

Вариант теории двигателя EmDrive

О взаимодействии незаряженных макрочастиц с несимметричной геометрией во внешнем СВЧ электрическом поле.

Михаил Мендельбаум

(К.т.н. по специальности «Преобразование видов энергии»)

В статье показано, как у двигателя EmDrive нескомпенсированный механический момент измеренной в эксперименте величины возникает вследствие электрического взаимодействия поляризованных внешним электрическим СВЧ полем поверхностных слоёв металла камеры двигателя с поляризующим полем.

«Физику, математику и инженеру дали задание найти объём красного резинового мячика. Физик погрузил мяч в стакан с водой и измерил объём вытесненной жидкости. Математик измерил диаметр мяча и рассчитал тройной интеграл. Инженер достал из стола свою «Таблицу объёмов красных резиновых мячей» и нашёл нужное значение». Бородатый анекдот, но что-то рациональное есть в каждом и в смеси этих подходов...

О двигателе

Так называемый электромагнитный двигатель, точнее движитель EmDrive, изобретенный Роджером Шауэром (Roger Shawyer) [1] неоднократно построен, испытан, в том числе в космосе, и демонстрирует [1-6] парадоксальную с точки зрения классических теорий безопорную тягу. То есть механический момент без ускоряемого рабочего тела. Создается впечатление, что EmDrive якобы нарушает закон сохранения импульса. Он представляет собой камеру конусообразной формы, в которую направлен выход от одного или большего количества излучателей микроволнового излучения. Этот двигатель вырабатывает небольшую силу тяги, потребляя лишь одну электрическую энергию, которую он может черпать от солнечных батарей, ядерного реактора или другого источника. Рис 1-2 взяты из [2].

