию с помощью термоэлектрогенератора [3,4].

Научная аппаратура для аэростата зависит от конкретных задач миссии.

### **Аэростаты на планетах Солнечной системы**

При оценке возможности использования аэростатов для исследования той или иной планеты необходимо, в первую очередь, учитывать особенности ее атмосферы.

Атмосферы газовых гигантов практически полностью состоят из водорода и гелия [5]. Это делает невозможным использования на этих планетах аэростатов типа шарльеров. Однако следует изучить возможность использования на данных планетах монгольфьеров, подъемную силу которых будет обеспечивать нагрев местных атмосферных газов. Атмосфера Марса на 96% состоит из углекислого газа, однако ее плотность в 100 раз меньше плотности атмосферы Земли. Сильная разреженность атмосферы резко ограничивает массу полезной нагрузки аэростата, так как не может обеспечить достаточную подъемную силу. Таким образом, наиболее вероятными планетами для изучения с помощью аэростатов являются Венера, а также спутник Сатурна – Титан. Они обладают достаточно плотной атмосферой, а газовый состав атмосфер этих планет позволяет использовать водород или гелий в качестве рабочего тела для аэростата.

### **Исследование Венеры**

Сотрудниками РАН были выделены наиболее важные задачи исследования Венеры, ждущие своего решения [6]

1. Необходимо изучать тепловой баланс атмосферы, состав, строение и состав облачного слоя, динамику, термическую структуру атмосферы;

- Для понимания природы парникового эффекта необходимо провести исследования облачного слоя и поддерживающих его химических циклов;
- Для выяснения ранней истории атмосферы Венеры требуется провести измерения изотопов ксенона;
- Требуется определить роль облаков в процессе диссипации воды;
- Необходимо оценить потоки нейтральных атомов для изучения климатических изменений на планете.

Для исследования Венеры необходимо создать аэростат, способный маневрировать, менять высоту, приближаться к поверхности, совершать на некоторое время посадку и снова подниматься в атмосферу.

Проект такого аэростата был предложен советским конструктором Москаленко [7]. Рабочим телом для данного аэростата будут пары воды и аммиака. Под действием высоких температур у поверхности Венеры эти жидкости будут превращаться в пар. Таким образом, изменение температуры с высотой позволит менять высоту подъема аэростата. Москаленко предложил использовать в качестве основного рабочего тела для венерианского аэростата аммиак, а побочного – воду. Согласно его идее, аммиак позволил бы аэростату подняться на высоту 100 км, постоянно оставаясь в газообразном состоянии. Однако более подробный анализ физических свойств аммиака и воды показал, что при спуске ниже отметки 40 км над поверхностью Венеры аммиак начнет переходить в состояние сверхкритической жидкости. Здесь основным рабочим телом станут пары воды. Однако и у нее есть ограничения. При спуске ниже отметки 11 км над поверхностью вода также начнет переходить в состояние сверхкритической жидкости. Однако диапазона исследования 11-100 км над поверхностью вполне достаточно для решения поставленных задач.

В реальности же в качестве рабочего газа для венерианских аэростатов чаще всего предлагают гелий, как в отечественных аппаратах 1984 года "Вега", до сих пор остающихся единственными реализованными инопланетными аэростатами. Теоретически целесообразно использовать и водород.

С учетом условий венерианской атмосферы, для исследования верхних слоев атмосферы подойдет оболочка из полиэтилена, устойчивая против воздействия серной кислоты. В средних слоях подходит тефлон, а в высокотемпературных нижних слоях – каптон (термостойкая полиимидная пленка).

