

УДК 621.384.6

Оценка параметров стратосферного ионного двигателя

Рожковский О.И., к.т.н., доц. Цыбульский Л.Ю.

Проведена аналитическая оценка возможности использования аргона из воздуха для топлива ионного двигателя, предназначенного для работы в условиях стратосферы. Рассмотрены различные режимы эксплуатации ионного двигателя при изменении погодных условий и высоты барражирования.

Ключевые слова: стратосфера, дирижабль, ионный двигатель

Введение

Ионные двигатели относятся к классу электрических реактивных двигателей. Их отличительная особенность – источник энергии и рабочее вещество разделены, а передача энергии от источника к рабочему веществу осуществляется с помощью электромагнитных взаимодействий. Это позволяет получить высокие скорости истечения рабочего вещества и делает эти двигатели наиболее экономичными в космосе и стратосфере

Ионные двигатели рассматриваются как наиболее перспективные двигатели длительной эксплуатации в условиях стратосферы. Использование молекул воздуха в качестве рабочего вещества, а солнечного излучения – источника энергии, устраняет множество

ограничений на использование ионных двигателей для управления летательными аппаратами в нижней стратосфере – на высоте 18-22 км. На рис.1 приведена схематически конструкция дирижабля с воздухозаборником для ионного двигателя.

Воздух содержит 0,934% по объёму молекул аргона. В отличие от кислорода и азота, молекулы аргона химически инертны и тяжелее них: $O \sim 16$, $N \sim 14$, $Ar \sim 40$ а.е.м. ($6,63 \cdot 10^{-26}$ кг.). Инертность молекул Ar снимает значительные конструктивные и экологические ограничения на разработку и эксплуатацию ионного двигателя в условиях стратосферы. Возникает задача эффективного выделения из воздуха атомов аргона в количестве достаточном для создания необходимой тяги двигателя.

Методы сортировки газа на молекулы различного сорта различаются по физической природе процессов: – механические; – масс-спектрометрические; – адсорбционные; – конденсационные; – мембранные; – лазерные (атомная оптика), и прочие. В свою очередь, они разделяются на методы технической реализации сортировки молекул. Комбинацией

перечисленных методов возможно сортировка молекул воздуха по массе и энергиям.

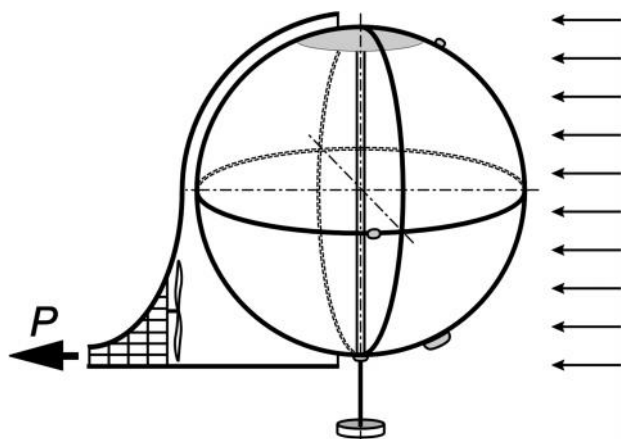


Рис. 1. Конструкция дирижабля с воздухозаборником и двигателем

1. Условия нижней стратосферы

В условиях стратосферы наиболее перспективным летательным аппаратом является дирижабль. Характерные размеры стратосферного дирижабля, для обеспечения подъёмной силы, составляют 100 м. С учётом отсутствия в стратосфере турбулентностей, весь воздух, падающий на поверхность дирижабля, может быть использован для извлечения аргона. Среднегодовая скорость ветра на широте Киева и высоте 20 км не превышает 10 м/с, при максимальной скорости в августе 25 м/с. Потoki воздуха в стратосфере строго ламинарные, скорость изменяются плавно с периодом в год [1].

2. Оценка ресурса рабочего вещества

Молекулярная концентрация воздуха на высоте 20 км составляет n

$=4,05 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ [2]. При скорости воздуха $v=10 \text{ м/с}$ на поверхность шара диаметром $R=50 \text{ м}$ за секунду ветер будет приносить

$$N = \frac{0,934}{100} n \cdot v \cdot \pi R^2 = 2,97 \cdot 10^{27} \quad (1)$$

молекул аргона. Что составляет 4,9 кмоль.

Массовая доля молекул аргона составляет 1,292 %. Таким образом, если выделенный из воздуха аргон ускорить в $100/1,292=77,4$ раз, он создаст такой же импульс, как и падающий на дирижабль ветер. Тем самым решается задача привязки дирижабля к географической координате. Для перемещения навстречу ветру необходимо увеличивать скорость выталкивания молекул из двигателя.

Оценим энергетические параметры.