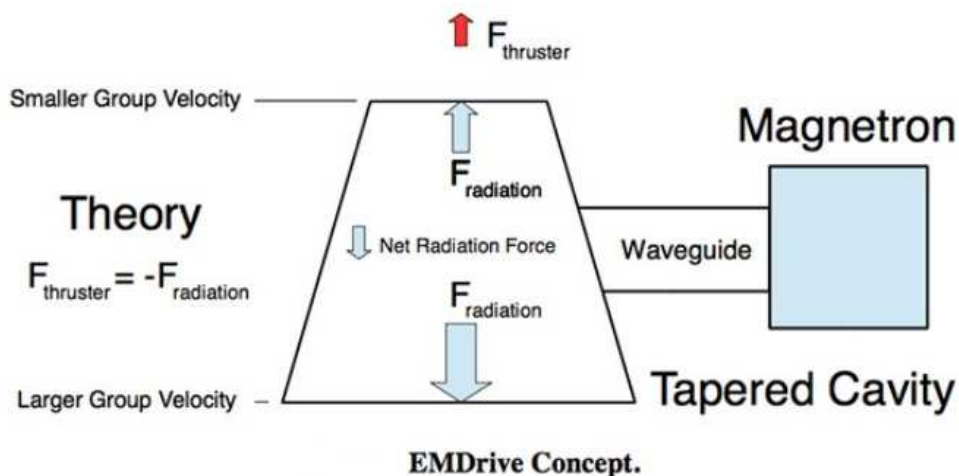


Рис.1. Принцип работы EmDrive

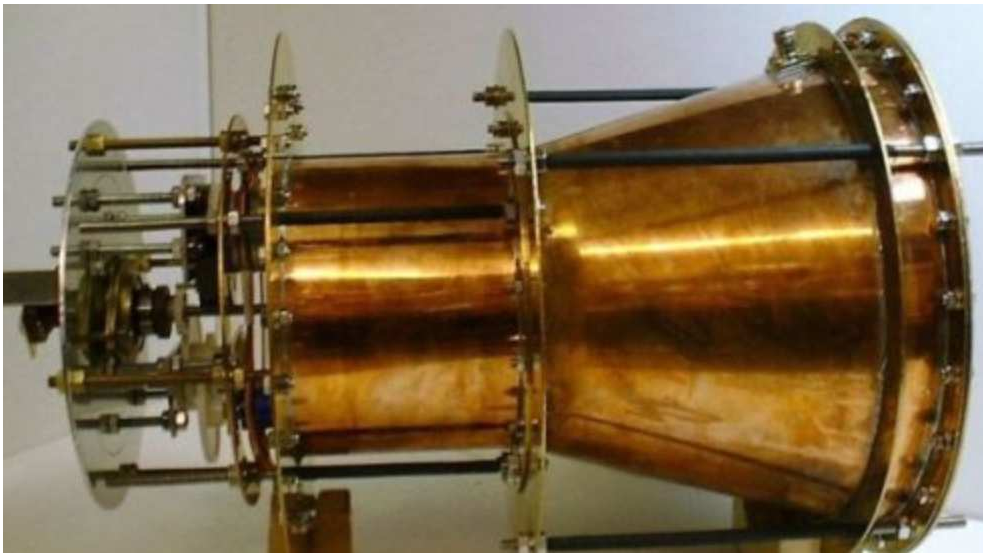


Рис.2 Фотография реальной конструкции EmDrive

По данным экспериментов НАСА [2,4,5] зарегистрированная тяга составила 0,4 ньютона на киловатт — и, несмотря на то, что эта цифра действительно ничтожна, двигатель с такими параметрами доставил бы New Horizon к Плутону за полтора года – вместо десятилетия, потребовавшегося на практике. Иными словами, для действительно дальних перелетов ситуация крайне далека от «незаинтересованности».

Лучшая из теорий, описывающая двигатель, естественно нашлась на сайте компании-прародителя SPR Ltd [6]. Но и эта теория, углубляясь в магнитные и релятивистские процессы, по моим оценкам уделяет внимание не самым важным процессам в двигателе. Многократно в литературе встречались ссылки, что адекватной теории на сегодняшний момент для двигателя нет. Варианты теорий, где утверждается, что тяга обеспечивается возникновением механического момента вследствие многократных отражений излучения не выдерживают критики оценочными расчетами. Для фотонной тяги маловаты размеры и удельные параметры. Встречались и очень спорно-фантастические утверждения о двигателе EmDrive, например:

Цитата: «...взаимодействием микроволнового излучения с квантовой составляющей вакуума, квантового состояния с самой низкой энергией, при которой вакуум можно рассматривать как среду, заполненную заряженными движущимися ионами. Движение этих вакуумных псевдо-ионов, вызванное воздействием магнитных и электрических полей излучения, и обеспечивает слабую реактивную тягу, которой достаточно для медленного разгона космического корабля.» Конец цитаты [7].

Покажем модель двигателя на более общепринятых явлениях и процессах, отличающуюся от модели SPR Ltd. И получим на этой модели цифровую оценку тяги двигателя из реальных материалов с известными параметрами. В этом состоит задача настоящей статьи.

Будем считать, что камера двигателя выполнена из меди как на фотографии. В расчетах используем параметры магнетрона от типовой бытовой СВЧ-печи, у которого частота $\omega/2 \cdot \pi = 2,45$ ГГц (длина волны 12,24см); потребляемая мощность 1 кВт; мощность излучения 0,6 кВт; будем считать, что добротность камеры двигателя равна добротности камеры СВЧ-печи на холостом ходу, это примерно 100, что соответствует ширине полосы излучения магнетрона 20-40 мГц [8]. Чтобы отраженная основанием конуса волна приходила на другое основание не в противофазе с излучением магнетрона, расстояние между плоскостями конусообразной камеры кратно длине волны магнетрона, если волновод подходит к камере на середине длины.

Предположим, что подводный волновод согласован по частоте и внутренний объем камеры двигателя настроен на резонанс, то есть в простейшем случае его объем соответствует объему СВЧ-печи, для которой был предназначен магнетрон, например, 25 литров. Например, имеем камеру с такими размерами:

Таблица 1

Длина волны		0,1224	м
Радиус основания конуса R_1		0,15	м
Радиус основания конуса R_2		0,07	м
Длина H (2 длины волны)		0,245	м
Длина R_1 конус от H	0,4	0,098	м
Длина R_2 цилиндр от H	0,6	0,147	м
Объем конуса		0,016	м ³
Объем цилиндра		0,009	м ³
Объем двигателя	В сумме	0,025	м ³

Физические эффекты в камере двигателя.

