

“Безопорное” движение как результат нескомпенсированной силы. Электродинамические и фотонные безопорные двигатели.

Геннадий Геннадиевич ИВЧЕНКОВ, кандидат технических наук,
kashey@kwic.com

Reactive jet and electrodynamic propulsions have been analyzed. It was shown that reactive forces are developed by non-compensated forces, not by jet reaction, which is even more obvious for electrodynamic (electromagnetic) thrusters. It is shown that some of electrodynamic thrusters using internal magnetic field can operate in reactionless manner. Also, it was shown that photonic propulsion engines and radio antennas having asymmetrical directional pattern can operate as reactionless thrusters too.

Ключевые слова: безопорное движение, supportless propulsion, реактивное движение, jet propulsion, электроракетные двигатели, electrodynamic thrusters, нескомпенсированная сила, non-compensated force.

1. Введение

Несмотря на то, что официальная наука считает, что безопорного движения не бывает, так как это нарушает 3-й закон Ньютона, время от времени этот вопрос снова поднимается, что связано с появлением механических и электродинамических устройств, в работе которых ряд авторов усматривает элементы безопорного движения. Некоторые из них при более подробном рассмотрении оказываются вполне “опорными”, а вот принципы работы других позволяют предположить, что на их основе можно сделать движители не образующие реактивной струи и не расходующие рабочего тела. К ним, в частности, можно отнести электроразрядный движитель постоянного тока и электродинамический конденсаторный движитель переменного тока, которые подробно рассмотрены в данной статье, а также фотонный двигатель. Кроме того, недавно был создан и испытан безопорный электродинамический двигатель EmDrive, принцип работы которого рассмотрен в данной статье.

2. Кратко о ракетных двигателях

Вначале определимся с формулировками. Двигатель состоит из источника силы (тяги) – движителя и источника энергии, питающего движитель. В некоторых

случаях, как например, в ракетном двигателе, движитель и источник совмещены. В других случаях – это отдельные агрегаты. Например, в электроракетных двигателях они разделены и источником энергии может являться солнечная батарея, атомный реактор и т.п.

Кратко остановимся на классических представителях реактивного движения – ракетных двигателях [1, 2, 3].

Как известно, тяга ракетных двигателей может быть определена двумя путями:

- из уравнения импульса силы – количества движения,
- из интеграла сил давления, приложенных к камере сгорания двигателя.

В первом случае берется уравнение импульса силы – количества движения в форме Эйлера:

$$Vdm = Fdt \quad (2.1)$$

Отсюда следует, что сила тяги двигателя равна

$$F = V \frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

где V – скорость истечения газов, а $\frac{dm}{dt} = \dot{m}$ – массовый расход топлива. Эта

формула справедлива для так называемого “рабочего режима”, когда внешнее давление и давление газов на срезе сопла равны. В большинстве случаев, в частности, в вакууме, это условие не выполняется.

Во втором случае определяется интеграл сил давления, приложенных внутри и снаружи к камере сгорания. Возникновение тяги в данном случае можно проиллюстрировать следующим образом:

Предположим, что некий баллон находится под давлением. В этом случае силы давления приложены равномерно по всей внутренней поверхности баллона. Баллон растянут, силы, приложенные к противоположным стенкам баллона скомпенсированы и баллон неподвижен. Прделаем отверстие в баллоне. В результате получается нескомпенсированная сила, равная давлению (избыточному) в баллоне, умноженному на площадь отверстия. В ракетной технике эта сила называется “основной составляющей тяги”.

Если давление в баллоне поддерживать каким-либо образом, то баллон будет работать как ракетный двигатель. Это рассуждение является, конечно, приближенным и не учитывает изменения статического давления газа за счет разгона потока, тяга, при этом, тяга получается больше чем “основная составляющая” примерно в 1,3 – 2 раза. Причем, тяга не зависит от топлива – это может быть все, что угодно: и горячие продукты горения и холодный сжатый газ, главное, чтобы поддерживалось давление в камере. То есть, выходит, что реактивная струя тут совсем не причем, она не создает тяги и тяга не является реакцией на движение струи. А вот поддержание давления требует непрерывной подачи топлива и его расход очень сильно зависит от его термодинамических характеристик, а термодинамические процессы расширения газа в свою очередь вызывают разгон струи. Это (и формула Мещерского-Циолковского

$$\Delta v = v_e \ln \left(\frac{M + P}{P} \right),$$

в основном, относится к ракетам, несущим все компоненты

топлива на борту. В ракетной технике используется комплексный параметр ракетного двигателя, определяющий его эффективность, который называется “удельным импульсом” или “удельной тягой”. Это комбинация из двух систем единиц (технической и СИ) величина - отношение тяги двигателя (в Кг

силы) к массовому расходу топлива (в кг массы/сек): $\bar{P} = \frac{F}{\dot{m}}$, где \dot{m} - массовый

расход, а F – тяга двигателя, которая у лучших двигателей достигает 460 (размерность удельного импульса в «сек», приведенная в некоторых источниках – совершенно безграмотная, Кг и кг не сокращаются!). Но, если компоненты не везти на борту, а брать, например, снаружи, то удельный импульс очень существенно возрастает. Например, воздушно-реактивные двигатели, использующие заборный воздух как окислитель, имеют удельный импульс порядка 3000 (Кг тяги/кг массы израсходованного бортового топлива за секунду), в то время, как лучший результат для кислород- водородных ракетных двигателей не превышает 450 - 460. То есть, если каким-либо образом удастся дистанционно доставлять компоненты для ракетного двигателя или брать их снаружи, то его удельный импульс будет стремиться к бесконечности.

Таким образом, ракетные двигатели теоретически могут обеспечить космическому аппарату любую, ничем не ограниченную скорость, а формула Мещерского – Циолковского не является фундаментальной и применима только для случая, когда ракета везет все компоненты с собой.

В реактивном движении имеют место несколько парадоксов, которые подтверждают изложенные выше положения:

- Предположим, что ракета каким либо образом доставлена в некую точку над землей. После этого включается ракетный двигатель таким образом, что тяга была равна весу ракеты. Двигатель работает, а ракета не двигается с места. При этом ни кинетическая, ни потенциальная энергии ракеты не меняются (потенциальная даже уменьшается по мере выработки топлива), а, в то же время, ракета расходует энергию на разгон струи ($E = \frac{MV^2}{2}$, где M – масса топлива, V – скорость струи). Таким образом, ракета расходует энергию впустую! Ситуация становится понятной если считать, что тяга создается только *нескомпенсированной* силой. Что происходит со струей вне двигателя никак не отражается на движении ракеты – возмущение не передается вверх по течению сверхзвукового потока. Если продукты сгорания недорасширены, то струя продолжает расширяться в атмосфере, создавая светящийся контур – идеальное продолжение сопла, которое сменяется светящимся контуром дозвуковой части сопла, затем, сверхзвуковой частью и так далее несколько раз («Бочки Маха»). Кроме того, одни из стартовых потерь ракеты, так называемые «гравитационные потери», действуют только во время работы двигателя.
- Кроме того, известно, что одноступенчатая ракета может развивать скорость больше, чем скорость истечения струи. Выходит, что ракета тащит струю за собой? Ситуация, опять же, становится понятной если предположить, что тяга создается *нескомпенсированной* силой и процессы, происходящие со струей вне двигателя на него никак не влияют.

- Другим примером того, что тяга создается нескомпенсированной силой является «тепловая камера сгорания» (точнее, «полутепловая»), представляющая собой трубу со сверхзвуковым соплом ($\frac{F_{ch}}{F_{cr}} = 1$). В ней разгон потока до звуковой скорости происходит за счет подвода тепла, а сверхзвуковой разгон – за счет расширения струи в сопле. Скорость истечения струи в таком двигателе такая же, как в двигателях с дозвуковым конфузурным соплом ($\frac{F_{ch}}{F_{cr}} > 3$), но тяга получается меньше, так как в дозвуковой части присутствует только «основная составляющая тяги».

