

В.И. Зубков

УСКОРЯЮЩИЕСЯ СТОЯЧИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В РЕЗОНАТОРАХ ДВИГАТЕЛЕЙ EMDRIVE

Аннотация. Рассмотрены ускоряющиеся стоячие электромагнитные волны, представляющие собой суперпозицию движущихся навстречу друг другу ускоряющихся и замедляющихся волн одной частоты. Приведены примеры ускоряющихся стоячих электромагнитных волн, показано, что они идеально объясняют появление силы тяги в двигателях EmDrive. Рассмотрено создание силы тяги ускоряющейся стоячей волной в резонаторе с дисперсией. Исправлена ошибка в вычислениях силы тяги двигателя EmDrive, допущенная в одной из предыдущих работ. Показаны сходство и различия двигателя EmDrive и реактивного двигателя.

Ключевые слова: стоячие волны, дисперсия, EmDrive, propellant-less propulsion, VCSEL, зеркала Брэгга.

V.I. Zubkov

ACCELERATING STANDING ELECTROMAGNETIC WAVES WITHIN EMDRIVE ENGINE CAVITIES

Abstract. Accelerating standing waves representing the sum of oppositely travelling accelerating and decelerating electromagnetic waves of same frequency are considered. Examples of accelerating standing electromagnetic waves within optical and microwave cavities are presented. It is shown that accelerating standing electromagnetic waves ideally explain EmDrive engine working principle. Trust creation by accelerating standing electromagnetic wave within cavity with dispersion is considered. Mistake in EmDrive thrust calculation made in one of the previous paper is corrected. The similarities and differences between EmDrive engine and the jet engine are displayed.

Keywords: standing waves, dispersion, EmDrive, propellant-less propulsion, VCSEL, Bragg's mirrors.

Введение

В широко известной теории двигателя EmDrive [11], базирующейся на теории радиационного давления, подробно изложенной в [10], утверждается, что сила тяги создается в результате неодинаковости сил давления на торцы резонатора при отражении микроволн. Указанная теория многими специалистами считается весьма противоречивой, например [17]. Альтернативная и более простая теория двигателя EmDrive заключается в следующем [23]. Давление на торцы резонатора равно нулю, потому что импульсы падающей и отраженной микроволн при отражении от торцов резонатора взаимно уничтожают друг друга, а тяга двигателя представляет собой ответную реакцию резонатора двигателя на одинаковое изменение импульсов микроволн, движущихся в резонаторе навстречу друг другу с изменяющимися скоростями, зависящими от сечения резонатора, но жестко привязанными к скорости света в вакууме. Очевидно, что движущиеся в противоположных направлениях ускоряющиеся и замедляющиеся волны при резонансе создают стоячую волну [23]. Замедление волны является отрицательным ускорением для данной волны и совпадает с ускорением ускоряющейся волны. Поэтому стоячую волну в резонаторе двигателя EmDrive можно считать ускоряющейся стоячей волной. Слово сочетание «уско-

Зубков Виктор Иванович

кандидат технических наук, независимый исследователь, Зеленоград (Москва). Область научных интересов: разработка микросхем, системы технического зрения, СВЧ, двигатель EmDrive.

Автор более 20 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: vzbv@yandex.ru

ряющаяся волна» не содержит каких-либо противоречий. Например, хорошо известно, что маятник испытывает максимальное ускорение в точке максимального отклонения от вертикали при нулевой скорости, то есть, когда маятник неподвижен [6]. Понятие «ускоряющаяся стоячая волна» использовалось в ряде работ, связанных с двигателем EmDrive, например [1; 22; 23], но заслуживает более подробного рассмотрения, так как является относительно новым понятием и идеально описывает работу упомянутого двигателя. В настоящей статье предложена простая теоретическая модель ускоряющейся стоячей волны. Приведены примеры ускоряющихся стоячих электромагнитных волн. Рассмотрено создание силы тяги стоячими электромагнитными волнами в двигателях EmDrive. Исправлена ошибка, допущенная в вычислении силы тяги двигателя EmDrive в работе [23]. Показаны сходство и различия двигателя EmDrive и реактивного двигателя.

Ускоряющиеся стоячие электромагнитные волны

Вывод формулы, описывающей ускоряющуюся стоячую волну, аналогичен выводу формулы, описывающей обычную стоячую волну [18]. Но так как скорости движущихся в противоположных направлениях замедляющихся и ускоряющихся волн зависят от координаты, в волновые уравнения таких волн необходимо ввести указанные зависимости. Используем, например, волновые уравнения с длинами волн, зависящими от координаты.

Пусть y_{Right} и y_{Left} – возмущения в точке x в момент времени t какого-либо параметра, описывающие волны, движущиеся, соответственно, вправо и влево; ω – круговая частота; $\lambda(x)$ – зависящая от координаты x длина волны; y_0 – амплитуда указанных возмущений; y – суммарное возмущение, создаваемое движущимися в противоположных направлениях волнами. Тогда движущиеся вправо и влево волны можно представить, соответственно, как

$$y_{Right} = y_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda(x)} - \omega t\right), \quad (1)$$

и

$$y_{Left} = y_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda(x)} + \omega t\right), \quad (2)$$

а их сумму как

$$y = 2y_0 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda(x)}\right) \cos(\omega t). \quad (3)$$

Зависимости скорости волн и, следовательно, длин волн от координаты могут быть достаточно сложными. Предположим, что ускоряющаяся стоячая волна создана в резонаторе при резонансе; длина волны монотонно возрастает с координатой, и в резонаторе укладывается некоторое целое число полуволн (см. Рисунок 1).

