

Баканов И. П.

## Импульсный электрохимический детонационный двигатель

### Введение

Большинство задач, ранее решавшихся аппаратами весом в сотни и тысячи килограмм, в скором будущем возьмут на себя “кубсаты” – малые и сверхмалые ИСЗ, состоящие из типовых блоков, “юнитов”: 1U, 6U, 12U. В настоящее время активно ведутся разработки компактных, лёгких и безопасных двигателей с высоким полным импульсом для малых космических аппаратов. Как и прочие системы космических аппаратов, двигатели имеют ряд технических требований, определяющих их работоспособность в космических условиях. К ним относятся: топливо, допускающее длительное хранение в космосе, возможность многократного включения-выключения, изменения величины тяги в широких пределах, устойчивость рабочих процессов и т. д.

Импульсный детонационный двигатель (ИДД) – тип двигателя, в котором горение смеси горючего и окислителя происходит путём детонации. Такой двигатель является импульсным, поскольку после прохождения детонационной волны требуется обновление топливной смеси для следующего включения.

В предлагаемом варианте ИДД топливная смесь (гремучий газ – смесь водорода и кислорода в объемном отношении 2:1) вырабатывается в процессе работы двигательной установки и является продуктом реакции электролиза – процесса разложения вещества (электролита) электрическим током. Данная концепция позволяет избежать рисков, связанных с транспортировкой, хранением и эксплуатацией взрывоопасных веществ и криогенных топливных компонентов в течение всей миссии КА от запуска до начала работы на целевой орбите. Далее буду называть рассматриваемый тип двигателя импульсным электрохимическим или сокращенно ИЭД.

### Часть I. Механика орбитального движения ИСЗ

Рассмотрим основные причины, снижающие орбиту ИСЗ. Это действие экваториального утолщения Земли и сопротивления атмосферы. Причем стабилизация КА и коррекции траектории, связанные с влиянием атмосферы, как правило, незначительные по энергозатратам в отличие от маневров смены орбиты с изменением высоты или наклона начальной орбиты.

Орбитальное маневрирование совершается либо двигателями большой тяги, как правило, ЖРД, либо двигателями малой тяги: плазменными, ионными, реже электродуговыми или электровзрывными.

Для дальнейших расчетов примем, что наш двигатель создает кратковременные импульсы и практически мгновенно меняет скорость аппарата.

Переход с одной орбиты на другую происходит по Гомановской траектории. Для поднятия высоты орбиты спутнику необходимо сообщить два импульса, два приращения скорости. Изменение скорости КА, необходимое для выполнения орбитального манёвра, называется характеристической скоростью и обозначается  $\Delta v$ .

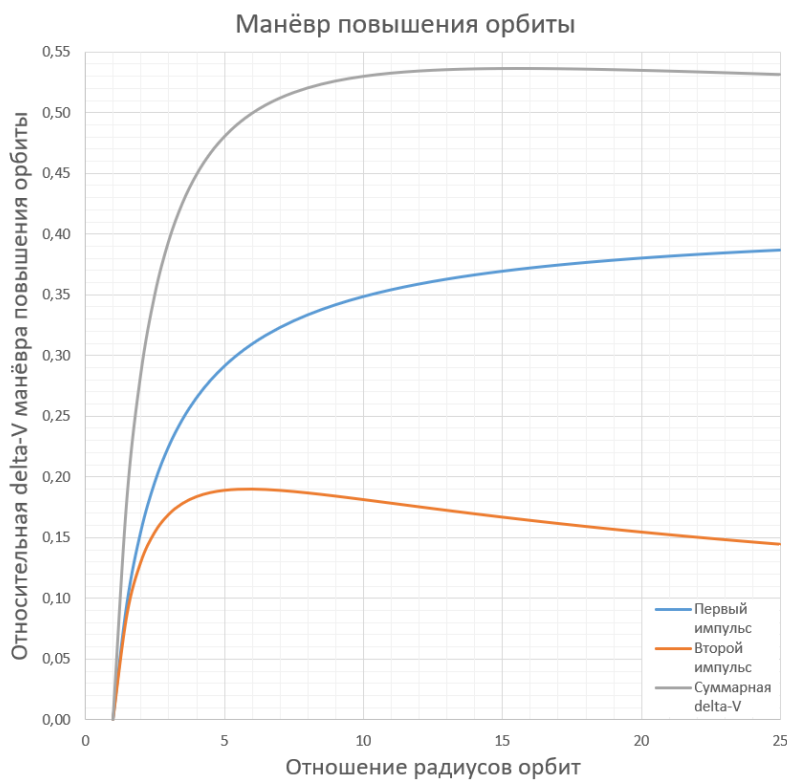


Рис. 1. График характеристической скорости

Горизонтальная скорость движения по околоземной орбите высоты  $H$  вычисляется по формуле:

$$v = \sqrt{g_H(R_3 + H)} = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + H}}$$

(ф. 1)

К примеру, для поднятия высоты орбиты с 200 км до 500 км, потребуется суммарное приращение скорости, равное приблизительно 0,03 от начальной скорости (см. график).