Таким образом, получение тяги ракетным двигателем и разгон струи – это совершенно разные процессы в которых сила приложена к двум разным объектам. Это особенно очевидно в случае электродинамических двигателей, основанных на силе Лоренца.

3. Электродинамические движители

3.1. Электродинамические движители постоянного тока с проводящей средой и постоянным магнитным полем

Электродинамические ракетные двигатели известны уже несколько десятилетий [4] и используются в космических аппаратах для ускорения и стабилизации орбиты, но, хотя их теория, расчет и конструкция известны, не все особенности их работы были достаточно проанализированы. Предметом данной статьи является электродинамические ракетные двигатели использующие силу Лоренца (также известные как «двигатели на эффекте Холла»), которые могут быть преобразованы в безопорные, не потребляющие и не разгоняющие никакого рабочего тела (за исключением, возможно, эфира).

Рассмотрим силы, приложенные к замкнутому контуру с током, находящемуся в однородном магнитном поле (полем, создаваемым контуром пренебрегаем).

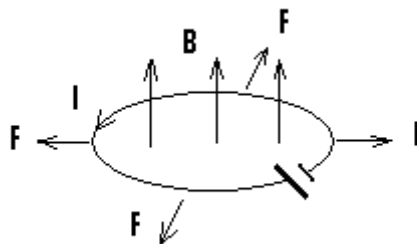


Рис. 1

В таком контуре течет ток равный
$$I = \frac{U}{R_{ext} + R_{int}} \quad (3.1.1)$$

где R_{ext} - сопротивление контура, R_{int} - внутренне сопротивление источника .

Очевидно, что в данном случае контур равномерно растянут, силы скомпенсированы и, следовательно, контур неподвижен. При этом сила, приложенная к элементу проводника dl определяется по формуле [5, 6]:

$$dF = Bldl \quad (3.1.2)$$

(при $\vec{B} \perp d\vec{L}$, магнитным полем самого контура пренебрегаем).

Поменяем направление внешнего магнитного поля – контур будет равномерно сжат и, все равно, останется неподвижен.

Теперь, обрежем часть контура. Сопротивление возрастает до бесконечности и ток, соответственно, становится равным нулю. Поместим разомкнутые концы контура в проводящую жидкость или газ.

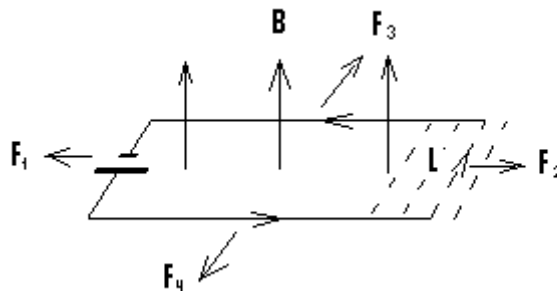


Рис. 2

Теперь контур снова замкнут, но через проводящую среду, никак механически не связанную с контуром. Ток, текущий в контуре определяется по той же формуле

$$(3.1.1) \quad I = \frac{U}{R_{ext} + R_{int}}, \text{ где } R_{ext} \text{ зависит от сопротивления проводящей среды.}$$

Очевидно, что силы F_3 и F_4 , приложенные к боковым проводникам компенсируют друг друга. В то же время, силы F_1 и F_2 , равные по величине, приложены в противоположных направлениях к переднему проводнику и к проводящей жидкости. Так как проводящая жидкость или газ механически не связаны с контуром, то эти силы не скомпенсированы – сила F_1 приложена к контуру, а сила F_2 - к жидкости (газу). Таким образом, контур разгоняется в одном направлении, а жидкость (газ) в противоположном. Силы F_1 и F_2 определяются по формуле:

$$F_1 = F_2 = BIL \quad (3.1.3)$$

где L – длина пути тока в жидкости (газе).

Все это выглядит как реактивное движение и на этом принципе работают электроракетные двигатели на лоренцевой силе (в литературе они известны как «двигатели на эффекте Холла»). На этом же принципе работает «рельсовая пушка». Но, если в случае газодинамического ракетного двигателя газ непосредственно контактирует с оболочкой камеры сгорания, обеспечивая тягу, то в данном случае механический контакт отсутствует и проводящая среда нужна только для пропускания тока (замыкания контура) и ее разгон никак не сказывается на силе F_1 , приложенной к контуру. В то же время, проводящая среда разгоняется и

безвозвратно улетает в противоположном направлении. Достать и сохранить ее не представляется возможным, так как в таком случае ее количество движения будет вычитаться из количества движения контура и в пределе (когда вся проводящая среда возвращается назад) система остановится.

Таким образом, *тягу в электроракетных двигателях создает не реактивная струя, а нескомпенсированная сила*, приложенная к внутреннему электрическому контуру двигателя. Точно такая же сила приложена к проводящей среде и, таким образом, количества движения контура и разогнанной среды оказываются равны, что формально выглядит как реактивное движение.

Точно также работает униполярный мотор, крутящий и линейный.

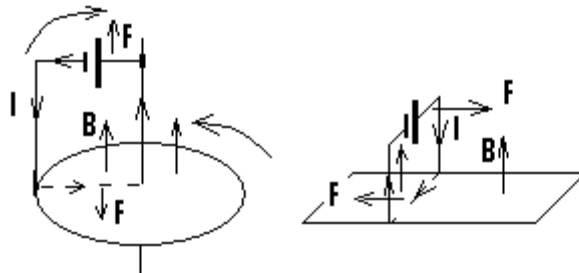


Рис. 3

В данном случае проводящей средой, не связанной механически с контуром, является диск или пластина и одинаковые силы приложены и к диску (пластине) и к внешнему контуру, но в противоположных направлениях. Таким образом, диск вращается в одну сторону, а контур – в другую. Если закрепить контур, то будет вращаться один диск, а если закрепить диск то вращаться будет контур, что и подтверждено экспериментами.

Следовательно, проводящая среда только замыкает контур, создавая условия для протекания в нем тока, и только нескомпенсированная сила приложенная к части контура, создает тягу!

В частности, этот принцип используется в движителях по программе “Electrodynamic Tether Propulsion” (TSS), где контур (20 км кабель) движется на орбите спутника в магнитном поле Земли, а проводящей средой является ионосфера. При протекании в контуре тока от внешнего источника, Tether разгоняет спутник, а, при замыкании контура на нагрузку, ЭДС, наведенная в контуре, вызывает ток, тормозящий спутник. Так как магнитное поле Земли – слабое (порядка 0.7 Гс), то и ощутимая сила достигается при ширине зазора в десятки километров. Экспериментально эта конструкция была опробована в 1996 году на шаттле “Колумбия” (STS 75).

3. 1. 1. Безопорные движители с разрядником

Если проводящая среда, замыкающая контур, материально не связана с движителем (не входит в его массу) и не создает реактивную струю, то такой движитель является безопорным.

В принципе, контур с постоянным током может быть замкнут разрядным промежутком, в частности электрической дугой или вакуумным разрядником с

горячей (термоэлектронной) или холодной (электростатической, основанной на туннельном эффекте) эмиссией. Схема приведена на рис. 4.

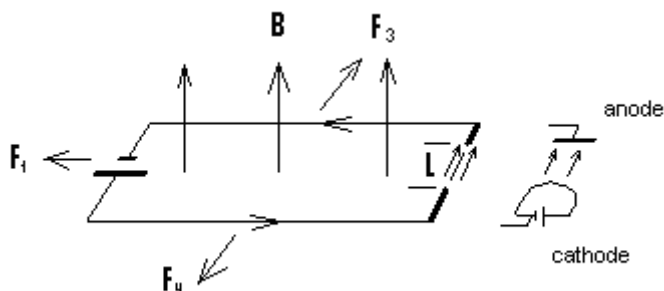


Рис. 4

В данном случае можно было бы использовать дуговой разряд. Но, вообще-то, для замыкания дуги в разряде нужна газовая среда. В частности, известны термические дуговые ракетные двигатели, где дуговой разряд нагревает газ, который далее расширяется в сопле и создает тягу. Очевидно, что они фактически являются классическими реактивными двигателями и не являются безопорными.

