

# Волновой двигатель с внутренним расходом энергии электромагнитных колебаний

Ф. Ф. Менде

## Аннотация

В основе реактивной тяги лежит закон сохранения импульса. Если из замкнутой системы в каком-то направлении выбрасывается рабочее вещество, например масса, то всегда имеется импульс отдачи, который и является реактивной тягой. В фотонных двигателях рабочим веществом являются электромагнитные (ЭМ) волны. До появления работ с описанием двигателей типа EmDrive не были известны реактивные двигатели, в которых отсутствует выброс рабочего вещества. Рабочим веществом в двигателях такого типа являются электромагнитные волны, которые наружу двигателя не выходят, а образуют стоячую волну в резонаторе. Работы, проведенные китайскими учёными, которые установили такой двигатель на спутнике, доказали его работоспособность. Однако до настоящего времени отсутствует теоретическое обоснование работы таких двигателей. В предлагаемой статье сделана попытка найти физическое обоснование их работы.

Ключевые слова: реактивный двигатель, резонатор, электромагнитная волна, мощность, сила, двигатель EmDrive.

## 1. Введение

В основе реактивной тяги лежит закон сохранения импульса. Если из замкнутой системы в каком-то направлении выбрасывается масса, то всегда имеется импульс отдачи, который и является реактивной тягой.

Известно, что электромагнитные волны при падении на любую поверхность оказывают на неё давление. Если имеется антенна, которая излучает электромагнитные волны, то излучению таких волн всегда сопутствует импульс отдачи, противоположный направлению излучения ЭМ волн.

Известно, что существуют радиотехнические системы, которые обеспечивают излучение ЭМ волн в каком-то преимущественном направлении. Примером таких систем являются радиолокаторы, которые обеспечивают узкую диаграмму направленности

излучения ЭМ энергии в заданном направлении. При таком излучении излучающая антенна испытывает давление по направлению обратное направлению излучения энергии.

Реактивные двигатели, в которых тяга двигателя создается за счет истечения электромагнитного излучения, принято условно называть фотонными двигателями[1,2]. Главным преимуществом таких двигателей является максимально-возможная скорость истечения, равная скорости света в вакууме. Для ракетного аппарата это единственный широко известный способ достичь сколь-нибудь значительной доли световой скорости при разумных значениях числа Циолковского  $Z$ , характеризующего соотношение масс заправленной и пустой ракеты. Необходимо отметить, однако, что и в этом случае речь идет о числе  $Z$  порядка нескольких сотен, при технически реализованных значениях порядка 10 для многоступенчатых ракет. Главным недостатком фотонного двигателя является низкий КПД цепочки преобразования энергии от первичного источника до потока истечения электромагнитного излучения. Применение реакции аннигиляции для прямого получения истечения электромагнитного излучения не намного снижает остроту проблемы, так как необходимо учитывать потери на хранение антивещества (не говоря о его производстве) и трудности фокусировки получаемого излучения. Кроме того, как более реальные, рассматривались использование в качестве источника электромагнитного излучения термоядерной плазмы (в том числе и для генерации лазерного излучения) и использование излучения более длинноволнового диапазона. В первом случае остаются пока нерешенными проблемы генерации и поддержания в устойчивом состоянии плазмы с необходимыми параметрами. Во втором случае значительно упрощается задача фокусировки потока излучения, но резко снижает КПД двигательного комплекса.

## 2. Двигательная система EmDrive

Вопрос создания двигателя EmDrive, в котором отсутствует выброс наружу рабочего вещества в виде электромагнитного излучения, обсуждается довольно давно. В Википедии даже имеется статья с таким названием <https://ru.wikipedia.org/wiki/EmDrive> .

Приведём краткие тезисы этой статьи.

EmDrive - двигательная установка, состоящая из магнетрона и резонатора, предполагаемая работоспособность которой не согласуется с современными научными представлениями.

Установка EmDrive была впервые предложена британским инженером Роджером Шойером (англ. Roger John Shawyer) в 1999 году. Используемый в ней магнетрон генерирует микроволны, энергия их колебаний накапливается в резонаторе высокой добротности, и, по заявлениям автора, стоячая волна электромагнитных колебаний в замкнутом резонаторе специальной формы является источником тяги. Вне резонатора не испускается не только вещество, но и электромагнитное излучение, иными словами, EmDrive не является фотонным двигателем. Но даже если бы создаваемые магнетроном микроволны полностью излучались в одном направлении, полученная тяга была бы значительно меньше заявленной тяги EmDrive.

