
Ф.Ф. МЕНДЕ,
доктор техн. наук, директор
E-mail: fedormende@gmail.com
НИИ Криогенного приборостроения
Физико-технический институт низких темпера-
тур им Б.И. Веркина НАН Украины
Харьков, Украина

ВОЛНОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ С ВНУТРЕННИМ РАСХОДОМ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

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 учеными, 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.

F.F. MENDE,
Doctor of Techn. Sciences, Director
Research institute for cryogenic instrument
engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature
Physics and Engineering NAS Ukraine
Kharkov, Ukraine
E-mail: fedormende@gmail.com

WAVE ENGINE WITH INTERNAL ENERGY CONSUMPTION OF ELECTROMAGNETIC CONES

The basis of reactive traction is the law of conservation of momentum. If a working substance is ejected from a closed system in some direction, for example mass, then there is always a recoil momentum, which is a reactive thrust. In photon engines, real electromagnetic (EM) waves are working. Empresa EmDrive was not known for jet engines, in which the release of the working substance remained. The working substance in such types of electromagnetic waves, which do not emerge outside the engine, as well as a standing wave in the resonator. The work carried out by Chinese scientists who installed such an engine on the satellite proved its efficiency. However, until now there is no theoretical justification for the operation of such engines. The proposed article attempts to find a physical basis for their work.

Key words: jet engine, resonator, electromagnetic wave, power, power, EmDrive engine.

DOI: 10.25791/infizik.10.2018.

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 нее 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 движительного 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>.

Приведем 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 г. 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 нерцензированную работу с объяснением, но физики отмечают, что теория радиационного давления более сложна, чем упрощенный 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 г.; в нем 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 г., ссылаясь на пресс-конференцию одной из дочерних компаний Китайской академии космических технологий (CAST), издание International Business Times сообщило, что правительство КНР с 2010 г. 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 г. 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 $\mathbf{E} = -\text{grad}\phi$, где ϕ – 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; $\mu = \mu_0$ – 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

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

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.

Введем 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 определен 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

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

$$\text{grad} \left(\frac{1}{r} \right) \times d\mathbf{l} = \text{rot} \left(\frac{d\mathbf{l}}{r} \right) - \frac{1}{r} \text{rot} d\mathbf{l}.$$

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 определен уже не через магнитный поток, а через ток, текущий через определенный 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:

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

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:

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

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 ϕ , градиент которого также дает силу.

Наиболее просто поредеромоторное 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; \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) переписывается:

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

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 нее ЭМ волны равна удельной энергии магнитного поля такой волны. Электрические и магнитные

поля ЭМ волны в свободном пространстве связаны соотношением

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z, \quad (3.12)$$

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

$$F_\Sigma = \mu_0 H_0^2 = \epsilon_0 E_0^2.$$

Таким образом, давление, которое оказывает ЭМ волна при ее падении на сверхпроводник, равно значению ее 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 .

$$E_x = E \cos(\omega t - kz); \quad E_y = 0;$$

$$E_z = 0; \quad H_z = 0; \quad H_x = 0;$$

$$H_y = E \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cos(\omega t - kz),$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ – волновое число; $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ – скорость света в вакууме.

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

$$T_{xx} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_x^2 - \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = 0$$

$$T_{yy} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 E_x^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = 0$$

$$T_{zz} = -\frac{1}{2} \epsilon_0 E_x^2 - \frac{1}{2} \mu_0 H_y^2 = -\epsilon_0 E_x^2 \cos^2(\omega t - kz).$$

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

$$F_0 = T_{zz} = -\epsilon_0 E_x^2 \cos^2(\omega t - kz).$$

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.

$$E_{x(\text{пад})} + E_{x(\text{отр})} = (E_{(\text{пад})} + E_{(\text{отр})}) \cos \omega t$$

$$H_{y(\text{пад})} + H_{y(\text{отр})} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (E_{(\text{пад})} + E_{(\text{отр})}) \cos \omega t.$$

При этом средние значения компонент тензора напряжений запишутся:

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

Следовательно, единичная сила, действующая на поверхность, будет равна

$$F_0 = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 (E_{(\text{пад})}^2 + E_{(\text{отр})}^2).$$

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

$$K = \frac{E_{(\text{пад})}^2}{E_{(\text{отр})}^2}.$$

Тогда выражение для удельной силы запишется

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

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 $2 \cdot 10^{-8}$ Н. И даже при повышении мощности до 30 кВт давление составит всего лишь 10^{-4} Н и $2 \cdot 10^{-4}$ Н соответственно.

4. Двигатель с внутренним расходом волновой энергии

Возьмем квадратную металлическую пластинку толщиной d длиной ребра L и подключим

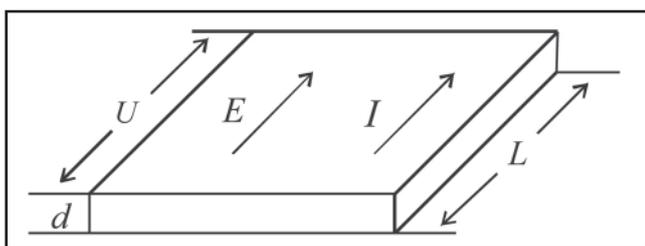


Рис. 1. Поля и токи в квадратной металлической пластинке

к ней источник напряжения U . Если удельное сопротивление металла пластинки равно ρ , то ее полное сопротивление определится соотношением $R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{dL} = \rho \frac{1}{d}$ 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 нее 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 $j = \frac{I}{S} = \frac{E}{\rho}$.