Рассмотрим некоторые характеристики спутника формата CubeSat 12U, которые понадобятся в дальнейшем:

*Максимальная масса с полезной нагрузкой, кг: 24*

*Емкость аккумуляторной батареи (АКБ), Вт\*ч: 120*

*Максимальный ток АКБ, А: 10*

*Пиковая мощность, выделяемая на ФЭП (фотоэлементах), Вт: 50*

Подставляя  $m = 24$  кг и  $\Delta v = 234$  м/с,  $\Delta p = m\Delta v = 5616$  Н\*с – суммарный импульс, который необходимо сообщить спутнику CubeSat 12U для поднятия высоты орбиты с 200 км до 500 км.

## **Часть II. Расчет параметров двигательной установки**

Рассмотрим процессы, происходящие за один цикл работы ДУ:

1. Накопление горючей смеси под давлением, не превышающем давление самовоспламенения, в электролизере
2. Выпуск газовой смеси электромагнитным клапаном в патрубок, ведущий к сопловому каналу
3. Проход газовой смеси через огнепреградительный клапан (сопло).  
Примечание: клапан должен обладать высокой пропускной способностью.
5. Воспламенение смеси свечой накаливания или другим воспламеняющим устройством
6. Направленный взрыв придает импульс спутнику. Ударную волну принимает параболический купол. Поскольку “купол” должен обладать достаточной прочностью и жесткостью, для его изготовления можно использовать композиционные материалы (стеклопластик, углепластик), которые, в отличие от металлов, обладают высокими прочностными и другими физико-механическими характеристиками при меньшей массе.

## Импульсный электрохимический детонационный двигатель

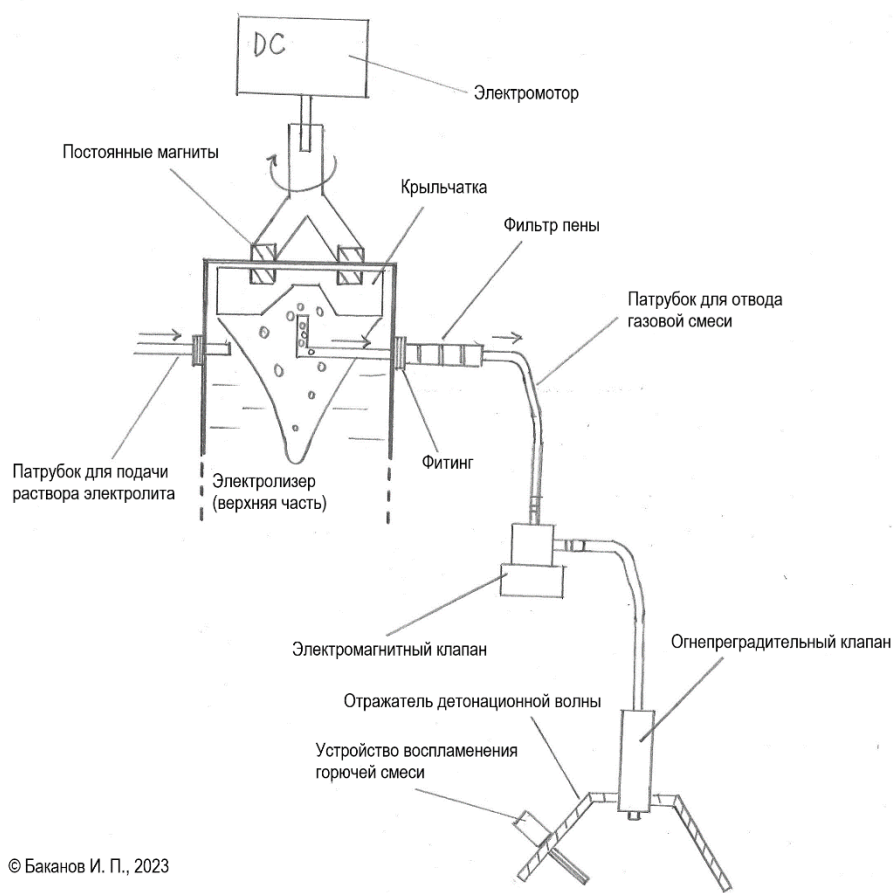


Рис. 2. Схематическое изображение двигателя

Электроэнергия вырабатывается солнечными панелями и накапливается в АКБ. Основными потребителями электроэнергии являются (по убыванию):

- Электролизер мощностью 50 Вт – 1кВт
- Модуль управления ДУ
- Воспламеняющее устройство
- Электромагнитный клапан

Далее рассчитаем полный импульс, сообщаемый КА при однократном включении двигателя:

$$I_{\text{пол}} = m_{\text{г}} * w + J$$

(ф. 2)

$i = m_{\text{г}} * w$  – импульс реактивной силы;

$m_{\text{г}}$  – масса газов;

$w$  – средняя скорость истечения.