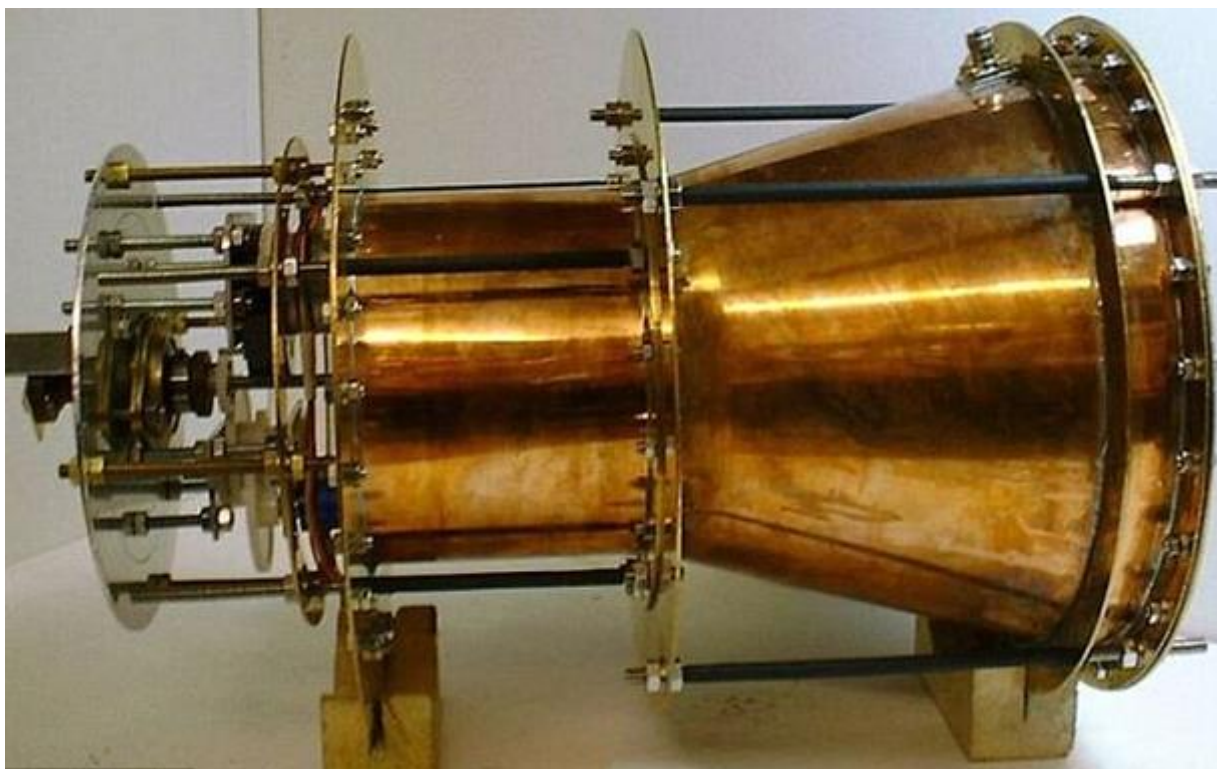
Отсутствие расходуемого рабочего компонента у этого двигателя, по-видимому, нарушает закон сохранения импульса, а какое-либо общепринятое объяснение этого противоречия авторами разработок не предложено. Сам Шойер опубликовал нерецензированную работу с объяснением, но физики отмечают, что теория радиационного давления более сложна, чем упрощённый аппарат, использованный Шойером, а его объяснения в целом противоречивы.

Экспериментальные данные не дают однозначного подтверждения или опровержения работоспособности подобной установки, что связано, в том числе, с небольшой величиной предполагаемого эффекта, сравнимой с погрешностями измерения.

Физики объясняют полученные экспериментаторами немногочисленные положительные результаты ошибками в экспериментах. Единственное опубликованное в научном журнале независимое исследование, которое показало положительный результат, это эксперимент группы Eagleworks 2016 года; в нём были устранены многие источники возможных ошибок, однако научная группа из Дрезденского технического университета предполагает, что полученная группой Eagleworks тяга возникала из-за влияния магнитного поля Земли на элементы установки, а не из-за самого EmDrive.

В декабре 2016 года, ссылаясь на пресс-конференцию одной из дочерних компаний Китайской академии космических технологий (CAST), издание International Business Times сообщило, что правительство КНР с 2010 года финансирует исследования двигателя, а прототипы EmDrive были отправлены в космос для проверки на борту космической лаборатории «Тяньгун-2». Доктор Чэнь Юэ (Chen Yue) из CAST, согласно публикации International Business Times, подтвердил факт изготовления прототипа двигателя для тестирования на низкой околоземной орбите.