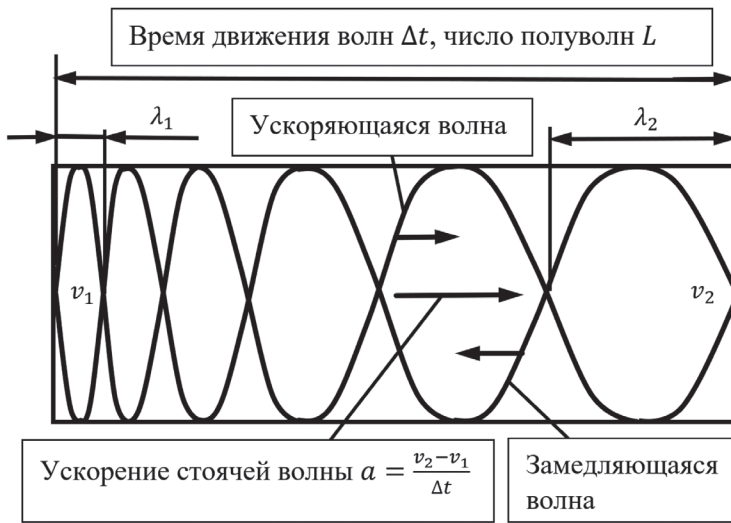


Рисунок 1. Ускоряющаяся стоячая волна в резонаторе

В соответствии с Рисунком 1 движущуюся вправо волну можно считать ускоряющейся, а движущуюся влево – замедляющейся. Ускорение ускоряющейся (движущейся вправо) волны совпадает с замедлением (отрицательным ускорением) замедляющейся (движущейся влево) волны. Очевидно, что в соответствии с формулой (3) сумма указанных волн представляет собой стоячую волну с длиной полуволны, зависящей от координаты. Таким образом, сумму движущихся в противоположных направлениях ускоряющихся и замедляющихся волн одной частоты можно считать ускоряющейся стоячей волной. При этом в каждой точке координаты скорости движущихся в противоположных направлениях волн равны по величине, поэтому суммарный импульс стоячей волны равен нулю, но, поскольку ускорения (производные скоростей по времени) указанных волн совпадают, общее изменение импульса микроволн (производная импульса по времени) и, соответственно, изменение импульса стоячей волны отличны от нуля. Расстояние между узлами стоячей волны и длина полувольт в стоячей волне в данном случае увеличивается с координатой. Резонаторы могут быть открытыми и закрытыми, открытыми с одной и закрытыми с другой стороны, то есть в резонаторах на резонансной частоте может укладываться целое и полуцелое число полудлин волн.

Ускорение a ускоряющейся стоячей волны можно определить как

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{2(v_2 - v_1)}{LT} = \frac{2(v_2 - v_1)f_0}{L} = \frac{(v_2 - v_1)\omega_0}{\pi L}, \quad (4)$$

где v_2 и v_1 – скорости электромагнитных волн у концов или торцов резонатора (пусть для определенности $v_2 > v_1$); Δt – время движения микроволн между концами или торцами резонатора; L – число полувольт в резонаторе; T – период колебаний волн; f_0 – частота волн; ω_0 – угловая частота колебаний волн.

Одним из свойств электромагнитных волн является независимость их скорости от скорости волноводов, что позволяет использовать их для создания силы тяги в двигателях EmDrive [10; 11; 13]. Например, скорость электромагнитных волн в линии передачи [19] может быть выражена через удельную емкость и индуктивность линии передачи [18] и никак не связана со скоростью самой линии. Вследствие неподвижности стоячие волны не

оказывают давления на торцы резонатора, что также может быть объяснено тем, что импульсы движущихся в противоположных направлениях волн, создающих стоячую волну, при отражении от концов или торцов резонатора взаимно уничтожают друг друга, что соответствует закону сохранения энергии [3]. Хорошо известно, например, что радиоволны могут отражаться от открытых концов (без каких-либо торцов) линий передачи и, соответственно, без каких-либо сил давления [19].

На Рисунке 2 представлена стоячая волна в резонаторе с открытыми концами, состоящем из двух отрезков линий передачи с одинаковым волновым импедансом, но с разными скоростями распространения электромагнитных волн.

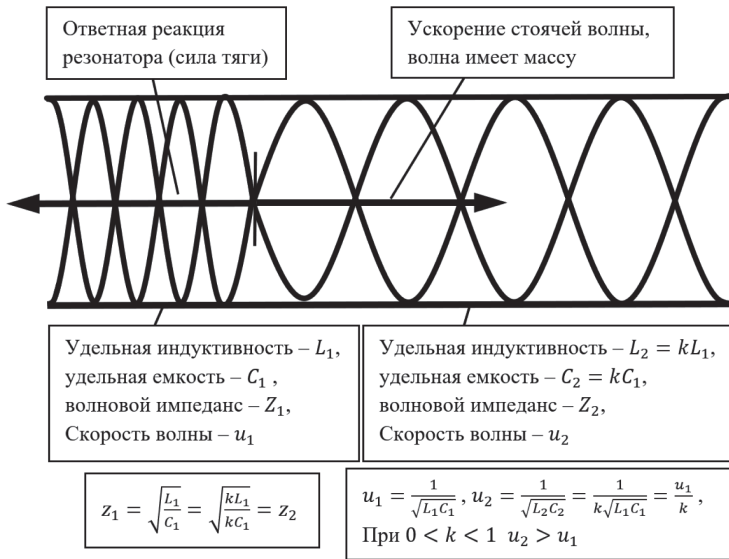


Рисунок 2. Ускоряющаяся стоячая волна в резонаторе с открытыми концами, состоящими из двух отрезков линий передачи с различными скоростями волн

Параметры двух отрезков линий передачи, из которых состоит резонатор, подобраны так, что их волновые импедансы равны, а скорости микроволн в указанных отрезках различны. Равенство волновых импедансов означает, что волна пересекает границу раздела между отрезками линий передачи без искажений и без отражений. Однако вследствие различия скоростей распространения в указанных отрезках движущиеся навстречу друг другу электромагнитные волны (компоненты стоячей волны) при пересечении границы между указанными отрезками испытывают ускорение и торможение. Торможение замедляющейся волны является отрицательным ускорением и совпадает с ускорением ускоряющейся волны. В результате в резонаторе создается ускоряющаяся стоячая волна.