Как известно, статическое электрическое поле внутри проводника отсутствует. Переменное же электрическое поле в виде компоненты электромагнитного излучения обладает определенной проникающей способностью, зависящей от частоты и свойств материалов облучаемых тел. Для СВЧ излучения, используемого в двигателе EmDrive, медь корпуса является слабопроницаемой. Поэтому появляется возможность рассмотрения объемной поляризации в тонком поверхностном слое как реакции на излучение. При этом, как и в любой СВЧ печи энергия высокочастотного поля за вычетом утечек из объема камеры нагревает продукты в камере и её стенки. Продуктов в камере у нас нет, только воздух или вакуум, что, как выяснится ниже, несущественно для двигателя.

При прохождении излучения через вещество возникает ряд эффектов. Эффект объемной поляризации вместе с фотоэффектом, рассеянием гамма-квантов на свободных электронах (эффект Комптона) и рождением пар "электрон - позитрон". Соотношение эффектов от перечисленных процессов определяется частотами и мощностью пучка.

Вспомним действие этих эффектов поглощения излучения веществом на примере известной формулы для пучка гамма квантов.

Интенсивность J пучка измеряется энергией, переносимой гамма-квантами в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную пучку. Уменьшение интенсивности J в зависимости от толщины слоя вещества происходит по экспоненциальному закону:

$$J = J_0 e^{-\sigma x} \quad (1)$$

Где J_0 - начальная интенсивность пучка; J - интенсивность пучка после прохождения слоя вещества толщиной x ; σ - коэффициент ослабления, зависящий от свойств вещества и излучения

В камере СВЧ печи при типовых значениях частоты и мощности основным из этих эффектов является объемная поляризация.

В зависимости от свойств материала, как известно, различают разные типы поляризации:

- поляризуемость у отдельных элементарных частиц;

- электронную поляризуемость за счёт сдвига электронов в оболочках атомов;
- ионную поляризуемость при сдвиге в противоположных направлениях разноимённых ионов в ионных кристаллах;
- атомную поляризуемость вследствие смещения атомов в молекулах;
- агрегатную поляризуемость вследствие смещения агрегатов более крупных, чем молекулы.

Какие-то из этих типов поляризации свойственны всем типам веществ: как проводникам, так и диэлектрикам, как газам, так и жидкостям, и твердым телам, и плазме.

На практике измеряют обычно суммарный эффект - поляризацию среды, понимаемую как дипольный электрический момент единицы объёма среды. Поскольку в данном случае нас интересует поляризация медного тела под действием высокочастотного поля, очевидно, что преобладать будет электронная поляризуемость. Так как свободных электронов в незаряженной меди при невысоких температурах мало, а атомная, ионная и агрегатная поляризация на высоких частотах производят незначительный эффект, зависящий от подвижности, т.е. массы частиц, которая у ядра или более крупного агрегата значительно выше, чем у электронов. Поэтому суммарный дипольный момент будет определяться в основном электронной поляризуемостью. Наличие поляризуемости α приводит к появлению наведенного полем E дипольного момента μ :

$$\mu = \alpha \cdot \epsilon_0 \epsilon^* E, \quad (2)$$

Цитата: «...В общем случае α является тензорной величиной и зависит от взаимной ориентации рассматриваемой системы зарядов и напряженности приложенного электрического поля. Абсолютные значения поляризуемости ионов вычисляются путем анализа оптических спектров ионов в газовой фазе (свободные ионы). Электронные поляризуемости ионов в кристалле определяются из рефракции твёрдых солей. Эти данные не позволяют прямо вычислить поляризуемости отдельных ионов. Они вычисляются если положить для иона лития $\alpha = 0,03 \text{ \AA}^3$, где ангстрем $\text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}$, и параметр имеет размерность объёма, то параметр вычисляется в соответствии с полуэмпирической оценкой Полинга. ... И для меди, где существенна только электронная поляризуемость,

$$\alpha = \alpha_e = 1,6 \text{ \AA}^3 = 1,6 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3 \quad (1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}) \quad \gg \quad (3)$$

Конец цитаты [6].