В сентябре 2017 года появились новые сообщения об успешном создании работающего прототипа двигателя EmDrive в Китае. Приведена даже фотография двигателя.



Теоретическая физика предсказывает, что EmDrive неработоспособен и любые положительные результаты экспериментов могут быть лишь артефактами измерений, поскольку работоспособность EmDrive противоречила бы закону сохранения импульса. Для предполагаемого факта работоспособности EmDrive были предложены различные теоретические объяснения, противоречащие установленным в физике представлениям.

В предлагаемой статье сделана попытка найти теоретическое обоснование работы двигателей EmDrive.

### 3. Физика пондеромоторного действие электромагнитных полей

Главной задачей индукции является нахождение закономерностей возникновения электрических полей, а, следовательно, и сил, действующих на заряд, в данной точке пространства, т.к. только электрические поля, генерируемые тем или иным способом, оказывают силовые воздействия на заряд. Такие поля можно получить, изменяя расположение других зарядов вокруг данной точки пространства или ускоряя их. Если

вокруг рассматриваемой точки имеется какая-то статическая конфигурация зарядов, то напряженность электрического поля в данной точке определяется соотношением  $\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi$ , где  $\varphi$  скалярный потенциал в заданной точке, определяемый данной конфигурацией. Другой конфигурации зарядов соответствуют другие значения скалярного потенциала, а, следовательно, и другие значения напряженности электрического поля в заданной точке. Но перемещение зарядов в обязательном порядке сопряжено с их ускорением и последующим замедлением. Ускорение или замедление зарядов также может приводить к возникновению в окружающем пространстве индукционных электрических полей. Может возникнуть и другая стационарная ситуация, когда, например, после ускорения заряды движутся с постоянной скоростью в окрестностях рассматриваемой точки, например, по круговым или другим замкнутым траекториям. В этом случае также могут возникать конфигурационные электрические поля за счет наличия пространственных градиентов скоростей в потоках движущихся зарядов.

Основным законом индукции в электродинамике является закон Фарадея [3-5]. В современной электродинамике он записывается в виде

$$\oint \mathbf{E} d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\mu \int \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} d\mathbf{s} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{s}, \quad (3.1)$$

где  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  - вектор магнитной индукции,  $\Phi_B = \mu \int \mathbf{H} d\mathbf{s}$  - поток магнитной индукции, а  $\mu = \tilde{\mu} \mu_0$  - магнитная проницаемость среды. Из этого закона следует, что циркуляция вектора электрического поля равна изменению потока магнитной индукции через площадку, которую охватывает данный контур. Сразу необходимо отметить, что рассматриваемый закон представляет процессы взаимной индукции, т.к. для получения циркуляции вектора  $\mathbf{E}$  мы берем стороннее магнитное поле, сформированное сторонними источниками. Из (3.1) получают первое уравнение Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t. \quad (3.2)$$

Сразу укажем на терминологическую ошибку. Закон Фарадея следует называть законом не электромагнитной, как это принято в существующей литературе, а магнитоэлектрической индукции, т.к. изменение магнитных полей приводит к возникновению электрических полей, а не наоборот.

Введём векторный магнитный потенциал магнитного поля  $\mathbf{A}_H$  :

$$\mu \oint \mathbf{A}_H d\mathbf{l} = \Phi_B,$$

где контур интегрирования совпадает с контуром интегрирования в соотношении (3.1), а вектор  $\mathbf{A}_H$  определен на всех его участках, тогда

$$\mathbf{E} = -\mu \partial \mathbf{A}_H / \partial t. \quad (3.3)$$

Введенный вектор  $\mathbf{A}_H$  предполагает локальную связь между ним и электрическим полем, а также между пространственными производными этого вектора и магнитным полем. Он связан с магнитным полем:

$$\text{rot } \mathbf{A}_H = \mathbf{H}. \quad (3.4)$$

Таким образом, если определён вектор  $\mathbf{A}_H$ , его локальная производная по времени в любой точке пространства, а также его пространственные производные, то можно определять сразу и вектор  $\mathbf{E}$ , и вектор  $\mathbf{H}$ .

