

Уточнение классической теории радиационного давления

В.И. Зубков

ООО «НМ-Тех»

Аннотация: рассмотрено создание радиационного давления с учетом закона сохранения энергии. Показано, что при первоначально неподвижном отражающем теле отраженная электромагнитная волна слабее падающей и давление излучения строго меньше его значения, полученного из классической теории, т. к. отражаемая волна передает часть энергии отражающему телу. Давление электромагнитного излучения зависит от скорости отражающего тела. Предложенное уточнение хорошо объясняет отсутствие давления микроволн на торцы резонатора двигателя EmDrive.

Ключевые слова: радиационное давление, EmDrive, propellant-less propulsion

1. Введение

Базирующаяся на теории классического радиационного давления широко известная теория двигателя EmDrive [1], подробно изложенная в работе [2], многими специалистами считается весьма противоречивой, например, [3]. Согласно [1, 2] распространяющиеся в резонаторе конической формы СВЧ-волны (микроволны) при отражении создают давление на торцы резонатора, сила давления на широкий торец резонатора больше, чем сила давления на его узкий торец, но сила, ускоряющая резонатор, направлена от широкого торца резонатора к узкому [1, 2], что, по-видимому, и дает повод считать упомянутую теорию двигателя EmDrive противоречивой [3].

Альтернативное и более простое объяснение принципа работы двигателя EmDrive заключается в следующем [4]. Давление на торцы резонатора равно нулю, потому что при отражении микроволн от торцов резонатора импульсы падающих и отраженных микроволн взаимно уничтожают друг друга, а сила тяги представляет собой ответную реакцию резонатора на суммарное изменение импульсов микроволн, распространяющихся навстречу друг другу в резонаторе конической формы с изменяющимися скоростями, зависящими от сечения волновода, но жестко связанными со скоростью света в вакууме [5]. Возможность отражения электромагнитных волн без создания давления подтверждается, например, хорошо известным фактом отражения электромагнитных волн от концов разомкнутых (без каких-либо торцов) линий передачи [6].

Таким образом, принцип работы двигателя EmDrive, по-видимому, можно считать объясненным, однако рассмотрение принципа работы двигателя EmDrive заставляет обратить внимание на то, что электромагнитные волны могут отражаться с созданием и без создания давления, что, свою очередь, заставляет рассмотреть теорию радиационного давления более тщательно, чему и посвящена настоящая работа.

2. Уточнение классической теории радиационного давления

Согласно [7] термин «излучение» в отношении электромагнитных волн применим только электромагнитному полю, излучаемому в открытое пространство. Создание радиационного давления предполагает наличие некоторого отражающего тела (рефлектора) [8]. Классическая теория радиационного давления излучения

представляет собой следствие закона сохранения импульса [8]. Однако использование только закона сохранения импульса часто не дает однозначного решения. Например, закон сохранения импульса выполняется и при создании радиационного давления, когда изменение импульса электромагнитной волны передается отражающему телу, и при отражении электромагнитной волны от открытого (разомкнутого) конца линии передачи, когда импульсы движущихся в противоположных направлениях падающей и отраженной электромагнитных волн равны по величине, но противоположны по направлению, что соответствует векторной диаграмме в классической теории радиационного давления при перпендикулярном падении электромагнитной волны на отражающую поверхность. Неоднозначность решения задачи об отражении электромагнитных волн может быть устранена в результате применения наряду с законом сохранения импульса закона сохранения энергии. Задача о создании давления с учетом закона сохранения энергии легко решается при помощи представления излучения потоком фотонов [8, 9].