Но замкнуть контур возможно также и вакуумным разрядом, используя для этого, например, вакуумный диод с нагреваемым или холодным катодом. В этом случае электронный поток от катода к аноду замыкает контур.

Ток диода до насыщения описывается законом 3/2: $I = g \times U_{a-c}^{3/2}$. В режиме насыщения ток диода описывается законом Ричардсона – Дешмана:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT}\right), \text{ где } A = 120 \left[\frac{\text{A}}{\text{cm}^2 \text{K}^2} \right] \quad (3.1.1.1),$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/град - постоянная Больцмана. Работа выхода для щелочных катодов примерно равна 1,5 эВ или $e\varphi = 2.4 \times 10^{-19}$ Дж (для вольфрама она равна 4.5 эВ). Предположим, что катод нагрет до 2000 К. Можно оценить плотность тока насыщения, которая будет примерно равна

$$j = 120 \times 4 \times 10^6 \exp\left(-\frac{2.4 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 2 \times 10^3}\right) = 4.8 \times 10^8 \times 6 \times 10^3 = 2.8 \times 10^{11} \text{ А/см}^2 \text{ для}$$

щелочных катодов, а для вольфрама она составит примерно $j = 8.6 \times 10^9 \text{ А/см}^2$.

Таким образом, даже небольшие по площади катоды позволяют передать больший ток.

Кроме того, в настоящее время разработаны холодные катоды высокой эффективности (плотность тока до 10^6 А/см^2), которые также могут быть использованы в разрядниках.

Но тут есть ограничения. Электроны не должны улетать, так как при этом теряется масса (правда, очень немного), а весь аппарат приобретает положительный заряд, что может вызвать мощный разряд при контакте с незаряженным телом. Далее, при движении зарядов в магнитном поле со скоростью V траектория зарядов закручивается в окружность и радиус траектории заряда (ларморовский радиус) определяется по формуле:

$$r = \frac{m V}{q B} \quad (3.1.1.2),$$

где m и q - соответственно масса и заряд частицы, V и B – ее скорость и индукция магнитного поля.).

Формально можно было бы ожидать, что данный метод создания тяги может создать тягу в несколько ньютонов, но, как указано выше, есть существенное ограничение. Дело в том, что при движении заряда (электрона) во взаимноперпендикулярных электрическом и магнитном полях (скрещенных полях), траектория искривляется за счет силы Лоренца ($F_L = e[\vec{V} \times \vec{B}]$), представляет собой трохойду (разновидность циклоиды) и для попадания электронов на анод необходимо, чтобы ларморовский радиус был больше $\frac{1}{2}$ расстояния катод - анод. Иначе электроны не достигнут анода. Это условие необходимо, в частности, для работы магнетронов.

Оценим возможную работоспособность такой системы. Вначале предположим, что расстояние между катодом и анодом равно 1 см, индукция магнитного поля равна $B = 0.18$ Тл (неодимовый магнит), и напряжение между катодом и анодом равно 100 В. Тогда напряженность электрического поля будет равна 10000 В/м, а энергия электрона при подлете к аноду будет порядка $E = 100$ эВ. Тогда у анода скорость электрона, разогнанного электрическим полем, определяется по формуле

$$V_e = \sqrt{\frac{2E}{m_e}} = \sqrt{\frac{200 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}}} = \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{14}}{9.1}} = \sqrt{35 \times 10^{12}} = 5.9 \times 10^6 \text{ м/сек при любом}$$

зазоре. Скорость электрона в зазоре в однородном электрическом поле увеличивается по мере его разгона электрическим полем. Она может быть

$$\text{определена по формуле: } V_l = at = \frac{Ee}{m} t = \sqrt{2El} \sqrt{\frac{e}{m}} = 4.1 \times 10^5 \sqrt{2El}, \text{ где } l - \text{длина}$$

разрядного промежутка (зазора).

$$\text{И тогда ларморовский радиус будет равен } r = \frac{m_e V}{e B} = \sqrt{\frac{m_e}{e}} \frac{\sqrt{2El}}{B} = 3.36 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{El}}{B}, \text{ а}$$

при $B = 0.18$ Тл (неодимовый магнит) ларморовский радиус у анода составит

$$r = \frac{m_e V}{e B} = \sqrt{\frac{m_e}{e}} \frac{\sqrt{2U}}{B} = 1.87 \times 10^{-4} \text{ м, или } 0.18 \text{ мм, где } U - \text{напряжение между}$$

анодом и катодом. **Эта величина намного меньше, чем зазор в 1 см и такой разрядник работать не будет.** При напряжении 3000 В ларморовский радиус составит порядка 1 мм. Получается, что для эффективной работы такого движителя нужно либо увеличивать напряжение между анодом и катодом до 300000 В, либо уменьшать зазор, либо уменьшать индукцию для того, чтобы электроны достигли анода. Таким образом, разрядники с большим зазором не могут быть использованы.

Движение электронов в скрещенных полях используется в магнетронах – вакуумных приборах, генерирующих СВЧ [9]. У них анод имеет форму цилиндра, а катод размещен на оси цилиндра.

При ларморовском радиусе меньше $\frac{l}{2}$ (где l расстояние по радиусу между катодом и анодом) ток резко падает, так как электроны не достигают анода. Критическая величина индукции определяется по формуле

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{l^2 B_{kp}^2} \quad [9] \quad (3.1.1.3)$$

$$\text{или } B_{kp} = 2.8 \frac{\sqrt{U}}{l} \sqrt{\frac{m_e}{e}} \quad \text{или } B_{kp} = 6.7 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{U}}{l}.$$

При зазоре в 1 см и напряжении 1000 В критическое значение индукции будет $B_{kp} = 2.1 \times 10^{-2}$ Тл (индукция ферритового магнита). При зазоре в 1 мм и том же напряжении $B_{kp} = 0.21$ Тл (индукция неодимового магнита). При зазоре в 2 мм $B_{kp} = 0.11$ Тл.

В принципе, идея, заложенная в конструкции магнетрона вполне подходит для разрядного движителя, предложенного в данной статье (рис. 5).

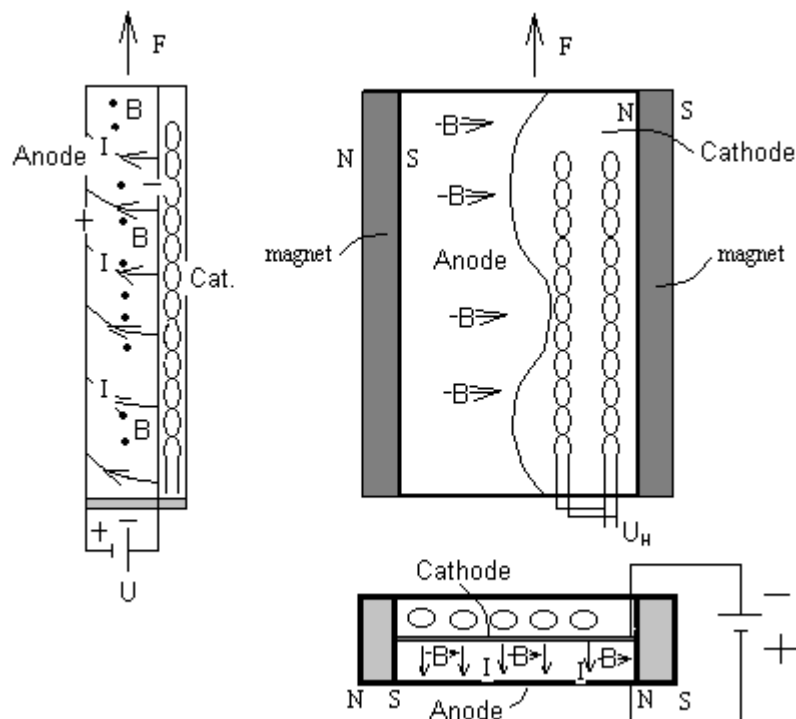


Рис. 5

В данном случае зазор между анодом и катодом создает нескомпенсированную силу.