Векторный потенциал магнитного поля можно непосредственно получить и из закона Ампера, который был известен задолго до уравнений Максвелла. Этот закон, выраженный в векторной форме, определяет магнитное поле в точке  $x, y, z$  в следующем виде:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3},$$

где  $I$  - ток в элементе  $d\mathbf{l}$ ,  $\mathbf{r}$  - вектор, направленный из  $d\mathbf{l}$  в точку  $x, y, z$ .

Можно показать, что

$$\frac{[\mathbf{r} d\mathbf{l}]}{r^3} = \text{grad} \left( \frac{1}{r} \right) \times d\mathbf{l}; \quad \text{grad} \left( \frac{1}{r} \right) \times d\mathbf{l} = \text{rot} \left( \frac{d\mathbf{l}}{r} \right) - \frac{1}{r} \text{rot } d\mathbf{l}.$$

Но ротор  $d\mathbf{l}$  равен нулю и поэтому окончательно

$$\mathbf{H} = \text{rot} \int I \left( \frac{d\mathbf{l}}{4\pi r} \right) = \text{rot } \mathbf{A}_H,$$

где

$$\mathbf{A}_H = \int I \left( \frac{d\mathbf{l}}{4\pi r} \right).$$

В данном случае векторный потенциал определён уже не через магнитный поток, а через ток, текущий через определённый участок проводника. Замечательным свойством этого выражения является то, что векторный потенциал зависит от расстояния до точки наблюдения, как  $1/r$ . Именно это его свойство и позволяет получить законы излучения.

Поскольку  $I = gv$ , где  $g$  - погонный заряд (количество зарядов, приходящееся на единицу длины проводника), далее получаем:

$$\mathbf{A}_H = \int \frac{gv \, d\mathbf{l}}{4\pi r}.$$

Для одиночного заряда  $e$  это соотношение принимает вид:

$$\mathbf{A}_H = \frac{e\mathbf{v}}{4\pi r},$$

а поскольку выполняется соотношение (3.3), то

$$\mathbf{E} = -\mu \int \frac{g \frac{\partial v}{\partial t} d\mathbf{l}}{4\pi r} = -\mu \int \frac{ga \, d\mathbf{l}}{4\pi r},$$

где  $a$  - ускорение зарядов.

Для одиночного заряда это соотношение выглядит следующим образом:

$$\mathbf{E} = -\frac{\mu e \mathbf{a}}{4\pi r}.$$

Это и есть закон индукции, который связывает возникновение электрических полей непосредственно с ускорением заряда.

Если нужно найти индуцируемые электрические поля при движении в поле пространственно-меняющегося векторного потенциала, следует использовать полную производную:

$$\mathbf{E}' = -\mu d\mathbf{A}_H / dt. \quad (3.5)$$

Штрих около вектора  $\mathbf{E}$  означает, что это поле определяется в движущейся системе координат. Это означает, что электрическое поле может иметь не только локальную, но и конвекционную составляющую, т.е. может изменяться, как за счет локального изменения времени, так и за счет движения в пространственно-меняющемся поле векторного потенциала. При этом соотношение (3.5) можно переписать следующим образом:

$$\mathbf{E}' = -\mu \frac{\partial \mathbf{A}_H}{\partial t} - \mu (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{A}_H,$$

где  $\mathbf{v}$  - скорость штрихованной системы.

Конвективная часть силы, действующая на заряд в движущейся системе,

$$\mathbf{F}'_{v,1} = -\mu e (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{A}_H$$

зависит только от пространственных производных векторного потенциала и скорости заряда.

Заряд, движущийся в поле векторного потенциала  $\mathbf{A}_H$  со скоростью  $\mathbf{v}$ , обладает потенциальной энергией [4]

$$W = -e\mu(\mathbf{v}\mathbf{A}_H).$$

Поэтому должна существовать еще одна сила, действующая на заряд в движущейся системе координат, а именно:

$$\mathbf{F}'_{v,2} = -\text{grad} W = e\mu \text{grad}(\mathbf{v}\mathbf{A}_H).$$

Таким образом, величина  $(\mathbf{v}\mathbf{A}_H)$  играет такую же роль, как и скалярный потенциал  $\varphi$ , градиент которого также дает силу.

Наиболее просто поредомоторное действие электромагнитных полей можно показать на примере сверхпроводников.

Макроскопические электродинамические свойства сверхпроводников описываются феноменологическими уравнениями Лондонов:

$$\frac{d\mathbf{j}}{dt} = \frac{1}{\mu_0\lambda_L^2} \mathbf{E}, \quad (3.6)$$

$$\Delta\mathbf{H} = \frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{H} = 0. \quad (3.7)$$

Здесь  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{j}$  - электрическое, магнитное поля и плотность тока

$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_0}{\mu_0 n e_0}}$  - глубина проникновения поля в сверхпроводник. В этом соотношении  $m_0$ ,

$e_0$ ,  $n$  - масса, заряд и плотность электронов соответственно.