Электромагнитные волны обладают энергией и, соответственно, массой. Резонатор, создающий условия для ускорения стоячей электромагнитной волны, то есть толкающий электромагнитную волну, должен сам отталкиваться от ускоряющейся стоячей волны. Резонатор, показанный на Рисунке 2, не имеет торцов – электромагнитные волны отражаются от концов резонатора без какого-либо давления. Ответную реакцию резонатора на ускорение стоячей волны можно считать силой тяги простейшего варианта двигателя EmDrive. Изобретатель двигателя Роджер Шоэр считал, что сила тяги обусловлена сила-

Ускоряющиеся стоячие электромагнитные волны в резонаторах двигателей EmDrive

ми давления на торцы резонатора, то есть, движущимися, а не стоячими волнами [10; 11], и что работа двигателя EmDrive «не может быть моделирована стоячей волной» [13].

Обычно скорости электромагнитных волн, в том числе в волноводах [5], выражаются через скорость света в вакууме. Поэтому ускорение стоячей волны в резонаторе и, следовательно, силу тяги двигателя EmDrive обычно несложно выразить через скорость света в вакууме.

Например, предложенный ранее оптический (лазерный) двигатель EmDrive [22] представляет собой резонатор, образованный плоскопараллельными зеркалами, размещенными в вакууме (см. Рисунок 3).

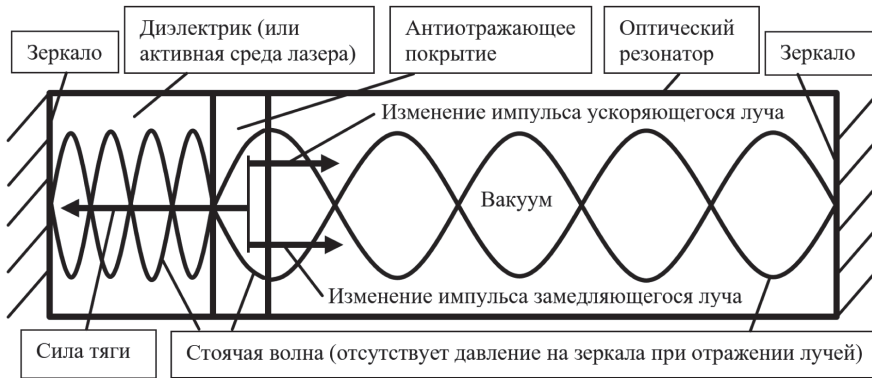


Рисунок 3. Создание силы тяги ускоряющейся стоячей волной в оптическом (лазерном) двигателе EmDrive [22]

К одному из зеркал прикреплен диэлектрик с антиотражающим покрытием. В качестве диэлектрика может использоваться активная среда лазера. Движущиеся в противоположных направлениях лучи света создают стоячую волну, которая не движется и не создает давление на зеркала. Отсутствие давления на зеркала может быть также объяснено тем, что импульсы падающего на зеркало и отраженного лучей взаимно уничтожают друг друга.

Следует отметить, что электромагнитные волны, распространяющиеся в волноводах, резонаторах и линиях передачи, отличаются от электромагнитного излучения тем, что под электромагнитным излучением обычно понимаются электромагнитные волны, распространяющиеся в открытом пространстве [8]. Соответственно, отражение электромагнитных волн от торцов резонатора отличается от отражения электромагнитного излучения: электромагнитное излучение, распространяющееся в «открытом пространстве», передает некоторую энергию отражающему телу, расположенному в «открытом пространстве» [8]. Таким образом, можно считать, что закон сохранения энергии препятствует созданию давления на торцы резонатора при отражении электромагнитных волн. При пересечении антиотражающего покрытия торможение замедляющегося луча совпадает с ускорением ускоряющегося луча. Но движущиеся в противоположных направлениях ускоряющийся и замедляющийся лучи создают стоячую волну, являющуюся ускоряющейся. Сила тяги F_t представляет собой ответную реакцию резонатора на суммарное изменение импульсов лучей при пересечении антиотражающего покрытия, то есть на ускорение стоячей электромагнитной волны, обладающей энергией и, соответственно, массой.

Пусть Δv_l – изменение скоростей; Δp – суммарное изменение импульсов лучей при

пересечении антиотражающего покрытия; Δt – время прохождения света между зеркалами; E , m , f и T – соответственно, энергия, масса энергии, частота и период колебаний световых волн в резонаторе; n – показатель преломления диэлектрика; L – число длин полуволн в резонаторе; c – скорость света в вакууме; P – мощность создаваемого в резонаторе излучения; Q – добротность оптического резонатора [9]; l – величина потерь в оптическом резонаторе [9]. Масса энергии, содержащаяся в резонаторе, проходит через резонатор за время $\Delta t = \frac{TL}{2} = \frac{L}{2f}$.