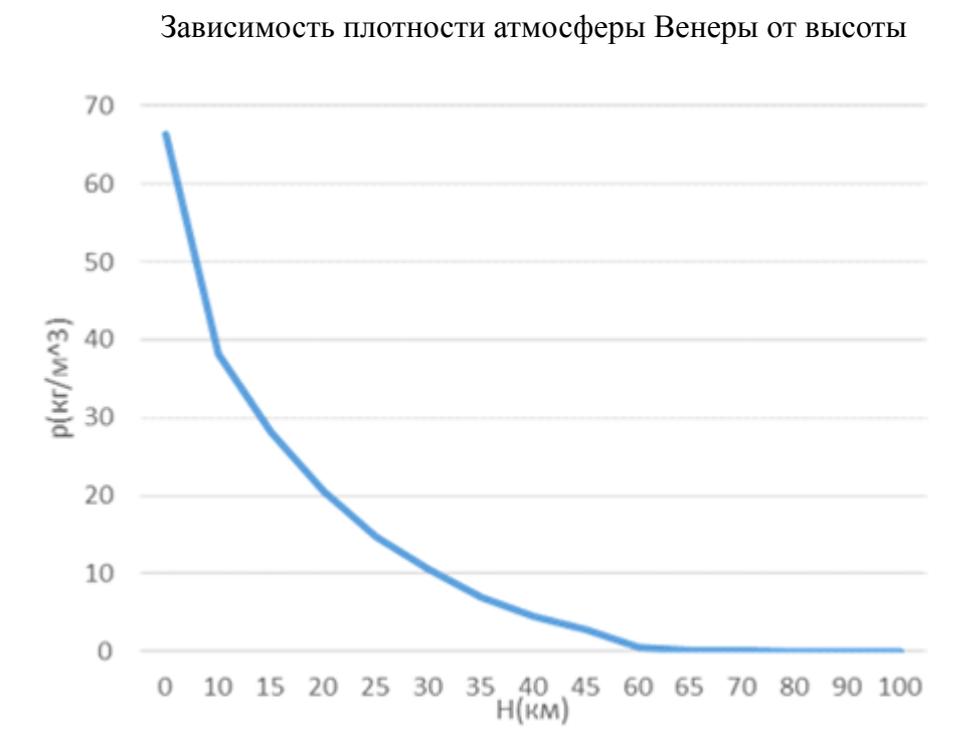
*Таблица 1*

Эксплуатационные температуры полиэтилена, тефлона и каптона:

	Полиэтилен	Тефлон	Каптон
Эксплуатационная температура	-70°C ..+80°C	-60°C .. +260°C	-273°C ..+400°C

В качестве источника питания для аппаратуры в зависимости от высоты дрейфа аэростата можно использовать солнечные панели или радиоизотопный термоэлектрический генератор.

Исходя из построенного нами на основании данных [8] графика зависимости плотности атмосферы Венеры от высоты можно рассчитать диаметр баллона для дрейфа на заданной высоте.



*Рисунок 1*

Например, на высоте 50 км плотность атмосферы 2 кг/м<sup>3</sup>. Масса гондолы 7 кг. (такую массу имела гондола аэростата Вега). Используя формулу (2), при условии использования в качестве рабочего тела гелия с плотностью  $\rho_{\text{He}} = 0,18$  кг/м<sup>3</sup> для сплюснутого сфероида с  $k_1=0,262$ ;  $k_2=2,167$  ( $H/D=1/2$ , H-высота, D-диаметр) [9] и материала оболочки – тефлон с  $\rho_M=2200$  кг/м<sup>3</sup> и  $z=630$  мкм получим диаметр баллона 6,6 м.

### Исследование Титана

Теперь перейдем к описанию возможного устройства аэростата для исследования Титана в соответствии со стоящими задачами.

Задачи исследования Титана: [10]

- Необходимо провести исследования возможных времен года, погоды, а также наблюдения за извержением газа и жидкости из недр, выпадением осадков в виде дождей или снега;
- Необходимо ответить на вопрос: существует ли жизнь на Титане? Ведь органического вещества для построения организмов и пищи для них более чем достаточно. Все это указывает на то, что предпосылки для развития жизни на спутнике Сатурна существуют;
- Требуется изучить параметры парникового эффекта.

Титан является единственным спутником в Солнечной системе, имеющим атмосферу, причем плотность атмосферы на Титане выше, чем на Земле, вследствие этого давление на уровне поверхности превышает земное в 1.5 раза.

Баллон типа монгольфьера заполнялся горячими продуктами горения атмосферного метана в окислителе, привезенном с Земли. Базовым окислителем был выбран тетраоксид азота  $N_2O_4$ . Также возможно заменить тетраоксид азота на жидкий кислород или какое-либо однокомпонентное топливо.



Тetraоксид азота используется как окислитель в ракетной технике, но применение его на Титане, при глубоких отрицательных температурах ( $-200^{\circ}C$  и ниже), вызывает вопросы.

При этом рабочим телом также может быть гелий. Гелиевый шарльер большого размера должен разворачиваться со спускаемого аппарата и дрейфовать. При наличии узла испарения и конденсации аргона или смеси из двух либо более компонентов: кислорода, азота, двуокиси углерода и аргона были бы возможны управляемые вертикальные перемещения.