Уравнения дают связь между токами и полями в сверхпроводниках.

Учитывая (3.4), из (3.6) и (3.7) получаем

$$\mathbf{j} = nev = \frac{1}{\lambda_L^2} \mathbf{A} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{H}_0, \quad (3.8)$$

где  $\mathbf{v}$  - скорость электронов, а  $\mathbf{H}_0$  - напряженность магнитного поля на поверхности сверхпроводника.

Если взять  $x$  компоненту магнитного поля и  $y$  компоненту плотности тока, то, учитывая (3.6) и (3.8) получим:



$$F'_{v,2,z} = \frac{2\mu_0}{n\lambda_L} H_{0,x}^2 e^{-\frac{2z}{\lambda}}. \quad (3.9)$$

Соотношение (3.9) определяет силу, действующую на единичный электрон в области глубины проникновения магнитного поля. В том случае, когда магнитное поле переменное  $H_x = H_{0,x} \sin \omega t$  т.е. токи на поверхности сверхпроводника индуцируются при помощи внешних переменных электрических полей падающей электромагнитной волны, соотношение (3.9) перепишется:

$$F'_{v,2,z} = \frac{2\mu_0}{n\lambda_L} H_{0,x}^2 \sin^2 \omega t e^{-\frac{2z}{\lambda}}.$$

Учитывая это соотношение, элемент силы, действующий на единичную поверхность толщиной  $dz$  в направлении оси  $z$ , определяется соотношением

$$dF'_{v,2,z} = \frac{2\mu_0}{n\lambda_L} H_{0,x}^2 \sin^2 \omega t e^{-\frac{2z}{\lambda}} dz. \quad (3.10)$$

Интегрируя соотношение (3.10) по координате  $z$  и усредняя по времени, получим суммарную силу, действующую на единичный квадрат поверхности сверхпроводника:

$$F_\Sigma = \frac{1}{2} \mu_0 H_{0,x}^2. \quad (3.11)$$

Таким образом, сила, действующая на единичную площадку сверхпроводника, при падении на неё ЭМ волны равна удельной энергии магнитного поля такой волны. Электрические и магнитные поля ЭМ волны в свободном пространстве связаны соотношением

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = Z, \quad (3.12)$$

где  $Z$  - волновое сопротивление свободного пространства. Из (3.11) и (3.12) следует

$$F_\Sigma = \mu_0 H_0^2 = \varepsilon_0 E_0^2.$$

Таким образом, давление, которое оказывает ЭМ волна при её падении на сверхпроводник, равна значению её удельной энергии. Такая ситуация характерна для случая полного отражения ЭМ волны от поверхности, на которую она падает, поскольку сверхпроводник в рассмотренном варианте ЭМ волну не поглощает.

Феноменологический подход к решению проблемы пондеромоторного действия электромагнитных полей рассмотрен в монографии [6].

Рассмотрим плоскую линейно-поляризованную электромагнитную волну, распространяющуюся в сторону отрицательных значений  $z$ .

$$\begin{aligned} E_x &= E \cos(\omega t - kz); \quad E_y = 0; \\ E_z &= 0; \quad H_z = 0; \quad H_x = 0; \quad , \\ H_y &= E \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \cos(\omega t - kz). \end{aligned}$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$  - волновое число,  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$  - скорость света в вакууме.

Воспользуемся системой максвелловских натяжений [3]. Если волна падает на поверхность, то для компонент тензора натяжений получаем:

$$\begin{aligned} T_{xx} &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_x^2 - \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = 0 \\ T_{yy} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_0 E_x^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = 0 \\ T_{zz} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_0 E_x^2 - \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = -\varepsilon_0 E_x^2 \cos^2(\omega t - kz) \end{aligned}$$

Нормальная составляющая тензора натяжений, равная удельной силе, действующей на единичную поверхность, составляет

$$F_0 = T_{zz} = -\varepsilon_0 E_x^2 \cos^2(\omega t - kz).$$

Эта сила направлена в сторону плоскости, на которую падает волна.