Предположим, что мощность источника питания равна 10 кВт (солнечные батареи спутника). Тогда (при $U = 1000$ В) ток будет равен 10 А. Нескомпенсированная сила, создающая тягу, определяется по формуле $F = BI$. Кроме того, согласно формуле (3.1.1.3), при увеличении зазора l должна быть уменьшена индукция и в результате при том же напряжении и токе между катодом и анодом нескомпенсированная сила не изменится. В частности, при зазоре $l = 2$ мм сила

будет равна $F = BI = 4.4 \times 10^{-3}$ Н и столько же получится при зазоре в 1 см, но при меньшей индукции.

Таким образом, тяга такого двигателя составляет единицы миллиньютон и сравнима с тягой электроракетного двигателя.

Увеличить тягу такого движителя можно повышая ток и мощность источника

питания: $F_{\max} = B_{kr} I l = 6.7 \times 10^{-6} \frac{P}{\sqrt{U}} = 6.7 \times 10^{-6} \sqrt{PI}$, где P – мощность источника

питания. При напряжении анод – катод 100 В и мощности источника 10 кВт сила тяги составит 6.7×10^{-3} Н или 0.7 грамма, а при напряжении анод – катод 50 В (меньше нельзя) – порядка 0.01 Н.

При мощности источника P = 1МВт, и токе 1000 А (U = 1000 В)

$$F_{\max} = 6.7 \times 10^{-6} \sqrt{10^9} = 0.21 \text{ Н.}$$

При этом в формулу тяги ширина зазора (разрядника) значения не имеет. Она в формулы для силы тяги не входит и влияет только конструктивно на величину зазора и индукции в нем, которая необходима для замыкания электронов на анод.

Таким образом:

- Данный движитель постоянного тока является безопорным, так как пучок электронов замыкается на анод и ничего из такого движителя не вылетает.
- Хотя эмиссия катода позволяет предавать большие токи, но возможная тяга такого движителя ограничена и определяется ларморовским радиусом электрона в скрещенных полях. Таким образом, тяга зависит от мощности источника и разрядного тока и даже при мегаватном источнике составляет доли ньютон.
- Конструкция и принцип работы разрядника, приведенные в данном разделе, скорее всего *похожи на конструкцию и принцип работы безопорного двигателя EmDrive* [10].

3. 2. Безопорные электродинамические движители переменного тока

3. 2. 1. Движители с внешним магнитным полем

Как было отмечено выше, проводящая среда нужна только для замыкания контура.

В контурах двигателей, приведенных в предыдущем разделе, течет постоянный ток, который создает постоянную тягу. Если же пустить переменный ток, то контур будет двигаться взад и вперед с частотой тока, оставаясь на месте. В то же время, у переменного тока есть преимущество – он проходит через диэлектрики (за счет токов смещения), одним из которых является вакуум. Таким образом, в контуре будет течь переменный ток.

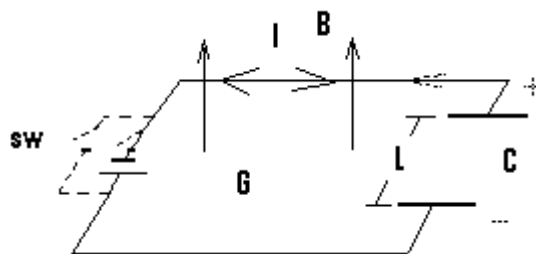


Рис. 7

В данном случае (конденсатор С – вакуумный, магнитное поле однородное внешнее) переменный ток будет создавать переменную тягу с направлением, поочередно меняющимся на противоположное. В итоге, контур будет стоять на месте.

Теперь зарядим конденсатор С постоянным током (рис. 7) и поставим переключатель sw. Теперь замкнем переключатель и разомкнем источник постоянного тока. Конденсатор будет разряжаться, в контуре потечет постоянный ток, который вызовет импульс силы направленный в одну сторону. При этом сила будет пропорциональна расстоянию между пластинами конденсатора L. За счет этого контур начнет двигаться.

Теперь зарядим конденсатор. При зарядке конденсатора потечет постоянный ток, но направленный в противоположную сторону. Следовательно, при полном цикле зарядки-разрядки контур останется на месте. В то же время, *если внешнее магнитное поле будет меняться одновременно с направлением тока, то такой движитель будет работать, создавая тягу, направленную в одну сторону.*

В принципе, можно механически менять направление внешнего магнитного тока, как показано на рис. 8:

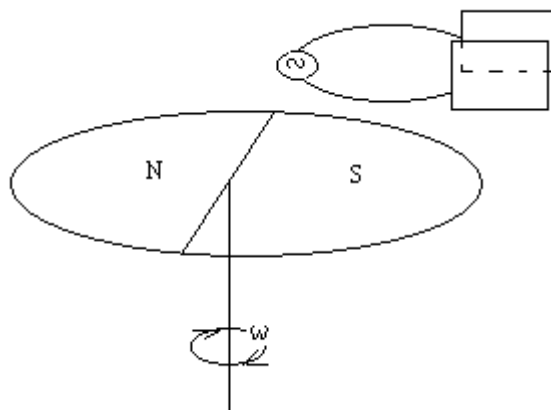


Рис. 8

Но чтобы создать переменное магнитное поле частотой порядка 1000 Гц, необходимо вращать магнит со скоростью 60000 об/мин, что сложно обеспечить. Кроме того, частота тока в 1 КГц недостаточна для прохождения через конденсатор (слишком большое емкостное сопротивление).

Проблему можно решить либо применяя синхронное подмагничивание посредством специальной катушки, либо используя внутреннее магнитное поле. Движитель, использующий внутреннее магнитное поле описан ниже.

3. 2. 2. Двигатели с внутренним магнитным полем

Во всех приведенных случаях предполагалось, что контур находится в некоем внешнем магнитном поле, а внутренне магнитное поле, вызванное протеканием тока в контуре мало, по сравнению с внешним.

Теперь уберем внешний источник магнитного поля и рассмотрим силы, действующие на замкнутый контур с протекающим в нем переменным током (рис. 9).

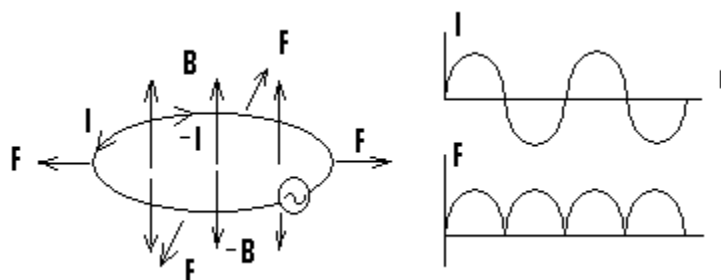


Рис. 9

В этом случае при перемене направления тока одновременно меняется направление вектора индукции B и, таким образом, силы (сила Ампера), приложенные к контуру *не меняет направления*.

Таким образом, катушка с протекающим в ней переменным током всегда радиально растянута. Практика полностью это подтверждает. В частности, в экспериментах по получению сильного импульсного магнитного поля на соленоид подается мощный импульс тока. В результате, в течении короткого времени наводится сильное магнитное поле, а соленоид, фактически, взрывается - разрывается возникшими силами Ампера.

Возникающая в этом случае сила растяжения является переменной, с удвоенной частотой по сравнению с частотой тока (рис. 9).