Напряжение для разгона ионов аргона определяется законом Ньютона:

$$ma = qE,$$

где $a = v - v_0$ – ускорение иона, v и v_0 – конечная и начальная скорости; $E = \phi / d$ – напряжённость ускоряющего поля, ϕ – потенциал ускоряющего электрода двигателя, d – перемещение иона при ускорении. Если принять скорость на выходе равной 1000 м/с, начальную скорость нулевой, а перемещение иона при ускорении 1 м, то ускоряющий потенциал составит $\phi = mvd / q = 4,14 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

Ионы ускоряются в плоском зазоре, который представляет из себя система ускорения ионного двигателя. Тогда время ускорения составит

$$\tau = d \sqrt{\frac{2m}{q\phi}} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Если все молекулы аргона ионизировать то ток составит

$$I = qN / \tau = 3,36 \cdot 10^{10} \text{ А.}$$

А мощность системы ускорения составит $P = IU = 1,393 \cdot 10^8$ Вт, что находится на уровне мощности современного реактивного двигателя. Учитывая, что дирижабль может нести солнечные элементы большой площади, необходимая мощность может быть получена.

На рис.2 представлена конструкция дирижабля с солнечным "парусом".

Для длительной эксплуатации ионного двигателя желательно снижать плотности тока, который влияет на скорости эрозии ускоряющих электродов. Габариты дирижабля позволяют изготавливать выходное сопло двигателя больших размеров. При радиусе сопла $r=5$ м и ускоряющем потенциале $\phi=5$ кВ плотность тока составит

$$i = \frac{P}{U\pi r^2} = 354,675 \text{ А/м}^2 = 35,4675 \text{ мА/см}^2.$$

Такая плотность тока соответствует эксплуатационным параметрам современных двигателей.

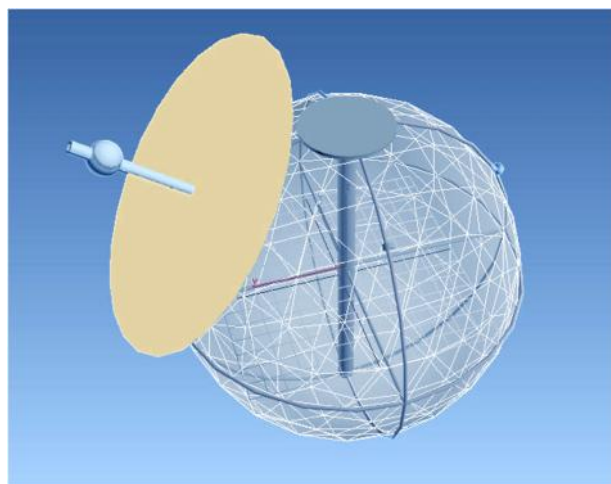


Рис. 2. Конструкция дирижабля с солнечным "парусом"

Проведенная оценка показывает возможность использование аргона из воздуха для ионного двигателя дирижабля.

Оценим количество молекул, падающих на поверхность дирижабля в отсутствии ветра. Температура воздуха на высоте 20 км составляет $T = 217$ К [2].

Объем газа, ударяющийся о единицу поверхности в единицу времени [3]:

$$V_q = N_q / n = v_{ap} / 4,$$

где N_q – частота соударений молекул газа о поверхность, v_{ap} – среднеарифметическая скорость молекул, равная

$$v_{ap} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} v dn_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 398,6 \text{ м/с,}$$

где k – постоянная Больцмана, m – масса молекулы воздуха, равная $4,8 \cdot 10^{-26}$ кг. Соответственно

количество падающего воздуха на 1 м^2 составит

$$V_q = v_{ap} / 4 = 99,645767 \text{ м}^3/\text{с м}^2.$$

На поверхность шара диаметром 100 м будет падать

$$N = \frac{0,934}{100} n \cdot 4\pi R^2 =$$

$$= 1,188 \cdot 10^{27} \text{ мол},$$

в 2,5 раза меньше чем при ветре 10 м/с.

Для управления полётом стратосферного дирижабля планируется использовать различное направление ветра на разных высотах в пределах стратосферы. При этом будем изменяться давление воздуха, температура и скорость ветра. Двигатель в таких условиях будет работать в различных режимах, система ускорения ионов будет потреблять различную мощность. Плотность тока и ускоряющие напряжения будут так же постоянно изменяться.

На рис.3 приведены графики зависимости мощности ускорителя от молекулярной концентрации воздуха и скорости ветра v (м/с). Молекулярная концентрация зависит от высоты полёта дирижабля. Тем самым, графики отражают зависимость электрической мощности, расходуемой ускоряющим электродом ионного двигателя от положения в стратосфере.

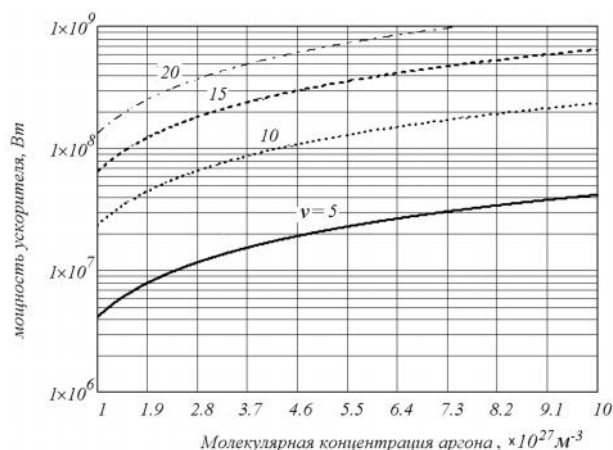


Рис. 3. Зависимость мощности ускорителя от молекулярной концентрации воздуха и скорости ветра v (м/с)

На Рис. 4 На рис.3 приведены графики зависимости плотности тока ионного двигателя от молекулярной концентрации воздуха и скорости ветра v (м/с).