Если падающая волна не полностью поглощается плоскостью, то при вычислении натяжения следует учесть и отраженную волну.

$$\begin{aligned} E_{x(nad)} + E_{x(omp)} &= (E_{(nad)} + E_{(omp)}) \cos \omega t \\ H_{y(nad)} + H_{y(omp)} &= \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} (E_{(nad)} + E_{(omp)}) \cos \omega t \end{aligned}$$

При этом средние значения компонент тензора натяжений запишутся:

$$\begin{aligned}\bar{T}_{xx} &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} + E_{(omp)})^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} - E_{(omp)})^2 = \varepsilon_0 E_{(nad)} E_{(omp)} \\ \bar{T}_{yy} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} + E_{(omp)})^2 + \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} - E_{(omp)})^2 = \varepsilon_0 E_{(nad)} E_{(omp)} \\ \bar{T}_{zz} &= -\frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} + E_{(omp)})^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)} - E_{(omp)})^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)}^2 + E_{(omp)}^2)\end{aligned}$$

Следовательно, единичная сила, действующая на поверхность, будет равна

$$F_0 = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(nad)}^2 + E_{(omp)}^2)$$

Таким образом, давление на поверхность зависит от соотношения между падающей и отраженной волной. Введём этот коэффициент как

$$K = \frac{E_{(nad)}^2}{E_{(omp)}^2}.$$

Тогда выражение для удельной силы запишется

$$F_0 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_{(nad)}^2 (1 - K).$$

Из приведенных соотношений видно, что сила, действующая на полностью отражающую поверхность, в два раза больше, чем сила действующая на полностью поглощающую поверхность. Но эти силы не велики. Если на поверхность падает мощность 3 Вт, то давление, оказываемое на полностью поглощающую поверхность, составляет  $10^{-8}$  Н, а давление, оказываемое на полностью отражающую поверхность будет равно  $2 \times 10^{-8}$  Н. И даже при повышении мощности до 30 кВт давление составит всего лишь  $10^{-4}$  Н и  $2 \times 10^{-4}$  Н соответственно.

#### 4. Двигатель с внутренним расходом волновой энергии

Возьмём квадратную металлическую пластинку толщиной  $d$  и длиной ребра  $L$  и подключим к ней источник напряжения  $U$ . Если удельное сопротивление металла пластинки равно  $\rho$ , то её полное сопротивление определится соотношением

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{dL} = \rho \frac{1}{d} \text{ и не будет зависеть от длины ребра квадрата. В этом случае принято}$$

говорить о сопротивлении, которое приходится на единичный квадрат поверхности. Напряженность электрического поля на поверхности пластины и внутри неё будет равна

$E = \frac{U}{L}$ , а ток, текущий через пластинку, составит  $I = \frac{Ud}{\rho}$ . Плотность тока в пластинке в этом случае будет равна  $j = \frac{I}{S} = \frac{E}{\rho}$ .

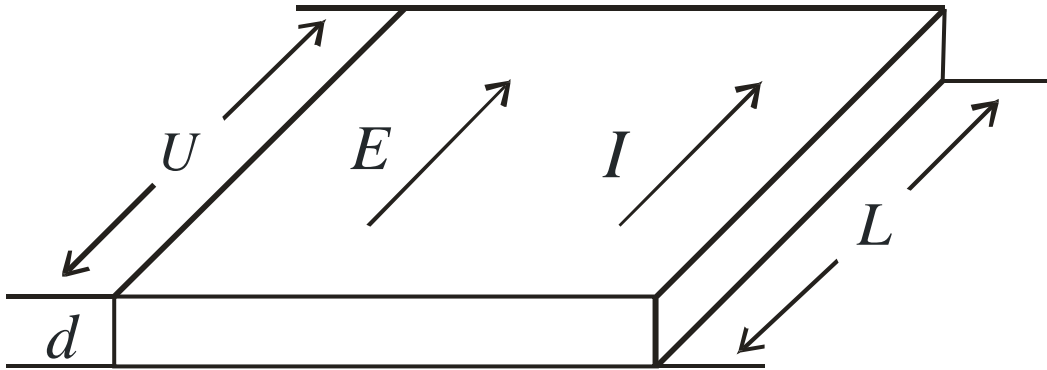


Рис. 1. Поля и токи в квадратной металлической пластинке

Если имеется электромагнитная волна, падающая на металлическую поверхность, то имеет место случай, когда в связи с наличием скин-эффекта волна проникает только на определённую глубину. Если имеется полупространство, когда толщина пластинки стремиться к бесконечности, то вводится комплексная глубина проникновения

$$\delta_{\kappa} = \frac{1}{H_T(0) \int_0^{\infty} H_T(z) dz} = \delta_1 + i\delta_2,$$

где  $H_T(0)$  - тангенциальная составляющая магнитного поля волны на поверхности, а координата  $z$  направлена вглубь металла.