Тогда [22]

$$\begin{aligned}
 F_t &= -\frac{\Delta p}{\Delta t} = -\frac{m\Delta v_i}{\Delta t} = -\frac{mc\left(1-\frac{1}{n}\right)}{\Delta t} = \\
 &= -\frac{\frac{E}{c^2}c\left(1-\frac{1}{n}\right)}{\frac{L}{2f}} = -\frac{Ec\left(1-\frac{1}{n}\right)}{c^2\frac{L}{2f}} = -\frac{PQ}{2\pi f}c\left(1-\frac{1}{n}\right) = \\
 &= -\frac{L}{2f} = -\frac{PQ}{\pi Lc}\left(1-\frac{1}{n}\right) = -\frac{2P}{lc}\left(1-\frac{1}{n}\right)
 \end{aligned} \tag{5}$$

В оптическом резонаторе рассматриваемой конструкции лучи света часть оптического пути проходят со скоростью света в вакууме, часть – со скоростью света в диэлектрике, которая выражается через скорость света в вакууме. Следовательно, ускорение стоячей волны в резонаторе и сила тяги двигателя, являющаяся ответной реакцией резонатора на ускорение стоячей волны, выражаются через скорость света в вакууме. Жесткая связь ускорения стоячей волны в резонаторе и, следовательно, силы тяги двигателя со скоростью света в вакууме, не связанной со скоростью резонатора, однозначно указывает на открытость системы «стоячая волна – резонатор», хорошо описываемой законами Ньютона, а не законом сохранения импульса, справедливого для закрытых систем.

В резонаторе оригинального двигателя EmDrive движущиеся в противоположных направлениях микроволны изменяются вследствие конической формы резонатора [10–13]. При резонансе движущиеся в противоположных направлениях ускоряющаяся и замедляющаяся микроволны создают ускоряющуюся стоячую волну.

Движение микроволн в резонаторе навстречу друг другу можно рассматривать как движение в волноводе [5]. Волноводы СВЧ-волн (микроволн) обладают дисперсией, фазовая скорость микроволн увеличивается с уменьшением сечения, групповая скорость – уменьшается, причем фазовая скорость в волноводе больше скорости света в вакууме, групповая – меньше, и произведение фазовой и групповой скоростей равно квадрату скорости света в вакууме [5]. Фазовое ускорение движущихся в резонаторе конической формы навстречу друг другу ускоряющихся и замедляющихся микроволн и, соответственно, фазовое ускорение ускоряющейся стоячей волны направлено от широкого торца резонатора к узкому, а групповое ускорение указанных движущихся и стоячей волн – от узкого торца к широкому (см. Рисунок 4).

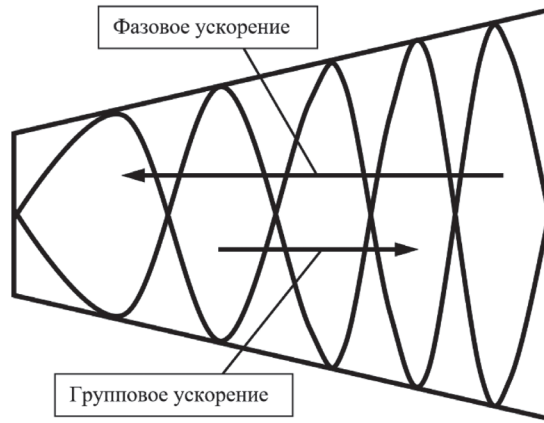


Рисунок 4. Ускоряющаяся стоячая волна в резонаторе с дисперсией

Хорошо известно, что за перенос энергии и, следовательно, за перенос массы электромагнитными волнами в среде с дисперсией обычно отвечает групповая скорость. Рассмотрим для простоты резонатор с сужающимся волноводом прямоугольного сечения (см. Рисунок 5).

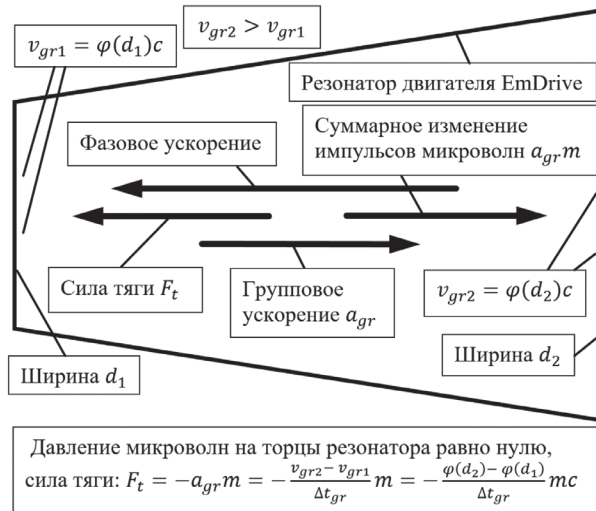


Рисунок 5. Создание силы тяги ускоряющейся стоячей волной в микроволновом резонаторе двигателя EmDrive [19]

Групповые скорости микроволн v_{gr1} и v_{gr2} у торцов резонатора являются функциями φ ширины волновода d [5] и выражаются через скорость света в вакууме c , то есть $v_{gr1} = \varphi(d_1)c$ и $v_{gr2} = \varphi(d_2)c$, где d_1 и d_2 – ширина волновода у узкого и широкого торцов, соответственно, [23]. В данном случае $v_{gr2} > v_{gr1}$. Групповые скорости микроволн у торцов резонатора жестко привязаны к скорости света в вакууме c . Поэтому групповое ускорение микроволн a_{gr} , определяемое отношением разности групповых скоростей у

торцов резонатора к групповому времени Δt_{gr} при групповой скорости движения микроволн между торцами резонатора, также жестко привязано к скорости света в вакууме. Стоячая волна не движется и не создает давления на торцы резонатора, но испытывает ускорение вследствие ускорения ускоряющейся и торможения (отрицательного ускорения) замедляющейся ее компонент. Сила тяги двигателя представляет собой ответную реакцию резонатора на общее групповое ускорение a_{gr} микроволн массой m или на групповое ускорение a_{gr} стоячей волны массой m . Массу энергии в резонаторе можно легко вычислить через мощность, добротность резонатора и частоту микроволн.