На частотах до примерно 300 ГГц (при более высоких частотах металл становится более прозрачным) глубина скин-слоя для меди, на котором мощность излучения падает в $e=2,72$ раза, выражается формулой [10]

$$\delta = \sqrt{\frac{0,028 \left(\frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right)}{\omega}}, \text{ м} \quad (4)$$

где ω – частота излучения. Откуда для частоты 2,45 ГГц толщина скин-слоя составляет

$$\delta = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (5)$$

При этом электронная поляризация устанавливается за время 10^{-15} - 10^{-14} с [11].

В результате поляризации в электрическом поле на каждый диполь действуют внешнее поле вдоль оси действия излучения и дисперсионные силы Ван-дер-Ваальса. Таким образом, неоднородное затухающее с глубиной внешнее высокочастотное поле в металле не только поляризует ионы в диполи и растягивает эти диполи, но и векторно действует на их полюса на притяжение и отталкивание

Напряженность собственного поля диполя с удалением от него резко падает, что обуславливается ослабление сил Ван-Дер-Ваальса, обратно пропорциональных третьей, шестой или седьмой степени расстояния. То есть, взаимодисперсионные силы существенны на очень малых по сравнению с размерами двигателя расстояниях и поэтому на больших расстояниях существенно взаимодействие только с внешним полем, которые мы и будем рассматривать далее. Для определения суммарного действия на диполь силы, действующие на оба полюса диполя во внешнем поле, векторно складывается. Причем напряженность поля, действующего на дальний полюс диполя и действующая на отталкивание, меньше, т.к. расстояние до этой точки больше на Δr – характеристический эквивалентный размер диполя (расстояние между эквивалентными полюсами). Действие сил внешнего поля на диполи медной пластины также выражается с хорошей для оценочных расчетов точностью в виде интеграла по 3 скин-слоям, где расположены поляризованные диполи с убыванием эффектов в глубь металла.

Принципиально отметим, что по механизму поляризации внешнее электрическое поле действует в виде силы по направлению к источнику внешнего переменного электрического поля и на тела, не имеющие электрического заряда.

В результате многократных отражений внутри двигателя можно считать направление падения излучения на поверхности каждого диполя-источника хаотичным. Интересен вопрос: может ли и как это ненаправленное суммарное поле привести к появлению суммарной силы одного направления, которая фиксируется в виде тяги двигателя. Этот вопрос мы и рассмотрим. Наиболее просто решить задачу влияния хаотичного направления падающих излучений для инженерных расчетов можно перейдя к экспериментально замеренной напряженности электрического поля в камере двигателя (действующему или амплитудному значению), поскольку она соответствует суммарному эффекту отражений. В работе [12] описаны эксперименты с магнетроном от СВЧ-печи, где замеренная напряженность E электрического поля СВЧ излучения в объемном резонаторе может составить на холостом ходу от 100 В/м до 200 В/м в зависимости от объема камеры. Примем это не амплитудное, а нужное нам действующее значение синусоиды, так как измеряется по физическому воздействию на помещенный в камеру объект. В дальнейших оценочных расчетах примем среднюю величину действующего значения $E=150$ В/м или то же Н/Кл. Чтобы это поле действовало строго перпендикулярно основаниям конуса, то есть по оси двигателя на оба основания цилиндра, исключим из рассмотрения механики конусообразную поверхность камеры двигателя. Для этого примем для работы двигателя непринципиальное для его конструкции упрощение. Примем, что двигатель имеет цилиндрическую форму с диаметром большего основания конуса. Причем торцы этого цилиндра закрыты теми же медными дисками, что и конус. То есть, один из торцов закрыт медным диском меньшего диаметра не полностью с кольцевой щелью, которую можно закрыть прозрачным для излучения материалом. С принципиально аналогичными результатами может быть рассмотрен вариант цилиндрической конструкции с одинаковыми по диаметру торцевыми дисками из материалов с различными свойствами. Пусть волновод (один или несколько по периметру) от магнетрона направлен перпендикулярно оси цилиндра. И пусть система осесимметрична. В

такой конструкции некомпенсированными могут остаться только осевые силы, выражение и значение для которых далее и получим.