Теперь установим в контуре воздушный (вакуумный) конденсатор.

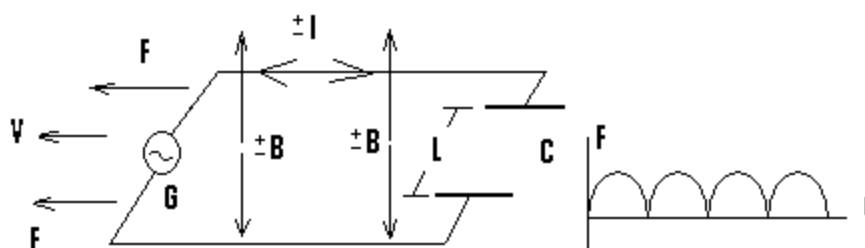


Рис. 10

Очевидно, что в этом случае на контур будет действовать нескомпенсированная сила, *приложенная в одном направлении* (рис. 10). А как же реактивное движение? В случае с проводящей средой она формально образует “реактивную струю”. А что образует “реактивную струю” в данном случае? Вакуум? Это что, выходит, что конденсатор разгоняет вакуум или эфир как в прямоточном реактивном двигателе?

Известно, что проводимость конденсатора обусловлена токами смещения в вакууме (эфире), который является поляризуемым диэлектриком. Токи эти вполне реальные, создающие, в частности, магнитные поля. Что именно поляризуется в вакууме, современной физике не известно. В дорелятивистские же времена считали, что поляризуется эфир. Максвеллом была разработана модель эфира с деформируемыми вихрями, на основе которой он вывел свои уравнения (об этом современная физика старается не вспоминать). Так или иначе, вакуум (эфир) поляризуется и на этом основана вся электротехника, электроника и радиотехника..

Таким образом, устройство, приведенное на рис. 10 будет работать как безопорный двигатель, не тратящий на движение рабочее тело. Сила Лоренца, приложенная к элементу контура определяется по уравнению [5, 6]:

$$d\vec{F} = I(\vec{B} \times d\vec{L}) \quad (3.2.2.1)$$

В первом приближении в случае однородного поля сила, приложенная к контуру будет равна

$$F = IBL \quad (3.2.2.2)$$

где L – расстояние между пластинами конденсатора, I – ток в контуре, B – магнитная индукция – следствие протекания тока в контуре. Величина магнитной индукции может быть определена интегрированием уравнения Био-Савара, при этом магнитное поле определяется согласно принципу суперпозиции полей всеми проводниками, входящими в контур, включая боковые. Ток, протекающий в контуре, зависит от напряжения источника переменного тока и сопротивления

конденсатора, определяемого по формуле: $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$, где f – частота тока.

Очевидно, что эффективность (тяга) двигателя возрастает с частотой, но в случае, когда длина волны в проводнике ($\lambda \approx \frac{c}{f}$, где c – скорость света) соизмерима с размером контура, эффективность движетеля может меняться в зависимости от числа $\frac{\lambda}{4}$, укладываемых в контур (как в радиоантенне).

Оценим тягу, создаваемую таким движителем в случае кругового витка (Рис. 11).

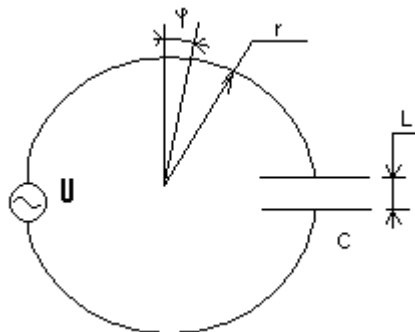


Рис. 11

Магнитная индукция, наведенная кольцевым витком в элементах витка определяется интегрированием уравнения Био-Савара [5, 6]:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \int_0^{\pi-\pi/500} \frac{d\varphi_0}{\cos \varphi_0/2} \quad (3.2.2.3)$$

где $I = 2\pi fCU$ – ток, текущий в контуре, I – ток в катушке, r – радиус контура (0.5 метра), φ_0 - центральный угол. То есть, интегрируется полукольцо (от 0 до π) и результат удваивается. Но верхний предел интегрирования не может быть равен π (как для случая бесконечно тонкого провода), так как тогда $B \rightarrow \infty$. Тогда верхний предел определяется углом, при котором элемент проводника, который участвует в наведении индукции, остается на поверхности проводника (это особенно очевидно для прямоугольного витка). Для провода диаметром 1 мм этот предел примерно составляет $\pi - \pi/500$.

Тогда выражение для магнитной индукции в любой точке одиночного витка будет

$$B \approx \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \ln \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{1000}\right)}{\operatorname{tg} \pi/4} \approx \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \ln \frac{318}{1} \quad (3.2.2.4)$$

При этом, магнитное поле, приложенное к контуру, создается током, текущим в самом контуре (в первом приближении магнитное поле, создаваемое токами смещения в зазоре конденсатора C не учитываются, хотя оно также присутствует). Сила, растягивающая виток определяется по формуле: $F = 2BIr$, где r – радиус катушки (принимается, что $2r = L$ - расстоянию между пластинами конденсатора). Тогда

$$F = 2BIr \approx \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln 318 \approx 1.13 \times 10^{-6} I^2 \quad (3.2.2.5)$$

Здесь нужно обратить внимание на квадратичную зависимость силы от тока. Это важное отличие от разрядных движителей, описанных в параграфе выше, у которых сила пропорциональна первой степени тока, так как у них магнитное поле создается внешними источниками, например, постоянными магнитами.

Тогда, если, опять же, зазор конденсатора L равен диаметру витка $2r$, то сила, растягивающая виток будет примерно равна:

$$F = 2BIr \approx \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln 318 \approx 1.13 \times 10^{-4} \text{ Н для катушки, состоящей из одного витка}$$

диаметром 1 метр при токе в 10 А (при этом радиус витка r в формулу 3.2.2.5 не входит, а определяет только индуктивность катушки). Емкость воздушного конденсатора, приведенного на рис. 7, составит порядка 90 пФ, и его емкостное сопротивление X_c составит порядка 200 Ом на частоте 10 МГц. То есть, для получения тока в 10 А, напряжение источника переменного тока должно быть порядка 2000 В.

Напряжение питания можно уменьшить, если частота источника – резонансная. Для этого можно применить конденсатор с диэлектриком. Так как

диэлектрик механически связан с конденсатором, то создавать нескомпенсированную силу будет только вакуумная составляющая диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 1$). При этом общий ток по контуру будет определяться полной емкостью конденсатора, но только часть его ($1/\epsilon$) будет создавать нескомпенсированную силу. Остальная же часть тока будет создавать силу, приложенную к скрепленному с конденсатором диэлектрику. Таким образом, увеличить силу тяги за счет диэлектрика не получится, но контур может быть при меньшей частоте питающего напряжения введен в последовательный резонанс, при котором сопротивление становится чисто активным, общий ток увеличивается и увеличивается также его часть, создающая нескомпенсированную силу.

Приведенный расчет является грубым, оценочным, но тем не менее он позволяет оценить параметры такого движителя, которые оказываются близкими к параметрам электроракетных двигателей.

Кроме того, необходимо напомнить, что движитель, это только половина силового агрегата – двигателя, в который обязательно входит источник энергии. В химических двигателях топливо (продукты сгорания) является и источником энергии и рабочим телом, в то время, как у электроракетных двигателей эти функции разделены.

3. 2. 3. Безопорный движитель переменного тока с внутренним магнитным полем и подмагничиванием

Движитель, описанный в параграфе 3.2.1 можно усовершенствовать, существенно увеличив тягу за счет подмагничивания.

Схема такого движителя и его эквивалентная электрическая схема приведены на Рис. 12.