Пусть F_t – сила тяги двигателя; P – мощность; f – частота; T – период колебаний микроволн, вводимых в резонатор; E – энергия микроволн в резонаторе; Q – добротность резонатора; L – число полувольт в резонаторе.

Тогда

$$F_t = -ma = -\frac{E}{c^2} \frac{(v_{gr2} - v_{gr1})}{\Delta t_{gr}} = -\frac{PQ}{2\pi f c^2} \frac{(v_{gr2} - v_{gr1})}{\Delta t_{gr}}. \quad (6)$$

В работе [23] при вычислении группового ускорения микроволн вместо времени Δt_{gr} группового движения микроволн между торцами резонатора ошибочно использовалось время, определенное через изменяющуюся фазовую скорость микроволн, равное произведению полупериода колебаний волн на число полувольт в резонаторе. Очевидно, что групповое ускорение микроволн в резонаторе, соответствующее групповому ускорению массы, равно отношению разности групповых скоростей у торцов резонатора ко времени группового движения микроволн между торцами резонатора. Точное время Δt_{gr} группового движения волн между торцами резонатора зависит от конкретных параметров резонатора, однако, учитывая то, что произведение фазовой и групповой скоростей в волноводе равно квадрату скорости света в вакууме [5], несложно показать, что

$$\Delta t_{gr} < \frac{TLc^2}{2v_{gr2}v_{gr1}}, \quad (7)$$

и, следовательно,

$$|F_t| > \frac{PQ}{\pi c^4} \frac{v_{gr2}v_{gr1}(v_{gr2} - v_{gr1})}{L}. \quad (8)$$

Предположив, что фазовая и групповая скорости микроволн, движущихся в резонаторе, изменяются достаточно плавно и учитывая, что произведение фазовой и групповой скоростей в волноводе равно квадрату скорости света в вакууме [5], групповое время движения микроволн между торцами резонатора несложно с некоторым приближением также выразить через среднюю групповую скорость микроволн, полупериод колебаний или частоту микроволн и число полувольт в резонаторе:

$$\Delta t_{gr} \sim \frac{2c^2LT}{(v_{gr2} + v_{gr1})^2} = \frac{2c^2L}{(v_{gr2} + v_{gr1})^2} f. \quad (9)$$

Подставив (9) в (6), получим

$$|F_t| \sim \frac{PQ}{2\pi f c^2 L} \frac{2(v_{gr2} - v_{gr1})(v_{gr2} + v_{gr1})^2 f}{c} = \frac{PQ}{\pi^4} \frac{(v_{gr2} - v_{gr1})(v_{gr2} + v_{gr1})^2}{L}. \quad (10)$$

Ускоряющиеся стоячие электромагнитные волны в резонаторах двигателей EmDrive

Полученные оценки силы тяги (8) и (10) отличаются от формул, приведенных в работах [10; 11], тем, что в указанных работах обозначение Q отождествлялось с числом отражений микроволн в резонаторе [11] или проходом микроволн в обе стороны (return paths) [10], а оценки (8) и (10) получены с использованием точного определения добротности.

В последние годы широкое распространение получили лазеры с поверхностным излучением (VCSEL), характеризующиеся небольшими размерами, высокими быстродействием, эффективностью ($\approx 50\%$) и плотностью мощности излучения ($\approx 1 \text{ кВт/см}^2$), способностью работать при высокой температуре (до 80°C), планарной технологией изготовления [7]. Разновидностью VCSEL-лазеров являются лазеры с поверхностным излучением и внешним резонатором (VECSEL) [20]. В подобных лазерах обычно используются так называемые зеркала (отражатели) Брэгга, выполненные в виде слоистой структуры [4]. Вследствие слоистой структуры зависимость показателя преломления от координаты в зеркалах Брэгга является периодической функцией; стоячая волна в резонаторах с зеркалами Брэгга может иметь достаточно сложный профиль, однако эти резонаторы могут быть несимметричными [14], что может приводить к возникновению ускоряющихся стоячих волн в резонаторах, содержащих слоистые структуры. Хорошо известно: так как свет в простейшем варианте распространяется в виде лучей, добротность простейшего оптического резонатора [1] и, соответственно, энергия и ее масса, накопленные в подобном резонаторе, пропорциональны его длине; очевидно, что и время прохождения через резонатор всей массы энергии, содержащейся в резонаторе, также примерно пропорционально его длине. Поэтому сила тяги лазерных двигателей EmDrive при достаточно большой добротности не зависит от длины резонатора. Так как оптические двигатели EmDrive могут быть относительно короткими, использование технологии изготовления VCSEL-лазеров позволит создавать микроэлектронные твердотельные лазерные двигатели EmDrive.

Рисунок 6 иллюстрирует создание силы тяги в несимметричном твердотельном резонаторе VCSEL-лазера с зеркалами Брэгга [1]. Несимметричность профиля интенсивности электромагнитной волны на участках между ее нулевыми значениями в зеркалах Брэгга обусловлена различием показателей преломления слоев, из которых состоят зеркала. Неодинаковость показателей преломления в указанных слоях приводит к скачкам скорости света.