Приведенные расчёты и графики показывают, что для управления дирижаблем необходимы значительные мощности.

3. Источник энергии для двигателя

Для защиты оболочки дирижабля рационально покрыть его плёночными солнечными элементами. Но это недопустимо увеличивает массу дирижабля. Применение солнечных элементов, размещённых на диске, так же позволяет защитить оболочку. Диск диаметром 100 м имеет площадь 7854 м^2 . В стратосфере солнечное излучение интенсивнее в три раза, чем на земле и отсутствуют облака. Современные солнечные элементы позволяют получать на земле 200 Вт/м^2 , соответственно в стратосфере они могут отдавать 600 Вт/м^2 . Общая

мощность такой электростанции получается 4,7 МВт, что значительно меньше необходимой мощности.

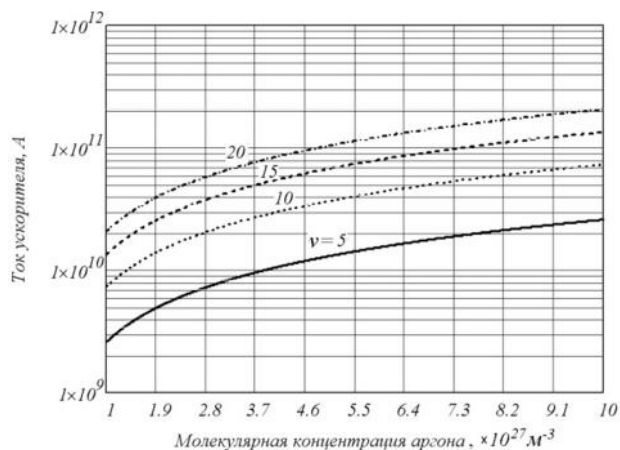


Рис. 4. Зависимость тока ионного двигателя от молекулярной концентрации воздуха и скорости ветра v (м/с)

Для решения проблемы надо повышать эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую и увеличивать площадь сбора энергии.

Также можно использовать маневрирование по высоте. Перемещая дирижабль по вертикали, можно "ловить" нужный ветер и возвращать его в район барражирования.

Для маневрирования ночью необходимо накапливать топливо в баллонах высокого давления. Таким топливом может послужить водород получаемый гидролизом из воды. При температуре -56°C на поверхности дирижабля будет конденсироваться вода. На солнце вода будет таять и стекать вниз дирижабля, где возможна её утилизация для получения водорода. Оценить количество воды в стратосфере проблематично.

Источником воды в стратосфере является солнечный ветер, приносящий протоны, которые, долетая к стратосфере, становятся атомами водорода. Солнечный ветер в сторону Земли характеризуется непостоянством, что приводит к непостоянству количества воды в стратосфере.

4. Отбор аргона из воздуха

Молекулы, входящие в состав воздуха, имеют различные энергии ионизации:

Ar – 1519,6 кДж/моль (15,76 эВ);

N – 1401,5 кДж/моль (14,53 эВ);

O – 1313,1 кДж/моль (13,61 эВ).

К тому, же для разделения молекул азота и кислорода затрачивается энергия диссоциации связей:

N_2 – 942,9 кДж/моль (9,78 эВ);

O_2 – 493,57 кДж/моль (5,12 эВ).

Разница в энергии ионизации молекул воздуха позволяет разделить газы в узле ионизации двигателя.

Для определения полной мощности ионного двигателя необходимо оценить затраты мощности на ионизацию рабочего газа.

За секунду необходимо ионизировать 4,9 кмоль аргона. Энергия ионизации аргона 422,1 Вт·час/моль. Необходимая энергия для ионизации такого количества составит:

$$4,9 \cdot 10^3 \cdot 422,1 = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{час}.$$

Эта большая мощность является незначительной долей в общей потребности мощности.

Выводы

Предложена методика оценки применения ионного двигателя для управления полётом стратосферного дирижабля. Расчёты показывают возможность использования аргона из воздух в качестве рабочего вещества, а солнечного излучения в качестве источника энергии. Хотя для реализации такого проекта, необходимо решить ряд сложных конструктивных задач: дирижабль должен нести солнечный "парус" в два раза больше собственного диаметра, а эффективность преобразования

солнечной энергии необходимо увеличить в 5 раз.

Литература

1. Атмосфера .Справочник . под. ред. О. В. Лапина, О. Д. Рейнгерц. – Л. Гидрометеиздат. – 1991. – 509 с.
2. ISO 2533–75.
3. Розанов Л. Н.Вакуумная техника: Учеб. для вузов. – 2-е изд.,. – М.: Высш. шк. 1990. – 320 с.