Реактивная и активная составляющие поверхностного импеданса в этом случае записываются

$$X = \omega\mu_0\delta_1, \quad R = \omega\mu_0\delta_2.$$

Величина  $R$  представляет активную составляющую поверхностного сопротивления приходящуюся на единичный квадрат поверхности.

Если волновое сопротивление свободного пространства  $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  значительно больше, чем  $R$ , то такая волна практически полностью отражается от такой поверхности.

Если же ставится задача полного поглощения падающей волны заданной поверхностью, то следует организовать такую поверхность у которой  $Z = R$ , а  $X = 0$ .

Рассмотрим закороченный волновод, по которому распространяется ЭМ волна (Рис. 2.)



Рис. 2. Закороченный волновод

Если торцевой стенкой волновода является металлическая пластинка с высокой проводимостью (например медной), то волна практически полностью отразится от этой стенки. Если же в качестве торцевой стенки используется поглощающая пластинка с заданными выше свойствами, то волна будет полностью поглощена этой стенкой. Именно эти случаи и рассмотрены в предыдущем разделе, когда вычислялось удельное давление волны, падающей на поверхности с различными свойствами.

Рассмотрим случай, когда в конце волновода расположена не сплошная торцевая стенка, а объёмный резонатор, связанный с волноводом отверстием в этой стенке (Рис. 3.).

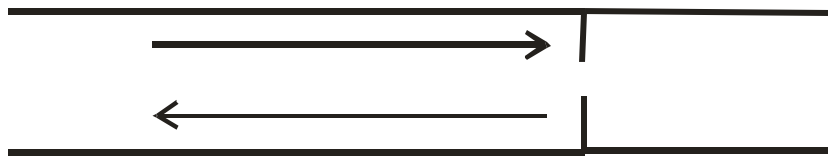


Рис. 3. Волновод, нагруженный резонатором

Процессы, происходящие в такой системе хорошо известны [7]. В начальный момент времени, когда в резонаторе ещё не установились колебания, падающая на перегородку волна, частота которой равна резонансной частоте резонатора, практически полностью отражается от перегородки. По мере возрастания амплитуды колебаний в резонаторе через отверстие в перегородке начинает излучаться обратная волна, которая начинает компенсировать падающую волну. И в установившемся режиме волна, выходящая из резонатора через отверстие в перегородке, полностью компенсирует падающую волну, и резонатор оказывается согласованным с волноводом.

В этом случае вся мощность, передаваемая по волноводу, поглощается в резонаторе, а амплитуда колебаний ЭМ волны в резонаторе оказывается в  $Q$  раз больше чем в волноводе, где  $Q$  добротность резонатора. Это означает, что давление на стенки резонатора, оказываемое ЭМ волной, будет в  $Q^2$  раз больше, чем в волноводе, поскольку давление волны на стенки резонатора пропорционально квадрату электрического поля.

Это обстоятельство даёт возможность создать двигатель с внутренним расходом волновой энергии (Рис. 4).