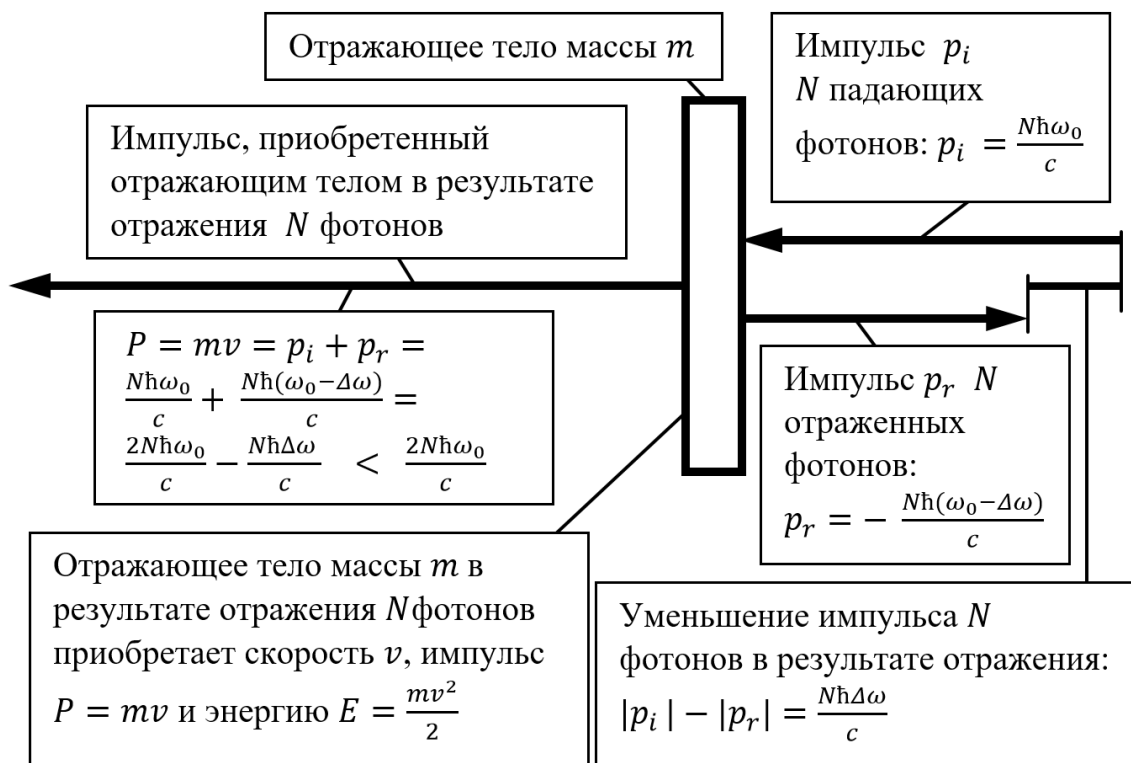


Рисунок 1. Векторная диаграмма создания радиационного давления на полностью отражающее тело с учетом закона сохранения энергии.

В настоящей статье для простоты рассмотрены первоначально неподвижные полностью отражающее и полностью поглощающее тела, облучаемые монохроматическим излучением перпендикулярно поверхности.

Векторная диаграмма создания радиационного давления на полностью отражающее тело с учетом закона сохранения энергии приведена на рисунке 1. Создание радиационного давления на полностью поглощающее тело рассматривается аналогично.

Фотоны падают на отражающее тело и создают некоторое давление; отражающее тело под действием давления фотонов приобретает некоторую скорость, импульс и энергию; фотоны при отражении передают часть энергии отражающему телу, их энергия и, следовательно, частота и импульс уменьшаются. Поэтому давление излучения на первоначально неподвижное отражающее тело строго меньше его

значения, полученного из классической теории.

Пусть c – скорость света в вакууме, ω_0 – частота фотонов, падающих на отражающее тело, N – число фотонов, отражающихся от отражающего тела в течение времени Δt , ω – частота фотонов, падающих на отражающее тело, $\Delta\omega$ – среднее изменение частоты фотонов в результате отражения, \hbar – постоянная Планка, m – масса отражающего тела, v, P, E – соответственно, скорость, импульс и энергия приобретаемые отражающим телом в результате отражения N фотонов за время Δt , F – сила давления.