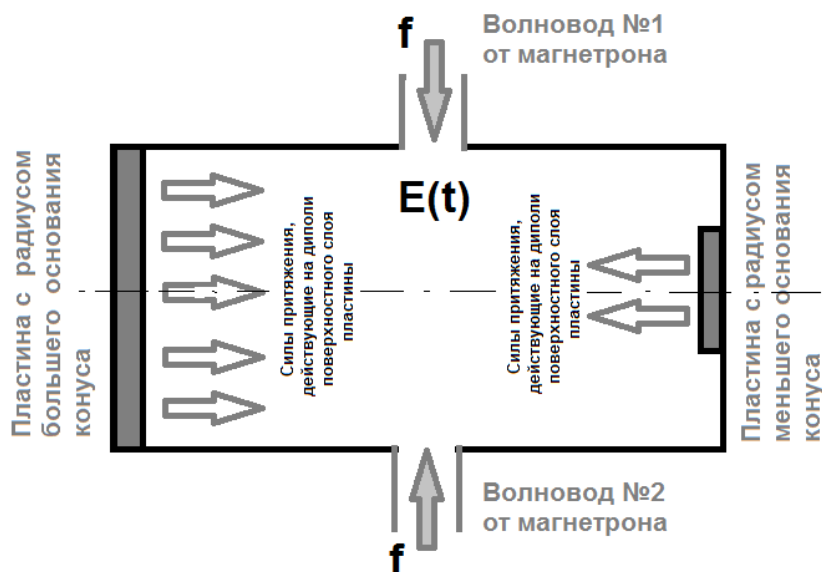


Рис 3. Упрощенная геометрия модели

Разделим плоскости оснований цилиндра на элементарные участки. Причем отметим, что поскольку в двигателе действует гармоническое излучение с узким диапазоном частот, будет справедлив принцип аддитивности полученных результатов.

Продекларируем неизменность внутреннего состояния пластин при нахождении в поле длительное время: температуры (мощность нагрева отводится во внешнюю среду), химического состава, фазового состояния. Будем считать также, что поскольку материал двигателя – медь с её магнитной проницаемостью, действием магнитного поля, кроме скин-эффекта можно пренебречь.

В такой системе каждый диполь, образованный под действием внешнего облучения по объему поверхностных слоёв электрически нейтральных параллельных медных пластин этого тела и взаимодействующий с внешним облучением представляет собой отдельный генератор осевого механического момента с постоянной составляющей и этой же частотой облучения одинаково по телу фазированный. При этом, результирующая сила каждой из пластин может быть определена как векторная сумма по взаимодействующим диполям. Интегрируя эту силу по обеим пластинам, найдем результирующую тягу двигателя.

Поляризация меди

Перейдем к модели поверхностного слоя меди с усредненными параметрами. Эффект поляризации максимален на поверхности и на толщине в 3 скин-слоя с напряженностью поля падает почти в двадцать раз. Поэтому в некотором приближении можно перейти с незначительной погрешностью к учету поляризации в меди только в таком слое $3\delta = 4 \cdot 10^{-6}$ м. При этом, учитывая характеристические времена электронных процессов с высокой точностью можно считать на частоте работы магнетрона процесс поляризации мгновенным.

Для оценочных расчетов упростим задачу и найдем среднее значение E в толщине металла 3δ . Для этого найдём интеграл от $\exp(-z/\delta)$ на интервале от 0 до 3δ и поделим полученное значение на длину интервала интегрирования, т.е. 3δ . Получается, что среднее значение равно:

$$E_{cp} = 0,32 * E = 0,32 * 150 = 47,5 \text{ Н/Кл} \quad (6)$$

Теперь найдем количество диполей N в металле на 1 см^2 при толщине $3 * \delta$. Для этого используем известный шаг кристаллической решётки меди Δ , которая у меди, как известно, кубическая:

$$\Delta = 3,615 \text{ \AA} = 3,615 * 10^{-8} \text{ см} \quad (7)$$

$$N = (1 \text{ см} * 1 \text{ см} * 4 * 10^{-4} \text{ см}) / (3,615 * 10^{-8} \text{ см})^3 = 8,57 * 10^{18} \quad (8)$$

Как описано выше, наведенный дипольный момент для меди при электронной поляризуемости выражается формулой (2), куда входит произведение $\epsilon_0 \epsilon$. Не прост вопрос о диэлектрической проницаемости меди ϵ . Видимо, поэтому простого варианта зависимости $\epsilon_0 \epsilon$ для меди для нужного частотного диапазона с помощью поисковых систем интернета найти не удалось. Используются изложенные ниже косвенные методы.