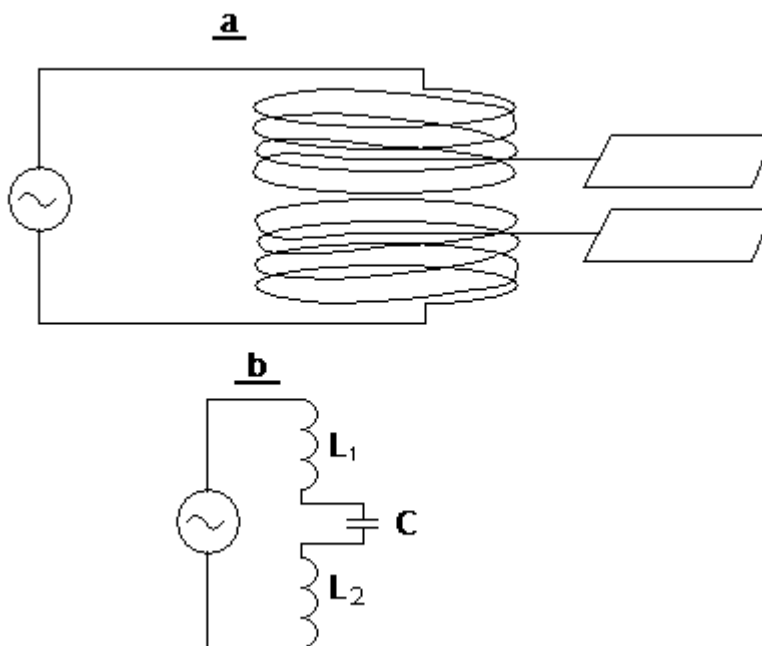


Рис. 12

Принцип движителя аналогичен приведенному в параграфе 2.2.1, то есть из одного витка вырезается часть и туда вставляется вакуумный конденсатор. В то же время, сам контур является многовитковым и эти витки пропорционально (в первом приближении) увеличивают магнитную индукцию в месте расположения «обрезанного» витка. При частоте генератора, равной резонансной частоте контура LC (последовательный резонанс), сопротивление контура определяется только его активным сопротивлением (и потерями). Таким образом, нескомпенсированная сила приложена к половине *одного* витка, но индукция определяется всеми 1000 витками, которые фактически осуществляют подмагничивание.

Можно оценить тягу, создаваемую таким движителем.

Предположим, что цилиндрическая катушка диаметром 1 метр имеет 1000 витков провода диаметром 1 мм и вакуумный конденсатор (см. параграф 2.2.1) подключен в разрыв катушки в ее середине и его зазор (расстояние между пластинами) равно диаметру витка. Очевидно, что в данном случае нескомпенсированная сила приложена к половине одного витка (вне зависимости, сколько витков в контуре), а магнитная индукция будет определяться количеством витков в катушке. Фактически получается, что тяга такого движителя больше тяги движителя с одним витком примерно в N раз, где N – число витков:

$$F = 2NB\mu_0 I r \approx N \frac{\mu_0 I^2}{2\pi} \ln 318 \approx 1.13N \times 10^{-6} I^2.$$

Резонансная частота (последовательный резонанс) контура на рис. 12 составит порядка 11 МГц, а активное сопротивление катушки будет порядка 60 Ом. Так как сопротивление контура на частоте последовательного резонанса является чисто активным и равным активному сопротивлению катушки, то мощность, рассеиваемая таким контуром, будет примерно равна $P = I^2 R$, где R – сопротивление катушки, и идет на нагрев катушки.

Магнитная индукция, наведенная кольцевым витком в элементах витка определяется интегрированием уравнения Био-Савара [5, 6] по формулам 3.2.2.3, 3.2.2.4 и 3.2.2.5 приведенным в разделе 3.2.2.

Тогда нескомпенсированная сила, растягивающая виток будет равна

$F \approx 1.13N \times 10^{-6} I^2 = 1.13 \times 10^3 \times 10^{-6} \times 10^2 \approx 0.11$ Н для катушки, состоящей из 1000 витков при том же токе в 10 А (см. раздел 3.2.2) и расстоянии между пластинами конденсатора, равному диаметру витка. Соответственно, так как сила пропорциональна квадрату тока, то для 100 А она будет равна:

$F \approx 1.13N \times 10^{-6} I^2 = 1.13 \times 10^3 \times 10^{-6} \times 10^4 \approx 11.3$ Н или примерно 1.13 кгс, что для электроракетного двигателя является достаточно большой величиной. Далее, при токе в 1000 А сила составит порядка 1.13 кН (сила пропорциональна квадрату тока). Но при этом токе мощность, рассеиваемая на обмотке из за активного сопротивления может составить порядка 600 МВт, что, конечно же, недопустимо. Исправить ситуацию может сверхпроводящая катушка. Тогда потребляемая мощность будет определяться только реактивным сопротивлением и внутренним сопротивлением источника.

Можно оценить реактивную мощность, потребляемую таким контуром. Она определяется по формуле $Q = UI \sin \varphi$, или через реактивное сопротивление, например, конденсатора, $Q = I^2 X_c \sin \varphi$. При последовательном резонансе $\sin \varphi = 1$

(при этом $\cos \varphi = 0$ и, соответственно, активная мощность равна нулю). Тогда при токе 10 А и реактивном сопротивлении конденсатора в 200 ом мощность источника питания будет порядка 20 квар (реактивных киловаттов), при токе в 100 А мощность будет порядка 2 Мвар, а при токе 1000 А – 200 Мвар, что потребует мощный источник источника мегаваттного класса (здесь нужно иметь в виду, что эти расчеты – оценочные и дают только порядки величин).

В данной конструкции можно, опять же, применить конденсатор с диэлектриком. Увеличения тяги за счет этого не будет, но частоту питающего напряжения можно существенно уменьшить. Кроме того, для увеличения подмагничивания также можно использовать ферромагнитный сердечник, что, в частности, позволит уменьшить размер катушки.

Такой же результат можно достигнуть используя отдельную катушку подмагничивания L, которая создает переменное магнитное поле, синхронизированное с частотой тока протекающего в основной катушке. В этом случае основная катушка может состоять из одного витка (рис. 13). Данная система может также работать в импульсном режиме.

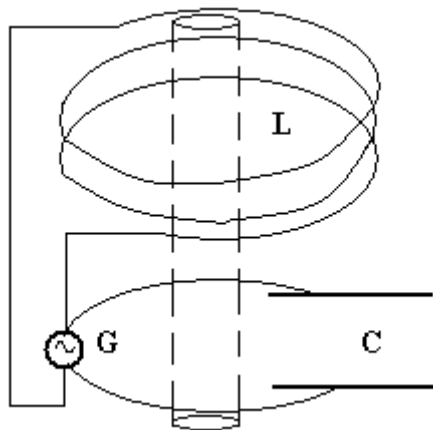


Рис. 13

Таким образом, тяга таких двигателей существенно выше тяги традиционных электроракетных двигателей, использующих рабочее тело, при том же энергопотреблении, но, в то же время, такие двигатели не расходуют рабочее тело. Преимуществом «конденсаторных двигателей» по сравнению с двигателями, использующими внешнее магнитное поле (электроразрядные и традиционные электроракетные) является существенно большая сила тяги за счет квадратичной зависимости тяги от тока.

Но, такие двигатели, также как и традиционные электроракетные, требуют отдельного источника питания, а их тяга получается пропорциональной потребляемой мощности в соответствии с принципом сохранения энергии. Кроме того ток, текущий в контуре, вызывает нагрев обмотки и выделяемое тепло нужно будет удалять. Этой проблемы можно избежать, опять же, применив сверхпроводящую обмотку.

Далее нужно учитывать, что контур такого двигателя будет работать как антенна и, соответственно, будет создавать мощное электромагнитное

излучение и запускать такой двигатель нужно будет вдалеке от Земли (иначе будут помехи на Земле и погорят спутники).