Заметим, что основной вклад в разгон аппарата вносит импульс, сообщаемый ударной волной  $J \gg i$ . Импульс ударной волны зависит от давления  $P$  продуктов детонации, времени  $t$  воздействия ударной волны и площади  $S$  поверхности, воспринимающей ударную волну. Считая давление постоянным, импульс ударной волны можно выразить следующим образом:

$$J = P * S * t$$

(ф. 3)

В первом приближении  $S = 2\pi r_k^2$  – площадь полусферы,  $r_k \approx 0,5$  м.

Далее, из уравнения Менделеева-Клапейрона получаем:

$$P = \frac{m_{\Gamma}}{M_{\text{смеси}} * V} RT_{\text{кр}}$$

(ф. 4)

$M_{\text{смеси}} = 12$  г/моль – молярная масса газовой смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ;

$V$  – объем газовой смеси, выработанной за один цикл;

$T_{\text{кр}} = 783$  К – температура самовоспламенения газовой смеси;

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} * \text{К}}$  – универсальная газовая постоянная.

После подстановки ф.3 в ф.2 полный импульс тяги равен:

$$I_{\text{пол}} = m_{\Gamma} * w + \frac{m_{\Gamma} * S * t}{M_{\text{смеси}} * V} RT_{\text{кр}}$$

(ф. 5)

Массу газов приближенно вычислим по формуле  $m_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} V[\text{л}] * 10^{-3}$ ,

$\rho_{\Gamma} = \rho_{\text{возд.норм}} * \frac{M_{\Gamma}}{M_{\text{возд}}} \approx 0,53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  – плотность газовой смеси при нормальных условиях.

Заметим, что  $w \sim \frac{P_{\text{э}}}{d_{\text{кр}}}$ , где  $P_{\text{э}}$  – давление в электролизере,  $d$  – критического сечения.

Чем выше давление в электролизере, тем, экономичнее проходит электролиз и тем выше скорость истечения и, соответственно, импульс реактивной тяги. Поэтому повышая давление в электролизере мы увеличиваем удельный импульс – показатель эффективности двигателя.

Если подставить в ф. 5  $w = 10$  м/с,  $V = 1$  л,  $t = 0,1$  с, полный импульс окажется равным  $45 \text{ Н} * \text{с}$ . Выполнить маневр смены орбиты вряд ли удастся, однако

поддерживать высоту текущей орбиты возможно. К примеру, для поднятия высоты орбиты с 200 км до 201 км спутнику CubeSat 12U потребуется суммарный  $\Delta p \approx 15 \text{ Н} \cdot \text{с}$ . Изменяя расход топливной смеси, можно регулировать импульс двигателя.

### **Часть III. Электролизер.**

#### **Мощность, производительность, активная площадь**

Электролизер – центральная часть импульсного электрохимического двигателя, которая является и самой трудоемкой в реализации. Рассмотрим процессы, протекающие в электролизере, и сформулируем технические сложности, связанные с его проектированием, и возможные пути решения.

Великий физик-экспериментатор Майкл Фарадей провел фундаментальные исследования электролитов и открыл законы, в которых говорится, что количество химических превращений связано с электрическим током. Таким образом, при электролизе масса превращенного вещества прямо пропорциональна количеству электричества, прошедшего через электролитическую ячейку. Второй закон гласит, что при прохождении через электролит одного и того же количества электричества масса превращенного вещества зависит от массы и заряда ионов вещества. Грубо говоря, химические свойства токопроводящей среды тоже влияют на образование продуктов реакции.

Экспериментально установлено, что в среднем 1кВт электроэнергии дает скорость генерации горючего газа 10 литров в минуту. Чтобы электролизер работал в оптимальном режиме, без образования пара и без перегрева, на каждые 1 кВт мощности требуется активная площадь  $1 \text{ м}^2$  (суммарная площадь пластин, задействованных в реакции).