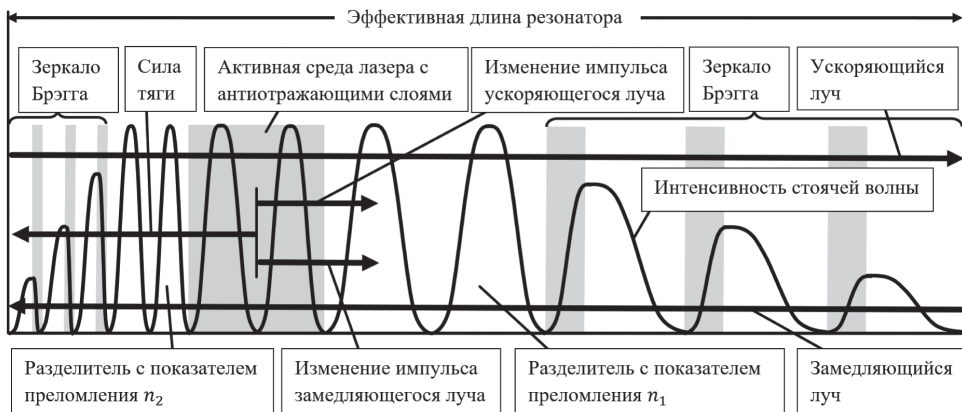


Рисунок 6. Создание силы тяги ускоряющейся стоячей волны в несимметричном резонаторе с зеркалами Брэгга [1]

Таким образом, ускоряющиеся стоячие волны прекрасно описывают работу двигателей EmDrive. Суммарный импульс ускоряющейся стоячей волны равен нулю, его производная по времени, которая выражается через ускорение ускоряющейся стоячей волны, отлична от нуля. Сила тяги EmDrive представляет собой ответную реакцию резонатора на ускорение стоячей волны в резонаторе и по абсолютной величине равна скорости изменения импульса ускоряющейся стоячей волны или, в простейших случаях, – произведению массы ускоряющейся стоячей волны на ускорение (или групповое ускорение для резонаторов с дисперсией) [23]. Описание сил, ускоряющих электромагнитные волны, может быть весьма сложным, однако, так как ускорение электромагнитного излучения в резонаторах легко вычисляется через скорости, упомянутые силы при описании работы двигателя EmDrive, могут не рассматриваться, но подразумевается, что они существуют. Кстати, в ряде работ изобретателя двигателя EmDrive Роджера Шоэра (Roger Shawyer), например, в [11], утверждалось, что силы на боковые (конические) стенки резонатора равны нулю, то есть предполагалось, что силы, ускоряющие электромагнитные волны, отсутствуют.

Таким образом, основной формулой работы двигателя EmDrive, по-видимому, можно считать формулу

$$\boxed{\begin{array}{c} \text{Сила тяги} \\ \text{двигателя} \\ \text{EmDrive} \end{array}} = - \boxed{\begin{array}{c} \text{Масса электромагнитных} \\ \text{волн} \end{array}} \times \boxed{\begin{array}{c} \text{Ускорение массы} \\ \text{электромагнитных волн} \end{array}}$$

Работа двигателя EmDrive аналогична работе реактивного двигателя, но двигатель EmDrive работает без выхлопа (за исключением теплового рассеяния). Более того, поскольку стоячая волна, создаваемая движущимися в противоположных направлениях волнами, неподвижна, двигатель EmDrive можно считать двигателем без движущихся частей. Однако, как отмечалось выше, в отличие от обычного реактивного двигателя двигатель EmDrive является открытой системой. В двигателе EmDrive законам сохранения импульса и энергии соответствует взаимное уничтожение импульсов падающих и отраженных электромагнитных волн при отражении от концов или торцов резонатора, однако создание силы тяги двигателем EmDrive обусловлено внешним воздействием. Создавая условия для ускорения электромагнитных волн, то есть ускоряя их, резонатор двигателя EmDrive отталкивается от неподвижного, но ускоряющегося волнового пакета, ускорение которого жестко привязано к скорости света в вакууме, что создает силу тяги. Работа двигателя EmDrive соответствует законам Ньютона. При достаточно большом ускорении двигателя EmDrive резонанс в резонаторе разрушается, однако при достаточно большой нагрузке, например, при большой массе резонатора, двигатель EmDrive создает импульс, равный интегралу силы тяги по времени или в простейшем случае – произведению силы тяги на время. Таким образом, по-видимому, бессмысленно пытаться применить закон сохранения импульса к работе двигателя EmDrive, хотя, конечно, сила тяги может быть вычислена как изменение импульсов электромагнитных волн, распространяющихся в резонаторе двигателя с изменяющимися скоростями, то есть по существу как производная указанных импульсов по времени.

Иногда двигатель EmDrive называют двигателем без рабочего тела (propellant-less [12]). Очевидно, что это некоторое преувеличение. По-видимому, под рабочим телом следует понимать вещество, от которого двигатель отталкивается. В реактивном движении рабочим телом обычно являются продукты горения топлива, хотя, рабочим телом реактивно-

го двигателя могут быть, например, ионы, электроны, фотоны и обычная вода (в водометных двигателях). В двигателе EmDrive рабочим телом являются электромагнитные волны, обладающие энергией и массой. Кстати, двигатель EmDrive, особенно его оптический (или лазерный) вариант, напоминает двигатель фотонной ракеты, но использует массу энергии электромагнитных волн много раз, которые иногда представляются фотонами, вследствие многократных отражений электромагнитных волн в резонаторе, а отражения электромагнитных волн в резонаторах обычно происходят, как отмечалось выше, без создания давления [4]. Масса энергии очень мала, но электромагнитные волны испытывают колоссальное ускорение в резонаторе двигателя EmDrive, причем каждая порция энергии, вводимая в резонатор, участвует в создании силы тяги много раз. Поэтому двигатель EmDrive может создавать значительную силу тяги [12]. В реактивной технике эффективность использования массы топлива характеризуется удельным импульсом [15]. Удельный импульс реактивного двигателя удобно выражать через эффективную скорость выхлопа [15]. В двигателе EmDrive аналогом эффективной скорости выхлопа является разность скоростей у концов резонатора или разность групповых скоростей у торцов резонатора с дисперсией (в оригинальном двигателе EmDrive [10; 11]). Указанная разность скоростей в резонаторе двигателя EmDrive очень высока, а масса энергии, создающей тягу в резонаторе, – очень мала, поэтому двигатель EmDrive можно считать двигателем с почти бесконечным удельным импульсом, особенно если расход массы энергии определять по массе энергии, вводимой в резонатор. Напомним, что масса энергии, накопленная в резонаторе, значительно больше массы энергии, вводимой в резонатор, вследствие многократных отражений электромагнитных волн от торцов резонатора.