Таким образом:

- Данный движитель является безопорным, так как контур замыкается через токи смещения эфира, который, естественно, механически никак не связан с контуром, и ничего из такого движителя не вылетает (кроме, разве что эфира).
- Его располагаемая тяга существенно выше тяги, развиваемой электроразрядными и традиционными электроракетными двигателями.
- Тяга такого двигателя ограничена и зависит от мощности источника и тока в контуре.

3.2.4 Возможное применение конденсаторного двигателя

Тяга последнего двигателя (1.13 кН) уже может быть достаточной для межзвездного полета зонда. Предположим, что если масса зонда (движитель, силовая установка, аппаратура) будет порядка 10 тонн, то за час зонд разгонится до 396 м/сек. За сутки до 9.5 км/сек, за год до 3.47 тыс. Км/сек, а за 20 лет его скорость составит 69.4 тыс.км/сек или 0.23 от скорости света. За время разгона зонд пройдет расстояние в 2.2×10^{10} тыс. км. Так как расстояние до Проксимы Центавра составляет 4.1×10^{10} тыс. км, то зонд при разгоне пройдет расстояние, равное половине пути. Тогда, если он после разгона начнет торможение с тем же ускорением (масса зонда не меняется), то время полета до Проксимы составит порядка 40 лет, что вполне реально. Таким образом, упомянутый выше двигатель (1000 А в катушке при мощности источника в 200 МВт) вполне достаточен для полета к ближайшей звезде. Очевидно, что при создании таких двигателей предстоит решить массу сложных технологических проблем, но теоретически это возможно. Необходим также малогабаритный и легкий источник питания сверхмегаваттного класса, мощность которого соизмерима с мощностью небольшой атомной электростанции (например БН-600 Белоярская АЭС).

При этом потребуется источник питания с минимально возможным внутренним сопротивлением. В этом случае также возможно использовать сверхпроводники. Кстати, такие магниты и источники питания существуют и применяются в ускорителях. Например сверхпроводящие магниты, установленные на ЦЕРН создают магнитное поле в 16 Тл при токе в 18500 А и имеют размер порядка двух метров [11]. Такие магниты запитываются постоянным током от источников тока – генераторов, имеющих очень малое внутреннее сопротивление и выдающих килоамперы при очень малом выходном напряжении. Таким источником может являться униполярный генератор постоянного тока. Но, к сожалению, такой генератор не может обеспечить ток с частотой 11 МГц. Хотя униполярные генераторы могут выдавать также и переменный ток, но его частота не может превышать сотни герц. Кроме того, при последовательном резонансе к катушке и емкости будет приложено высокое напряжение, намного превышающее входное. При очень высокой добротности контура оно может достигать тысяч вольт, что также необходимо учитывать. Кроме того, такой генератор должен бесперебойно работать в течении 40 лет. Задача, конечно сложная, но теоретически выполнимая.

Далее, генератор (как преобразователь энергии) должен быть подключен к источнику энергии, например, к атомному реактору. Единственный реактор, который может для этого подойти – это реактор на быстрых нейтронах. Сейчас уже разработан малогабаритный реактор на 1 МВт и теоретически возможно создание такого реактора и на 200 МВт. Это уже дело техники.

Отдельный вопрос о запасах расщепляющегося материала на борту. В литературе приводятся расчеты, основанные на «дефекте массы» согласно пресловутой формуле $E = mc^2$, которая принципиально неверна (неправильный вывод и подгонка экспериментальных результатов по ней [12]). Так, что этот вопрос остается открытым, но можно оценить эти запасы по практике применения реакторов на быстрых нейтронах, использующих плутоний 239. Вес топлива для БР-800 составляет порядка 30 тонн. Можно считать, что для реактора мощностью 200 МВт вес топлива составит порядка 7 тонн. При этом цикл работы реактора до замены ТВЭЛов составляет 3 – 5 лет (после этого топливо заражается продуктами деления) и за это время топливо вырабатывается только на 10 % (700 кг), остальное остается в ТВЭЛе и смешивается с продуктами деления. Получается, что КПД атомных станций «почти как у паровоза» и не превышает 10% (тут уж не до «дефекта массы»). Выходит, что за 40 лет ТВЭЛы должны смениться 8 раз и их общий вес будет составлять 56 тонн, что совершенно не подходит для данной конструкции. Таким образом, создание малогабаритных (и легких) ядерных реакторов большой мощности и с высоким КПД – очень сложная задача, но теоретически решаемая, так как уже существуют малогабаритные реакторы мегаваттного класса для ракет и подводных аппаратов. Дело за технологией.

4. Фотонный двигатель – классический безопорный движитель

Для наглядности представим, что в фокусе некоего параболического зеркала установлена лампа, излучающая в сферу (см. Рис. 13).

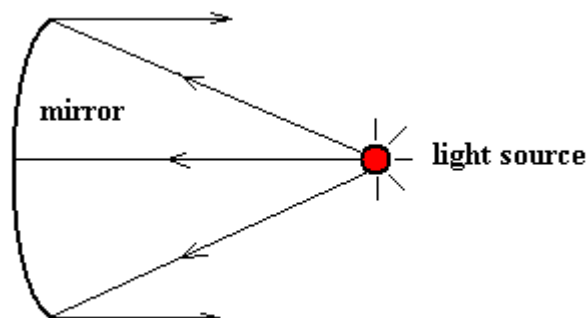


Рис. 13

Согласно любой модели (корпускулярной, фотонной и электродинамической) сила, действующая на такую лампу, скомпенсирована.

Часть излучения лампы перехватывается зеркалом, отражается и создает тягу.

Корпускулярную теорию не рассматриваем, так как она является устаревшей и, к тому же, неверной.

Согласно «фотонной теории» (так как фотоны сейчас официально признаны «безмассовыми частицами», не имеющими ни массы покоя, ни «релятивистской массы») излучатель (лампа) не расходует рабочее тело и тяга происходит без «отброса массы».

Согласно электродинамическому объяснению светового давления, оно создается токами, наведенными в металле (диэлектрике) вектором E электромагнитной волны. Этот ток взаимодействует с магнитным полем волны (вектор B), создавая силу – силу светового давления [6]. При смене фазы волны фазы векторов E и B меняются на противоположные одновременно, так что сила (так же, как и вектор Пойнтинга) остается направленной вдоль вектора скорости волны (сила получается пульсирующей с удвоенной частотой волны). В этом случае тем более очевидно, что никакой «отброс массы» в создании тяги фотонного двигателя не участвует. Таким образом, фотонный двигатель является классическим представителем безопорных движителей. В частности, это отмечено в [1] (TABLE 1-1, page 2).

Кроме того, анализ показывает, что безопорными движителями также являются радиоантенны с ассиметричной диаграммой направленности [7], в частности, зеркальная антенна (рис. 14) с дипольным возбуждением.

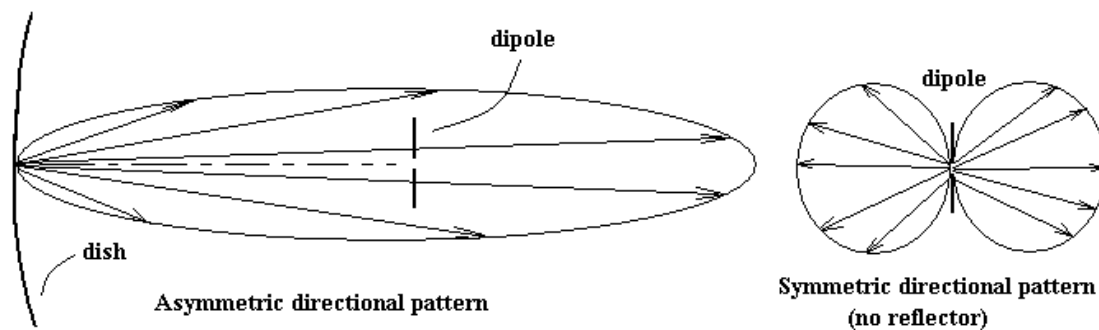


Рис. 14

Из рис. 14 видно, что такая антенна работает в точности как фотонный двигатель, изображенный на рис. 13, только диполь здесь используется вместо лампы. Сам же диполь тяги не дает, так как его диаграмма симметрична.