При элементарном изложении электростатики иногда говорят, что диэлектрическая проницаемость металла бесконечна, т.е. что заряды могут свободно передвигаться и среда, поэтому обладает бесконечной поляризуемостью [13].

Для отличных от нуля частот у металлов типа меди ϵ имеет не действительное значение, а комплексный вид с отрицательной действительной частью $\epsilon = -A + jB$ с нелинейной зависимостью трудно определяемых A и B от частоты. В этом выражении действительная часть комплексного показателя определяет фазовую скорость волны; а мнимая часть комплексного показателя, называемая показателем поглощения, определяет затухание амплитуды волны и её мощности по мере распространения в поглощающей среде [14]. Таким образом, из описанного физического смысла при силовом расчете действия излучения на диполи в меди расчетной величиной может быть коэффициент при мнимой части ϵ .

При длине волны 800 нм экспериментально полученные значения действительной части ϵ , соответствующей токам смещения, составляют $Ag = -26,9$, для меди $Cu = -26,3$ [15].

Согласно модели Друде в квазистатическом или одночастотном случае металл можно рассматривать как газ (плазму) свободных электронов, и тогда для действительной части диэлектрической проницаемости плазмы: $\epsilon = \epsilon(\infty) - (\omega_p / \omega)^2$. Здесь $\omega_p^2 = 4\pi e^2 n / m$ - квадрат плазменной частоты, e и m - заряд и масса электрона, n - концентрация электронов. Для металлов значения ω_p лежат в ультрафиолетовой области 10-400 Нм [15, с.14]. и токами смещения по сравнению с токами проводимости на частотах работы магнетрона можно пренебречь

Из последних формул видно, что если у двух металлов концентрация свободных носителей и длины свободных пробегов электронов примерно одинаковы, что бывает при примерно одинаковой удельной проводимости металлов, то и ϵ металлов близки по значению. Например, медь и серебро, что и подтверждается приведенными выше величинами ϵ для частоты 800 нм. Для серебра и, следовательно, для меди, найдено [16] на частоте 1 кГц

$$\epsilon = -85 + 8 \cdot 10^{12} i \quad (9)$$

Коэффициенты в (9) нелинейно зависят от многих параметров, в том числе от частоты.

Как вариант для выражения ϵ в литературе из первого уравнения Максвелла получают выражение $\epsilon = \epsilon_a - i(\sigma/\omega)$, где σ - проводимость меди, которая в свою очередь сложно зависит от частоты [17]. Но такое выражение получено в приближении отсутствия

источников в поле, что не является вполне законным, поскольку убывание E по слою может рассматриваться как отрицательный источник. Более логичное выражение для токов проводимости, т.е. для коэффициента мнимой части можно получить из зависимости от частоты величины поверхностного сопротивления несверхпроводящего металла в области классического скин-эффекта. Именно поверхностное сопротивление R является причиной потери высокочастотной мощности. Это выражение имеет вид [18]:

$$R = ((\omega * \mu_0) / (2 * \sigma))^{1/2}, \quad (10)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума Г/м, σ – удельная проводимость металла на постоянном токе См/м.

В числителе выражения для тока проводимости можно, как и выше, вместо экспоненты с неплохим приближением использовать с определенным не зависящим от частоты коэффициентом величину E из выражения (6), что принципиально не важно, потому что рассчитывать токи проводимости мы не будем и ограничимся расчетом коэффициента при мнимой части. Если в коэффициент мнимой части входит зависящая от частоты проводимость $1/R$, то этот коэффициент пропорционален $1/\omega^{1/2}$ или, что тоже самое, пропорционален $1/f^{1/2}$. Воспользуемся известным значением коэффициента $B(f=10^3) = 8 * 10^{12}$, пропорциональностью коэффициента величине $1/f^{1/2}$ и найдем значение коэффициента для частоты магнетрона $f=2,45 * 10^9$. Получается:

$$B(f=2,45 * 10^9) = 5,1 * 10^9 \quad (11)$$

Из описанного выше физического смысла при силовом расчете действия излучения на диполи в меди расчетной величиной ϵ может быть коэффициент при мнимой части, который на частоте магнетрона равен $5,11 * 10^9$. Тогда для меди:

$$\epsilon_0 \epsilon = 8,85 * 10^{-12} * 5,11 * 10^9 = 4,52 * 10^{-2} \quad (12)$$