Необходимо отметить, что двигатели EmDrive с высокой добротностью резонатора при очень малой массе энергии, то есть работающие почти без рабочего тела, могут иметь очень высокое отношение силы тяги к мощности (энергетическую эффективность), сопоставимое с указанным параметром реактивного двигателя [12]. Основным недостатком двигателей EmDrive – уменьшение силы тяги с ускорением [12] – может быть устранен в результате использования двигателей EmDrive в качестве электронно контролируемых (включаемых и выключаемых) точек опоры, от которых могут отталкиваться или к которым могут притягиваться транспортные средства [1; 2]. В подобных двигательных системах двигатель EmDrive не совершает механическую работу, а служит включаемым и выключаемым аналогом рабочего тела или включаемым и выключаемым аналогом массы, от которой можно отталкиваться или к которой можно притягиваться. Механическую работу совершают вспомогательные устройства, при помощи которых транспортное средство отталкивается от указанных аналогов массы или к ним притягивается. При достаточно высокой добротности резонатора и при достаточно высокой частоте переключения режимов работы двигателей EmDrive и вспомогательных механических устройств подобная двигательная система теоретически является весьма экономичной [1; 21].

Заключение

Предложена простая теоретическая модель ускоряющейся стоячей волны, представляющей собой суперпозицию движущихся навстречу друг другу замедляющихся и ускоряющихся волн одной частоты. Приведены примеры ускоряющихся стоячих электромагнитных волн, в том числе в оптическом и микроволновом резонаторах. Показано, что ускоряющиеся стоячие электромагнитные волны идеально объясняют создание силы тяги в двигателях EmDrive, так как импульсы движущихся навстречу друг другу микроволн,

образующих стоячую волну, взаимно уничтожают друг друга, а изменения импульсов движущихся навстречу друг другу с изменяемыми скоростями электромагнитных волн складываются и не зависят от скорости резонатора двигателя EmDrive. Рассмотрено создание силы тяги ускоряющейся стоячей волной в резонаторе с дисперсией. Исправлена ошибка в вычислении силы тяги двигателя EmDrive, допущенная в одной из предыдущих работ. Показаны сходство и различия двигателя EmDrive и реактивного двигателя.

Литература

1. Зубков В.И. Двигательная система со встроенными точками опоры на основе лазерных (VCSEL) двигателей EmDrive // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2022. Вып. 1. С. 15–22.
2. Зубков В.И. Использование двигателей EmDrive в качестве точек опоры для ускоряющихся транспортных средств // Труды 63-й конференции МФТИ (Москва – Долгопрудный – Жуковский, 23–29 ноября 2020 года). С. 186–188.
3. Зубков В.И. Уточнение классической теории радиационного давления / XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня, 2022 года). С. 50–54.
4. Распределенный брэгговский отражатель // Википедия [Электронный ресурс].
5. Feynman R. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, ch. 24. Waveguides. Available at: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_24.html (date of the application: 19.09.2020).
6. Маятник // Википедия [Электронный ресурс].
7. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology. Princeton optronics Available at: <https://www.newmetals.co.jp/pdf/234.pdf> (date of the application: 18.08.2021).
8. Радиация // Википедия [Электронный ресурс].
9. Q-фактор // Википедия [Электронный ресурс].
10. Shawyer R. (2006) A Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft. Theory paper V 9.4. SPR Ltd. Available at: <http://www.emdrive.com/theorypaper9-4.pdf> (date of the application: 27.03.2022).
11. Shawyer R. (2018) EmDrive Propulsion. Technical University Dresden, SPR Ltd. Available at: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (date of the application: 27.03.2022).
12. Shawyer R. The dynamic operation of a high Q EmDrive microwave thruster. SPR Ltd UK. Available at: <http://www.emdrive.com/IAC13paper17254.v2.pdf> (date of the application: 22.09.2020).
13. Shawyer R. (2020) The Technology of hope. UCL, April 2020. Available at: https://vimeo.com/418510881?embedded=true&source=video_title&owner=115483457 (time code 07:02, date of application: 31.08.2022).
14. Sheng Hang, Yonghui Zhang, Yuanbin Gao, Xuejiao Qiu, Jianquan Kou, Kangkai Tian, and Zihui Zhang (2020) On the origin for the hole confinement into apertures for GaN-based VCSELs with buried dielectric insulators. *Optics Express*, vol. 28, Iss. 6, pp. 8668–8679. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-6-8668&id=428930> (date of the application: 23.02.2022).
15. Удельный импульс // Википедия [Электронный ресурс].
16. Стоячая волна // Википедия [Электронный ресурс].
17. Tajmar M., Fiedler G. Direct Thrust Measurements of an EM Drive and Evaluation of Possible Side-Effects. Available at: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilr/rfs/ressourcen/dateien/forschung/folder-2007-08-21-5231434330/ag_raumfahrtantriebe/JPC---Direct-Thrust-Measure-

ments-of-an-EM-Drive-and-Evaluation-of-Possible-Side-Effects.pdf?lang=en (date of the application: 27.03.2022).