Кроме того, такие антенны как рупорная и волноводная (рис. 15) также могут работать как фотонные безопорные двигатели, причем их тяга зависит от остроты диаграммы направленности (от коэффициента усиления антенны).

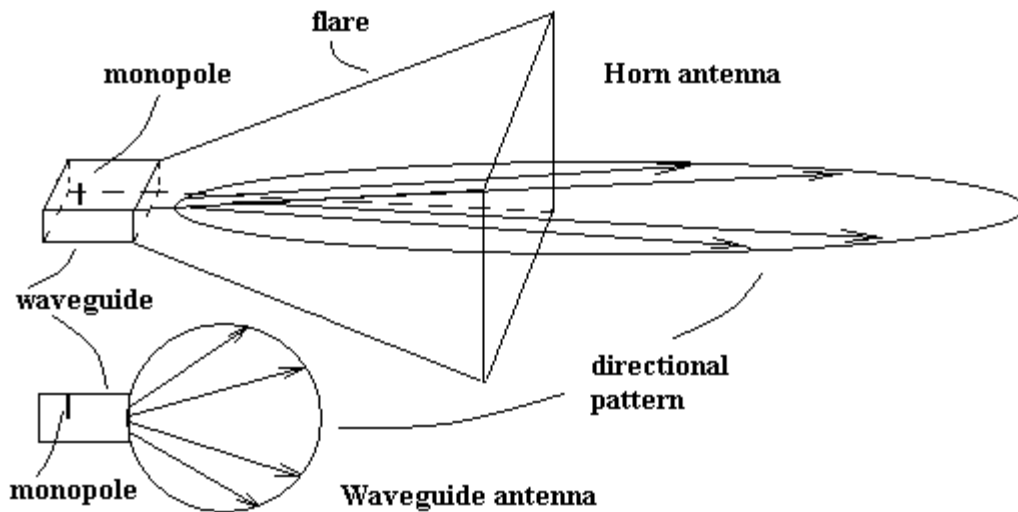


Рис. 15

В этом случае излучение отражается от передней стенки волновода.

К этой же категории относится и безопорный двигатель **EmDrive** [10], создающий тягу за счет нескомпенсированной силы, приложенной к стенке резонатора.

Можно оценить тягу таких фотонных двигателей.

Световое давление на зеркальную поверхность определяется по формуле:

$$p = \frac{w}{C}(1 + R) \quad [6] \quad (4.1)$$

где w – плотность мощности излучения (Вт/м²), C – скорость света (м/сек), $R = 1$ для зеркала и $R = 0$ для черной поверхности. Тогда сила тяги будет определяться по формуле:

$$F = pS = \frac{wS}{C}(1 + R) = \frac{W}{C}(1 + R) \quad (4.2)$$

где W – мощность источника излучения, S – площадь отражателя.

При мощности излучения в 10 кВт, отраженного от зеркального отражателя, сила тяги будет порядка 0.6×10^{-4} Н, что практически соответствует величине тяги, развиваемой одновитковым контуром с конденсатором, описанном в параграфе 3.2.2. Причем получается, что сила тяги не зависит от размера зеркала (если тот же телесный угол перехватывается зеркалом).

Кстати, передатчики телекоммуникационных спутников работают как фотонные двигатели и создают тягу в микроныютоны. Орбиту спутника, изменяющуюся, в частности, вследствие этого эффекта, вынуждены периодически компенсировать электроракетные двигатели коррекции.

Например, для спутника массой в 4000 кг ускорение при тяге 0.6×10^{-4} Н составит порядка $a = 0.15 \times 10^{-7}$ м/сек², что за год составит приращение скорости порядка $V = 0.47$ м/сек (фактически, порядка 0.2 м/сек с учетом диаграммы направленности антенны)

Это свидетельствует о том, что **фотонный и конденсаторный двигатели используют один и тот же принцип** – взаимодействие токов (наведенных электрической составляющей эл.маг. волны в случае фотонного двигателя) с магнитным полем (магнитным полем эл.маг. волны – для фотонного двигателя). То есть, конденсаторный двигатель фактически является близким родственником фотонного.

В то же время, подмагничивание переменным внешним полем позволит существенно увеличить силу тяги таких двигателей.

Но, к сожалению, подмагничивание может работать только для конденсаторных двигателей, питаемых относительно низкочастотными источниками (радиочастоты), а для фотонных двигателей подмагничивание очень трудно реализовать.

5. Заключение

Многие случаи, являющиеся классическими примерами реактивного движения, на самом деле являются только видимостью реактивного движения. В этих случаях тяга создается нескомпенсированной силой, приложенной к оболочке двигателя или к электрическому контуру. Особенно это очевидно в случае фотонного двигателя, являющегося по сути безопорным, и электроракетных двигателей, где проводящая среда нужна только для замыкания электрического контура. Разновидностью такого двигателя является электроразрядный двигатель постоянного тока с внешним магнитным полем и «вакуумный конденсаторный двигатель переменного тока» с собственным магнитным полем, где замыкание электрического контура достигается за счет токов смещения в вакууме. Такой двигатель (движитель) может считаться безопорным, не создающим реактивной струи с нулевым расходом рабочего тела. Характеристики описанных в данной статье электроразрядных двигателей (тяги и энергопотребление) близки к характеристикам современных электроракетных двигателей, в то время, как тяга «конденсаторных» двигателей с собственным магнитным полем может быть на порядки выше, чем у электроразрядных и традиционных электроракетных двигателей.

Supportless movement as the result of non-compensated force. Electrodynamic and Photonic Supportless Propulsion

Gennadii G. Ivtsenkov, p.h.d.

6. Список литературы

1. George P. Sutton, Oscar Biblarz, *Rocket propulsion elements*, A Wiley-Interscience Publication, 7-th ed., NY, 2001
2. Алемасов В.Е., Дерегалин А.Ф., Тишин А.П. *Теория ракетных двигателей*, М.: Машиностроение, 1980
3. *Теория ракетных двигателей*, Курс лекций, МВТУ 1971-1974
4. Квасников Л.А., Латышев Л.А. и др. *Теория и расчёт энергосиловых установок космических летательных аппаратов*. - М.: МАИ, 2001

5. Edward M. Purcell, David J. Morin, *Electricity and Magnetism*, 3d ed., Harvard University, Massachusetts, 2013
6. Яворский Б.М., Детлаф А.А., *Справочник по физике*, М., Наука, 1964
7. John D. Kraus, *Antennas*, Second Edition,
8. Ивченков Г.Г., «Специфика силового и индукционного взаимодействия постоянных магнитов с проводниками, токами и зарядами. Эквивалентные схемы постоянных магнитов. Униполярные и тангенциальные электромашин. Законы электромагнетизма. Физическая природа магнитного поля», <http://new-idea.kulichki.net/?mode=physics>
9. “Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях в магнетроне”, <http://vunivere.ru/work23046>
10. “Отчет НАСА подтверждает работу EmDrive”, <https://ria.ru/science/20161108/1480893636.html>
11. Владимир Королев, «ЦЕРН испытал сильнейшие сверхпроводящие магниты», <https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fplus1.ru%2Fnews%2F2015%2F12%2F01%2Fcern-world-magnetic-record>
12. Г. Ивченков, “К электродинамике движущихся заряженных тел. «Релятивистский» закон Кулона. Ускорители заряженных частиц”, <http://new-idea.kulichki.net/?mode=physics>

Дополнительный список

13. Андре Анго, *Математика для электро-и радиоинженеров*, М, Наука, 1967
14. *Физические величины*, Справочник, Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. , М, Энергоатомиздат, 1991