Если диполь образуется при электронной конфигурации атома меди $3d^{10}4s^1$ искажением орбиты одного единственного s -электрона, то по определению момента:

$$\mu = q_e * \Delta_{\text{диполя}} \quad (13)$$

где q_e заряд электрона, а $\Delta_{\text{диполя}}$ – эквивалентное расстояние между зарядами диполя (длина плеча диполя).

Из двух формул для момента (2) и (13)

$$\alpha * \epsilon_0 \epsilon * E = q_e * \Delta_{\text{диполя}} \quad (14)$$

Откуда:
$$\Delta_{\text{диполя}} = \alpha * \epsilon_0 \epsilon * E / q_e, \quad (15)$$

$$\Delta_{\text{диполя}} = 1,6 * 10^{-30} * 4,52 * 10^{-2} * 47,5 / 1,6 * 10^{-19} = 2,15 * 10^{-11} \text{ м.} \quad (16)$$

Теперь определим силу, действующую на один «усредненный» по трем скин-слоям диполь от источника поля $E_{\text{ср.}}$,

$$\Delta F = q_e * \Delta E = q_e * E_{\text{ср.}} * (1 - e^{-(\Delta_{\text{диполя}}) / \delta}) = 1,6 * 10^{-19} * 47,5 * (1 - e^{-(1,58 * 10^5)}) = 1,21 * 10^{-22} \text{ Н} \quad (17)$$

Умножим на количество диполей на 1 см^2 и на разность площадей торцов двигателя и получим:

$$F = 1,21 * 10^{-22} (\text{Н}) * 8,57 * 10^{18} (1/\text{см}^2) * 3,14 (15^2 \text{ см}^2 - 7^2 \text{ см}^2) = 0,57 \text{ Н} \quad (18)$$

Направление вектора силы F определяется тем, что сила притяжения пропорциональна площади оснований конуса и действующая на большее основание конуса больше. Следовательно, суммарный вектор силы будет направлен от большего основания конуса к меньшему, что совпадает с экспериментальными данными. Численное соответствие по порядку величины полученного значения $F=0,57\text{Н}$ с экспериментально полученными $F=0,4\text{Н}$ случайно получилось лучше ожидаемого, несмотря на множество допущений и упрощений построенной модели. Тогда как целью работы было получить результат $F>0$. Что подтверждает адекватность модели и позволяет сделать выводы к работе.

Несколько слов о законе сохранения импульса в двигателе.

Как известно, закон сохранения импульса справедлив только для замкнутых систем. Двигатель же не является замкнутой системой, а является системой с преобразованием видов энергии, в конечном счёте, от излучения через внутренние преобразования (отражение как поглощение+излучение, высокочастотная электронная поляризация, электрическое силовое взаимодействие поляризованных торцевых пластин с полем и превращение энергии высокочастотной поляризации в пластинах) в тепловую, сбрасываемую неравномерно по направлениям в окружающее пространство. В описанной системе механический импульс и тепловые процессы это параллельные ортогональные пространства, обменивающиеся энергией [19].

P.S. От души веселюсь представляя у скольких домашних СВЧ печек, подвешенных для замера грамм тяги домашнего «безопорника», металлические камеры будут оклеены неравномерно медной фольгой после прочтения настоящей статьи.