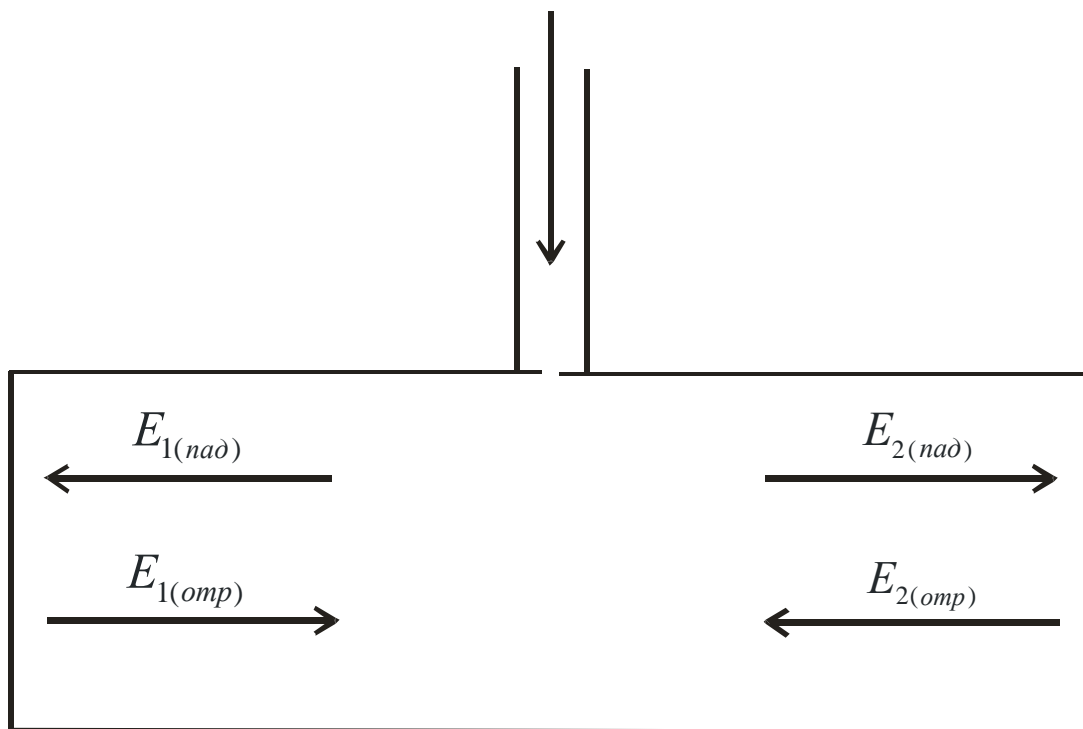


Рис. 4. Схема двигателя с внутренним расходом волновой энергии

Двигатель состоит из объёмного резонатора, энергия в который вводится при помощи волновода. На схеме стрелками изображены электрические поля, падающие и отраженные от противоположных торцевых стенок резонатора. Поверхностное сопротивление торцевых стенок следует подобрать так, чтобы коэффициенты отражения от этих стенок сильно отличались. Тогда сила, действующая на стенку, коэффициент отражения у которой значительно выше, будет значительно больше, чем у противоположной стенки. В направлении этой стенки и будет направленны сила тяги двигателя.

Рассмотрим конкретный пример. Если по волноводу передаётся мощность 3 Вт, то давление, оказываемое на его металлическую торцевую стенку (Рис. 2), равно  $2 \times 10^{-8}$  Н. В резонаторе это давление увеличивается в  $Q^2$  раз. В случае использования нормальных

металлов, таких как медь и серебро, для объёмных резонаторов достижимы значения добротности порядка  $10^4$  [7], поэтому при мощности генератора 3 Вт достижимые значения силы тяги составят порядка 2 Н, а при мощности генератора 3 кВт эта величина составит  $2 \times 10^3$  Н. Чтобы уменьшить влияние на добротность резонатора торцевой стенки с повышенным поверхностным сопротивлением, следует увеличивать длину резонатора.

## 5. Заключение

В основе реактивной тяги лежит закон сохранения импульса. Если из замкнутой системы в каком-то направлении выбрасывается рабочее вещество, например масса, то всегда имеется импульс отдачи, который и является реактивной тягой. В фотонных двигателях рабочим веществом являются электромагнитные (ЭМ) волны. До появления работ с описанием двигателей типа EmDrive не были известны реактивные двигатели, в которых отсутствует выброс рабочего вещества. Рабочим веществом в двигателях такого типа являются электромагнитные волны, которые наружу двигателя не выходят, а образуют стоячую волну в резонаторе. Работы, проведенные китайскими учёными, которые установили такой двигатель на спутнике, доказали его работоспособность. Однако до настоящего времени отсутствует теоретическое обоснование работы таких двигателей. В предлагаемой статье сделана попытка найти физическое обоснование их работы.

## Литература

1. Бурдаков В., Данилов Ю. - Ракеты будущего. - М.: [Атомиздат](#), 1980. с. 138.
2. Curtis G. Callan, Jr. (1982). «Dyon-fermion dynamics». *Phys. Rev. D* **26** (8): 2058–206
3. Тамм И. Е. Основы теории электричества М.: Наука, 1989 - 504 с.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. М: Мир, 1977.
5. Сидорович А. М. К бинарно-инверсной интерпритации уравнений Максвелла и индукционных явлений. *Вестн АН БССР. Сер фізм.-мат. Навук*, 1980, №3, с. 126.
6. Пондеромоторное действие электромагнитного поля (теория и приложения). Под ред. Р. А. Валитова. М., «Сов. Радио», 1975, 232 с.

7. Менде Ф. Ф., Бондаренко И. Н., Трубицын А. В. Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы, Киев, Наукова думка, 1978, 271 с.