Тогда энергия и импульс N фотонов, падающих на отражающее тело, равны, соответственно, $N\hbar\omega_0$ и $\frac{N\hbar\omega_0}{c}$; энергия и импульс N фотонов, отраженных от отражающего тела, равны, соответственно, $N\hbar(\omega_0 - \Delta\omega)$ и $\frac{N\hbar(\omega_0 - \Delta\omega)}{c}$; импульс и энергия, приобретаемые отражающим телом в результате отражения N фотонов, равны, соответственно, $P = mv$ и $\Delta E = \frac{mv^2}{2}$.

Законы сохранения импульса и энергии дают систему уравнений:

$$\begin{cases} mv = 2\frac{N\hbar\omega_0}{c} - \frac{N\hbar\Delta\omega}{c} \\ \frac{mv^2}{2} = N\hbar\Delta\omega \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (5) относительно v , несложно найти силу давления F :

$$F = \frac{mv}{\Delta t} = \frac{mc \left(-1 + \sqrt{1 + 4\frac{N\hbar\omega_0}{mc^2}} \right)}{\Delta t} \quad (2)$$

При достаточно большой массе отражающего тела, т. е. при $m \gg \frac{N\hbar\omega_0}{c^2}$

$$F = \frac{mv}{\Delta t} \approx 2\frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t} - 2\frac{N^2\hbar^2\omega_0^2}{mc^3\Delta t} < 2\frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t} \quad (3)$$

Величина $2\frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t}$ соответствует силе давления, полученной из классической теории, величина $2\frac{N^2\hbar^2\omega_0^2}{mc^3\Delta t}$ отражает ее уточнение, полученное с учетом закона сохранения энергии. При малой массе отражающего тела, но при значительном световом потоке величина, уточняющая классическую теорию давления, может быть значительной. Очевидно, что мощный световой поток может сообщить отражающему телу с очень небольшой массой значительные скорость, импульс и энергию; соответственно, энергия и импульс отраженных фотонов могут оказаться значительно меньше энергии и импульса падающих фотонов, что приводит к значительному уменьшению радиационного давления по сравнению с величиной, полученной из классической теории. При очень большой массе отражающего тела, энергия, передаваемая отражающему телу излучением, и, соответственно, величина, уточняющая классическую теорию радиационного давления, могут очень малыми, но какими бы малыми ни были, они разрешают излучению передавать импульс отражающему телу и создавать давление. Отражение электромагнитных волн без передачи энергии отражающей структуре, например, при отражении электромагнитных волн от открытых концов линий передачи или от торцов резонатора, в том числе от торцов резонатора двигателя EmDrive происходит без создания давления. Можно считать, что при отражении излучения без передачи энергии отражающей структуре закон сохранения энергии запрещает создание

давления.

Очевидно, что радиационное давление зависит от скорости отражающего тела вследствие эффекта Доплера [10]: с увеличением скорости отражающего тела, совпадающей по направлению с падающим излучением, радиационное давление будет уменьшаться, с увеличением скорости отражающего тела в противоположном направлении – увеличиваться. При неполном отражении для относительно точного вычисления силы радиационного давления необходимо учитывать поглощаемую отражающим телом (переходящую в тепло) часть энергии излучения, что приводит к некоторому усложнению системы уравнений (1).

При полном поглощении излучения отражающее тело превращается в идеальный поглотитель, и поправка, вносимая законом сохранения энергии в классическую теорию радиационного давления, может быть легко оценена следующим образом. Энергия, переносимая радиационным излучением, помимо поглощения поглотителем, расходуется на ускорение последнего, т. е. поглотитель при поглощении фотонов приобретает некоторую увеличивающуюся скорость. Поглощаемый движущимся поглотителем фотон, рассматриваемый из неподвижной системы отчета, вследствие эффекта Доплера [10] имеет меньшую частоту, энергию и импульс по сравнению с величинами указанных параметров до начала поглощения.

Предположим, что поглотитель массы m в результате поглощения N фотонов за время Δt приобрел скорость v , и среднее изменение частоты фотонов вследствие эффекта Доплера составило $\Delta\omega$.