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

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

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

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

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

Если волновое сопротивление свободного пространства $Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ 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.)

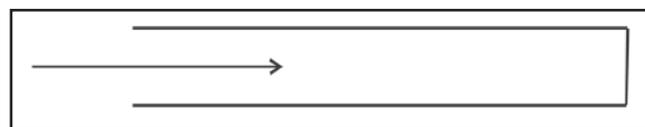


Рис. 2. Закороченный волновод

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 объемный резонатор, связанный с волноводом отверстием в этой стенке (рис. 3.).

Процессы, происходящие в такой системе хорошо известны [7]. В начальный момент времени, когда в резонаторе еще не установились колебания, падающая на перегородку волна, частота которой рана 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, предаваемая 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 означат, 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 дает возможность создать двигатель с внутренним расходом волновой энергии (рис. 4).

Двигатель состоит из объемного 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

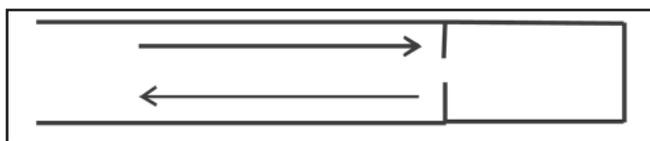


Рис. 3. Волновод, нагруженный резонатором

сила, действующая на стенку, коэффициент отражения у которой значительно выше, будет значительно больше, чем у противоположной стенки, В направлении этой стенки и будет направлены сила тяги двигателя.

Рассмотрим конкретный пример. Если по волноводу передается мощность 3 Вт, то давление, оказываемое на его металлическую торцевую стенку (рис. 2), равно $2 \cdot 10^{-8}$ Н. В резонаторе это давление увеличивается в Q^2 раз. В случае использования нормальных металлов, таких как медь и серебро, для объемных 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 $2 \cdot 10^3$ 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 описание 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 учеными, которые установили такой двигатель на спутнике, доказали его работоспособность. Однако до настоящего времени отсутствует теоретическое

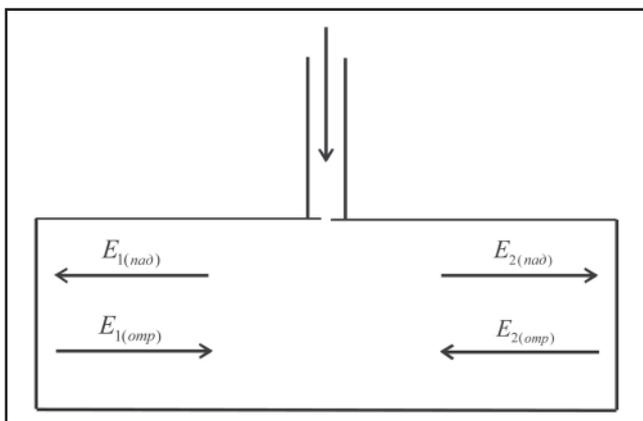


Рис. 4. Схема двигателя с внутренним расходом волновой энергии

обоснование работы таких двигателей. В предлагаемой статье сделана попытка найти физическое обоснование их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Бурдаков В., Данилов Ю. *Ракеты будущего*. М.: Атомиздат, 1980. 138 с. [Burdakov V., Danilov Yu. *Missiles of the future*. Moscow: Publishing House «Atomizdat», 1980. 138 p.] (in Russian).
2. Curtis G. Callan, Jr. Dyon-fermion dynamics. *Phys. Rev. D*. 1982. Vol. 26 (8). Pp. 2058...206.
3. Тамм И.Е. *Основы теории электричества*. М.: Наука, 1989. 504 с. [Tamm I.E. *Fundamentals of the theory of electricity*. Moscow: Publishing House «Nauka», 1989. 504 p.] (in Russian).
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. М.: Мир, 1977 [Feynman R., Leyton R., Sends M. *Feynman lectures on physics*. Moscow: Publishing House «Mir», 1977] (in Russian).
5. Сидорович А. М. К бинарно-инверсной интерпретации уравнений Максвелла и индукционных явлений // *Вест. АН БССР. Сер. физ.-мат. наук*. 1980. № 3. С. 126 [Sidorovich A.M. To the binary-inverse interpretation of Maxwell's equations and induction phenomena. *Bulletin of the AN BSSR. Ser. Phys. Math. Nauk*. 1980. № 3. P. 126].
6. *Пондеромоторное действие электромагнитного поля (теория и приложения)* / Под ред. Р.А. Валитова. М.: «Сов. Радио», 1975, 232 с. [*Ponderomotive effect of an electromagnetic field (theory and applications)*]. Ed. by R.A. Valitov. Moscow: Publishing House «Sov. Radio», 1975, 232 p.] (in Russian).
7. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. *Сверхпроводящие и охлаждаемые резонансные системы*. Киев: Наукова думка, 1978, 271 с. [Mende F.F., Bondarenko I.N., Trubitsyn A.V. *Superconducting and cooled resonant systems*. Kiev: Naukova dumka, 1978, 271 p.]

Сведения об авторе

Менде Федор Федорович, доктор техн. наук, директор

E-mail: fedormende@gmail.com

НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур

им. Б.И. Веркина НАН Украины

61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47

Information about author

Mende Fedor F., Doctor of Techn. Sciences, Director

E-mail: fedormende@gmail.com

Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics

and Engineering NAS Ukraine

61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47