18. Уравнения телеграфа // Википедия [Электронный ресурс].
19. Линия передачи // Википедия [Электронный ресурс].
20. Vertical External-cavity Surface-emitting Lasers. Available at: https://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html (date of the application: 23.08.2021).
21. Zubkov V.I. (2021) Outlook for development of the propulsion systems with built-in EmDrive engine-based support points. Tenth international aerospace congress IAC, p. 71.
22. Zubkov V. Simple optical EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48911673/Simple_optical_EmDrive_engine (date of the application: 19.0.2021).
23. Zubkov V. Simple theory of the EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48789759/Simple_theory_of_the_EmDrive_engine (date of the application: 19.0.2021).

References

1. Zubkov V.I. (2022) Dvigatel'naya sistema so vstroennymi tochkami opory na osnove lazernykh (VCSEL) dvigatelei EmDrive [Dvigatel'naya sistema so vstroennymi tochkami opory na osnove lazernykh (VCSEL) dvigatelej EmDrive]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnye sistemy: modeli, analiz, upravlenie*, vol. 1, pp. 15–22 (in Russian).
2. Zubkov V.I. (2020) *Ispol'zovanie dvigatelei EmDrive v kachestve toчек opory dlya uskoryayushchikhsya transportnykh sredstv: Trudy 63-i konferentsii MFTI (Moskva – Dolgoprudnyi – Zhukovskii, 23–29 noyabrya 2020 goda)* [Using EmDrive engines as fulcrum for accelerating vehicles: Proc. of the 63rd MIPT conference (Moscow – Dolgoprudny – Zhukovsky, November 23–29, 2020)], pp.186–188. Available at: <https://mipt.ru/science/Stop100/education/courseproposal/ФАКТ%20final.pdf> (date of the application: 23.08.2021) (in Russian).
3. Zubkov V.I. (2022) *Utochnenie klassicheskoi teorii radiatsionnogo davleniya: XI Vserossiiskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Elektronika i mikroelektronika SVCh» (Sankt-Peterburg, 30 maya – 3 iyunya, 2022 goda)* [Refinement of the classical theory of radiation pressure: XI All-Russian scientific and technical conference “Electronics and microwave microelectronics” (St. Petersburg, May 30 – June 3, 2022)], pp. 50–54. Available at: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/050-054.pdf> (date of the application: 29.07.2022) (in Russian).
4. *Raspredelyonnyj breggovskij otrazhatel'* [Distributed Bragg reflector]. Vikipediya.
5. Feynman R. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, ch. 24. Waveguides. Available at: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_24.html (date of the application: 19.09.2020).
6. *Mayatnik* [Pendulum]. Vikipediya.
7. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology. Princeton optronics Available at: <https://www.newmetals.co.jp/pdf/234.pdf> (date of the application: 18.08.2021).
8. *Radiatsiya* [Radiation]. Vikipediya.
9. *Q-faktor* [Q factor]. Vikipediya.
10. *Shawyer R.* (2006) A Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft. Theory paper V 9.4. SPR Ltd. Available at: <http://www.emdrive.com/theorypaper9-4.pdf> (date of the application: 27.03.2022).
11. *Shawyer R.* (2018) EmDrive Propulsion. Technical University Dresden, SPR Ltd. Available at: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (date of the application: 27.03.2022).
12. *Shawyer R.* The dynamic operation of a high Q EmDrive microwave thruster. SPR Ltd UK. Available at: <http://www.emdrive.com/IAC13paper17254.v2.pdf> (date of the application: 22.09.2020).

13. R. *Shawyer*. The Technology of hope. UCL, April 2020. Available at: URL: https://vimeo.com/418510881?embedded=true&source=video_title&owner=115483457 (time code 07:02, date of application 31.08.2022).
14. *Sheng Hang, Yonghui Zhang, Yuanbin Gao, Xuejiao Qiu, Jianquan Kou, Kangkai Tian, and Zi-Hui Zhang* (2020) On the origin for the hole confinement into apertures for GaN-based VCSELs with buried dielectric insulators. *Optics Express*, vol. 28, Iss. 6, pp. 8668–8679. Available at: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-6-8668&id=428930> (date of the application: 23.02.2022).
15. *Udel'nyi impul's* [Specific impulse]. Wikipediya.
16. *Stoyachaya volna* [Standing wave]. Wikipediya.
17. *Tajmar M., Fiedler G.* Direct Thrust Measurements of an EM Drive and Evaluation of Possible Side-Effects. Available at: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ilr/rfs/ressourcen/dateien/forschung/folder-2007-08-21-5231434330/ag_raumfahrtantriebe/JPC---Direct-Thrust-Measurements-of-an-EM-Drive-and-Evaluation-of-Possible-Side-Effects.pdf?lang=en (date of the application: 27.03.2022).
18. *Uravneniya telegrafa* [Telegrapher's equations]. Wikipediya.
19. *Liniya peredachi* [Transmission line]. Wikipediya.
20. Vertical External-cavity Surface-emitting Lasers. Available at: https://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html (date of the application: 23.08.2021).
21. *Zubkov V.I.* (2021) Outlook for development of the propulsion systems with built-in EmDrive engine-based support points. Tenth international aerospace congress IAC, p. 71.
22. *Zubkov V.* Simple optical EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48911673/Simple_optical_EmDrive_engine (date of the application: 19.0.2021).
23. *Zubkov V.* Simple theory of the EmDrive engine. Available at: https://www.academia.edu/48789759/Simple_theory_of_the_EmDrive_engine (date of the application: 19.0.2021).