Тогда взаимодействие потока N фотонов с поглотителем может быть описано системой уравнений, аналогичной системе уравнений (1):

$$\begin{cases} mv = \frac{N\hbar(\omega_0 - \Delta\omega)}{c} \\ N\hbar\omega_0 = \frac{mv^2}{2} + N\hbar(\omega_0 - \Delta\omega) \end{cases} \quad (4)$$

Решив систему уравнений относительно v , несложно найти силу давления излучения на поглощающее тело при его достаточно большой массе:

$$F = \frac{mv}{\Delta t} \approx \frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t} - \frac{N^2\hbar^2\omega_0^2}{2mc^3\Delta t} < \frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t} \quad (5)$$

Величина $\frac{N\hbar\omega_0}{c\Delta t}$ соответствует силе давления на полностью поглощающее тело, полученной из классической теории, величина $\frac{N^2\hbar^2\omega_0^2}{2mc^3\Delta t}$ отражает ее уточнение, полученное с учетом закона сохранения энергии. Очевидно, рассмотрение создания давления на излучающее тело при эмиссии [8] монохроматического излучения с учетом закона сохранения энергии должно дать подобную поправку.

Несмотря на то, что электромагнитное излучение предполагает распространение электромагнитных волн в открытом пространстве, и давление на торцы резонатора не создается вследствие отсутствия передачи энергии (при полном отражении) и взаимного уничтожения импульсов движущихся в противоположных направлениях электромагнитных волн, классическая теория радиационного давления, по-видимому, может быть использована для вычисления силы тяги двигателя EmDrive в соответствии с работами [1, 2], т. к. направления импульсов электромагнитных волн изменяются при отражении от торцов резонатора аналогично изменению направления импульсов электромагнитных волн в классической теории радиационного давления, а

реальное давление микроволн на торцы резонатора равно нулю. В действительности, как отмечалось выше, сила тяги двигателя EmDrive представляет собой ответную реакцию резонатора на суммарное изменение импульсов электромагнитных волн, распространяющихся навстречу друг другу с изменяющимися скоростями в резонаторе конической формы при отсутствии давления на его торцы. Если бы давление на торцы резонатора существовало, разница сил давления на широкий и узкий торцы резонатора компенсировала суммарное изменение импульсов электромагнитных волн вследствие изменения их групповых скоростей при распространении вдоль резонатора конической формы, и двигатель EmDrive в принципе не мог бы работать.

3. Заключение

Рассмотрено создание радиационного давления с учетом закона сохранения энергии. Показано, что при первоначально неподвижном отражающем теле отраженная электромагнитная волна слабее падающей, и давление излучения строго меньше его значения, полученного из классической теории, т. к. отражаемая волна передает часть энергии отражающему телу. Давление электромагнитного излучения зависит от скорости отражающего тела. Предложенное уточнение хорошо объясняет отсутствие давления микроволн на торцы резонатора двигателя EmDrive.

Список литературы

1. Shawyer R. EmDrive Propulsion SPR Ltd Technical University Dresden 11th July 2018. URL: <http://www.emdrive.com/dresden2018.pdf> (дата обращения: 27.03.2022).
2. Shawyer R. A Theory of Microwave Propulsion for Spacecraft, URL: <http://www.emdrive.com/theorypaper9-4.pdf> (дата обращения: 27.03.2022).
3. Tajmar M., Fiedler G. Direct Thrust Measurements of an EM Drive and Evaluation of Possible Side-Effects, URL: 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 (дата обращения: 27.03.2022).
4. Zubkov V. Simple theory of the EmDrive engine. URL: https://www.academia.edu/48789759/Simple_theory_of_the_EmDrive_engine (дата обращения: 27.03.2022).
5. Feynman R. The Feynman Lectures on Physics Vol. II Ch. 24: Waveguides, URL: https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_24.html (дата обращения 19.09.2020).
6. Transmission line. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_line (дата обращения: 27.03.2022).
7. Radiation. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation> (дата обращения: 27.03.2022).
8. Radiation pressure. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_pressure (дата обращения: 27.03.2022).
9. Photon. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photon> (дата обращения: 27.03.2022).
10. Doppler effect. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect (дата обращения: 04.04.2022).