В литературе была предложена концепция аэровера: дирижабля-вездехода с двигательной установкой внизу для поверхностных перемещений со скоростью до 2 м/сек. и двумя 20-ваттными пропеллерами для полётов. Вертикальные перемещения в амплитуде 10 км возможны также за счёт нагрева и охлаждения гелия в сигарообразном баллоне переменного сечения. [4,9]

В последние годы учеными NASA предлагалось использование квадрокоптера, который будет запускаться с аэростата [11]. Но данный проект пока лишь на стадии разработки.

Атмосфера Титана не способна пропустить достаточное количество солнечного света (желтая дымка присутствует практически на всех высотах), поэтому применение

солнечных батарей (как это возможно на Венере) неэффективно. Вместо этого предлагается использование РИТЭГа, как основного источника электропитания.

Оболочка шара должна выдерживать низкие температуры и не взаимодействовать с углеводородами в атмосфере. Целесообразным будет использование каптона, кевлара или майлара, которые способны выдержать экстремально низкие температуры на поверхности Титана.

### **Заключение**

Таким образом, подобрав необходимый материал для оболочки воздушного шара, форму баллона, рабочий газ, научную аппаратуру, источник питания для нее, а также, при необходимости, дополнительные устройства для маневрирования, с помощью аэростатов можно осуществлять практически все виды необходимых исследований Венеры и Титана. По нашему мнению, в будущем аэростаты найдут широкое применение в исследовании планет Солнечной системы.

В результате работы нами были сделаны следующие выводы:

1. Аэростаты могут быть использованы для исследования атмосфер и поверхностей некоторых планет.
2. Данный тип исследовательских инструментов выигрывает в сравнении со спутниками и марсоходами, т.к. диапазон работы аэростата – вся планета, в то время как спутник не может достаточно приблизиться к поверхности планеты, а деятельность аппарата типа марсохода сосредоточена вокруг посадочной площадки.
3. В Солнечной системе аэростаты могут быть использованы для изучения Венеры и спутника Сатурна – Титана.
4. Наличие положительного опыта запуска аэростата в атмосфере Венеры подтверждает целесообразность создания аппаратов такого типа, для чего могут быть использованы знания, полученные при эксплуатации аэростатов “Вега-1” и “Вега-2”.

### **Список литературы**

1. Долгополов В.П., Пичхадзе К.М., Суханов К.Г. *Проект «ВЕГА» – космическая экспедиция к Венере и комете Галлея* // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2011. № 5. С. 41-50.
2. Храмов Ю.А., Шарль, Жак Александр Сезар // Физики: Биографический справочник / Под ред. [А. И. Ахиезера](#). — Изд. 2-е, испр. и дополн. — М.: [Наука](#), 1983. — С. 297. — 400 с.

3. Лазаренко Ю.В., Пустовалов А.А., Шаповалов В.П. *Малогабаритные ядерные источники электрической энергии*. М.: Энергоатомиздат, 1992. 207 с.
4. Pustovalov A.A., Pankin M.I., Prilepo Yu.P., Rybkin N.N., Sinyavsky V.V. *Prospects and problems of development of the space application radioisotope thermoelectric generators (RTG) based on americium-241* // XVI International Forum on Thermoelectricity, abstract. 19–22 May 2015, Paris
5. Олег Кусков, Вера Дорофеева, Виктор Кронрод, Андрей Макалкин, *Системы Юпитера и Сатурна. Формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников*, издательство «ЛКИ», 2009 г.
6. Засова Л. *Венера: Изучение продолжается*. URL:<https://goo.gl/gjQRXg> (дата обращения 20.03.2017).
7. Москаленко Г. Аэростат в атмосфере Венеры. *Авиация и космонавтика*, 1973, № 10, с. 34–35.
8. Lebonnois S., Schubert G. The deep atmosphere of Venus and the possible role of density-driven separation of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>. *Nature Geoscience*, 2017, no.10, pp. 473-477. URL: <http://www.nature.com/articles/ngeo2971>. doi:10.1038/ngeo2971 (дата обращения 07.07.2017).
9. Шиховцев Е. Б. *Аэростаты на других планетах*. URL: <http://mir.k156.ru/scitech/exo-aerostats.html> (дата обращения 25.04.2017).
10. Колпытин А.В. *Спутник Сатурна Титан – далекий двойник Земли*. URL: <https://goo.gl/snw5Gn> (дата обращения 23.04.2017).
11. *NASA планирует отправить на Титан квадрокоптер*, NAKED SCIENCE, №32, сентябрь-октябрь, 2017, <https://naked-science.ru/article/sci/nasa-wants-to-send-a-quadcopter-drone-to-titan>