ВЫВОДЫ

1. Построена модель двигателя EmDrive. В основе модели - вариант реальной конструкции и описание признанных основными физическими процессов и явлений: поляризации поверхностного слоя камеры двигателя с внутренней стороны СВЧ полем и взаимодействие поляризующего поля с образовавшимися в процессе электронной поляризации диполями. Выведены упрощенные формулы, описывающие основные процессы в двигателе.
2. Числовым расчетом силы тяги двигателя на модели показано соответствие модели физическому объекту, тем самым подтверждена корректность подхода к построению модели и выбору существенных явлений и процессов для модели.
3. По результатам рассмотрения построенной модели EmDrive является осесимметричным резонансным генератором-модулятором механического импульса. Модулятор потому, что направление вектора получаемого в двигателе механического импульса не изменяется от направления вектора напряженности СВЧ излучения за его период.
4. Работа безопорного двигателя, в частности EmDrive, вполне объяснима на основе общепризнанных явлений и процессов и не противоречит им.

Список источников.

1. Сайт компании SPR Ltd. <http://emdrive.com/>
2. Jesus Diaz. NASA: New "impossible" engine works, could change space travel forever. <http://sploid.gizmodo.com/nasa-reveals-new-impossible-engine-can-change-space-t-1614549987>

3. Немецкие физики подтвердили работоспособность «невозможного» двигателя на электромагнитной тяге. <http://geektimes.ru/post/259460/>
4. NASA подтверждает работоспособность «невозможного» волнового двигателя, не использующего реактивную массу — EmDrive. <http://geektimes.ru/post/232093/>
5. Anomalous Thrust Production from an RF Test Device. Measured on a Low-Thrust Torsion Pendulum David A. Brady, Harold G. White, Paul March, James T. Lawrence, and Frank J. Davies NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas 77058. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140006052.pdf>
6. Roger Shawyer C.Eng MIET SPR Ltd. A Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft. <http://www.emdrive.com/theorypaper9-4.pdf>
7. Проведенные испытания показали, что "невозможный" двигатель EmDrive будет работать в условиях космического вакуума. <http://www.dailytechinfo.org/space/6972-provedennye-ispytaniya-pokazali-chto-nevozmozhnyy-dvigatel-emdrive-budet-rabotat-v-usloviyah-kosmicheskogo-vakuuma.html>
8. Волноводы СВЧ печей. http://www.elremont.ru/svch/bt_rem16.php
9. Справочник химика /под ред. Б.П.Никольского-М-Л.:Химия, 1982, т.1, стр. 385. http://www.chemway.ru/bd_chem/tbl_mol/w_tbl_r_m_22.php
10. Низкочастотное и высокочастотное приближения. Глубина скин-слоя и плазменная частота. Фейнмановские лекции по физике, Том 7, Глава 32. http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=1520
11. По тексту: Что характеризует время релаксации поляризации? <http://ffre.ru/rnayfsbewrnaujgrna.html>
12. Способ и установка для низкотемпературной пастеризации жидких продуктов. Патент. <http://www.findpatent.ru/patent/246/2462099.html>
13. Н.Ашкрофт, Н.Мермин. Физика твердого тела. Том 1 с.338. <http://www.mat.net.ua/mat/biblioteka-fizika/Ashkroft-tverdoe-telo-t1.pdf>
14. Биленко Д.И. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Плазменный резонанс свободных носителей заряда в полупроводниках. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999.-44с. ISBN 5-292-02269-1
15. Хохлов Н.Е. Резонансные оптические эффекты при оптическом, магнитном и акустическом воздействии на плазмон – поляритоны в слоистых структурах. Диссертация к.ф.-м.н. МГУ, Москва, 2015г. http://www.phys.msu.ru/rus/research/disser/soviet-D501-001-67/Khokhlov2015/Khokhlov_Disser_text.pdf , с.15
16. Относительная диэлектрическая проницаемость. Словари и энциклопедии. Собрание на Академике. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/30852>
17. Электромагнитные поля и волны. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В., издание 2-е, переработанное и дополненное. Москва. Издательство "Советское радио", 1971, с.212
18. Исследование поверхностного сопротивления меди в области классического и аномального скин-эффекта.- В.А. Кутовой, А.М.Егоров Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина в Сб. PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY.2008.№3. Series: Nuclear Physics Investigations (49), p. 127-131 http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2008_3/article_2008_3_127.pdf
19. Блог <http://mendelbaum.blogspot.ru/>