Таким образом, эмпирическое соотношение скорости генерации, мощности и активной площади для щелочных электролизеров постоянного тока:

$$10 \text{ л/мин} \approx 1 \text{ кВт} \approx 1 \text{ м}^2$$

(ф. 6)

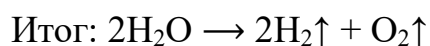
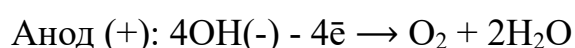
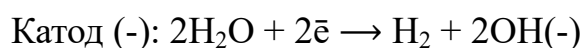
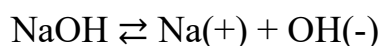
Также установлено, что оптимальное напряжение ячейки составляет 2 В. Повышение напряжения приводит к нагреву и повышению энергозатрат.

Если питать электролизер от АКБ напряжением 12 В, то оптимальное количество ячеек составит 6. Соответственно пластин получается 7, т. к. внешние стороны крайних пластины не участвуют в реакции.

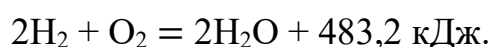
Один квадратный метр поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению солнечных лучей на орбите Земли, воспринимает 1,32–1,41 кВт. В действительности преобразование энергии в солнечных установках происходит неполностью. КПД солнечных батарей составляет всего-навсего 10–13%, поэтому 1 м<sup>2</sup> солнечных панелей вырабатывает гораздо меньше 1 кВт. В настоящее время для спутников формата кубсат используются системы энергоснабжения мощностью от 1 до 300 Вт. Предположим, мы имеем дело с электролизером мощностью 50 Вт. Активная площадь пластин из соотношения ф. 6 составит 50000 мм<sup>2</sup>. Найдем площадь каждой из 7 двусторонних пластин:  $50000 \text{ мм}^2 / (7 \cdot 2 - 2) \approx 4200 \text{ мм}^2$  (две внешние стороны не участвуют в реакции). Взяв площадь с небольшим запасом, рассчитаем размеры и форму пластин, например прямоугольные 60x80 мм.

Процесс электролиза можно условно разделить на два этапа. Сначала происходит диссоциация электролита на ионы, затем протекают реакции на электродах. Поскольку электролиз чистой, дистиллированной воды протекает медленно или не идет вовсе, для ускорения процесса в воду добавляют сильный электролит, увеличивающий проводимость электрического тока. Максимальный выход газа дают растворы щелочей КОН и NaOH.

Ниже представлены схемы катодных и анодных процессов, протекающих при электролизе водного раствора гидроксида натрия:



Взрыв газовой смеси на выходе из сопла происходит с образованием воды:



На аноде происходит реакция окисления, вследствие чего электрод корродирует. Поэтому пластины лабораторных и промышленных электролизеров изготавливают из нержавеющей стали.

Итак, в нашем случае речь идет о “мокром” электролизере, в котором все пластины электродов расположены в одном пространстве, заполненном электролитом. Больше всего сложностей вызывает разделение жидкости и газа и сосредоточение всего объема газа под высоким давлением в электролизере. В невесомости пузырьки газа не всплывают на поверхность, как это происходит в лабораторных установках на Земле. Даже само понятие

“поверхность” здесь не определено, поскольку космический аппарат вращается по всем трем осям.

К вышеописанной проблеме добавляется и другая: большая часть пузырьков останется на поверхностях электродов, уменьшая тем самым активную площадь и, следовательно, скорость генерации газов.

Предлагаю некоторые возможные пути решения обозначенных вопросов:

1. Использование встроенной внутрь электролизера крыльчатки позволяет создать коническую воронку в области вращающихся лопаток. Благодаря действию центробежной силы вихревой поток жидкости будет собирать пузырьки газа и вытеснять в центр воронки (см. Рис. 2).

2. Менять топологию (пластины, мелкоячеистые сетки) и форму электродов. Подобрать оптимальные геометрические параметры, можно увеличить активную площадь электродов и предотвратить прилипание пузырьков газа.

Также стоит отметить вопрос о замене перенасыщенного примесями раствора электролита. Предлагается держать щелочной раствор в отдельном баке и подавать в электролизер, предварительно выпуская в космос отработанное вещество.

*Москва, 2023*



## Список литературы

1. Егоров И. Орбитальное маневрирование. Большая и малая тяга. – Режим доступа: <https://thealphacentauri.net/80749-orbitalnoe-manevrirovanie-bolshaya-i-malaya-tyaga/>
2. Сатюков Д. Системы энергообеспечения спутников формата Кубсат. – Режим доступа: <https://vk.com/@planetariumvg-sistemy-energoobespecheniya-sputnikov-formata-kubsat>
3. Буркан А. Электролизер. Методика расчета и изготовления. 2022
4. Лекции МГУ, биологический факультет. Растворы электролитов. Окислительно-восстановительные процессы. 2005
5. Волков Е. Ракетные двигатели – М.: Военное издательство министерства обороны, 1969.