

ФОТОННАЯ РАКЕТА: ФАНТАЗИИ И ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

АЛЕКСАНДРОВ Евгений Борисович,

академик РАН

Физико-технической институт им. А.Ф. Иоффе

DOI: 10.7868/50044394820100060

*Вот, двигаясь по световому лучу,
(Без помощи, но при посредстве),
Я к Тау-Кита этой самой лечу,
Чтоб с ней разобратсья на месте.*

Владимир Высоцкий

Фотонные ракеты! Романтические звездолеты научно-фантастических романов полувековой давности! Их авторы ознакомились с элементами специальной теории относительности (СТО) и осознали, что для межзвездных перелетов не обойтись без звездолетов с субсветовыми скоростями – иначе никакой жизни не хватит долететь до ближайшей звездной провинции. Ничего похожего подобным фантастическим проектам современная техника создать не может. Тем не менее очень скромную по скоростным возможностям фотонную ракету, позволяющую достичь приращение скорости аппарата в невесомости порядка первой космической, можно осуществить весьма простыми средствами. Расскажем об этом подробнее.

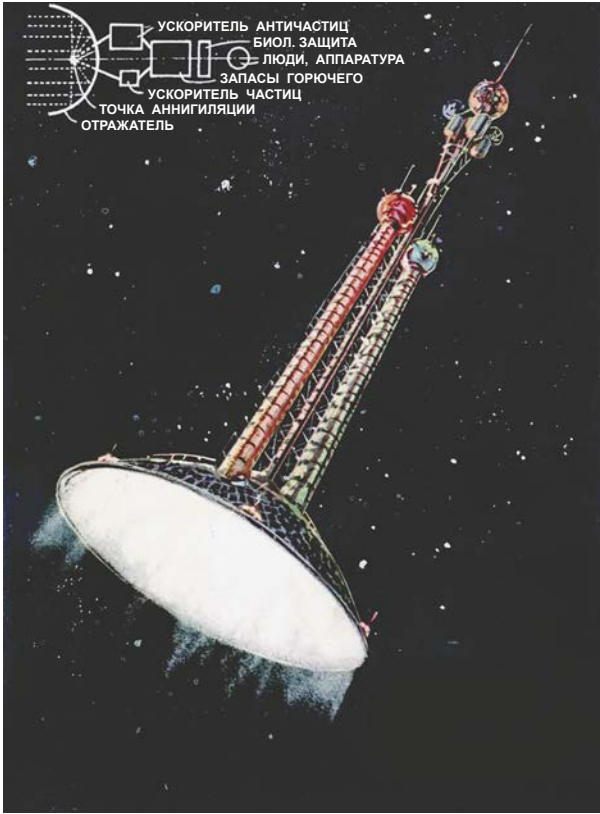
Как известно, реактивный (ракетный) двигатель имеет в основе закон сохранения импульса: выбрасывая реактивную струю, ракета подвержена силе реакции F , приводящей ее в движение. Эта сила равна количеству движения, уносимого в секунду реактивной струей: $F = \dot{m}v$, где \dot{m} – масса вещества струи, выбрасываемая ракетой в секунду, а v – скорость струи. Эффективность ракетного двигателя существенно характеризуется величиной

удельного импульса¹, нормированного на величину выбрасываемой в секунду массы. Очевидно, что ракета тем эффективнее, чем меньше она теряет рабочего вещества при заданной силе тяги. Анализ показывает, что удельный импульс тем больше, чем выше скорость струи и чем меньше молекулярный вес вещества струи. Максимально высоким удельным импульсом должна обладать ракета, у которой реактивная струя представляет собой луч света – поток фотонов, т.е. частиц, движущихся с предельной в природе скоростью – со скоростью света c .

Идея подобной *фотонной ракеты* была выдвинута ракетчиками в середине прошлого века, и до настоящего времени она нашла воплощение только на страницах научной фантастики². Дело в том, что, будучи предельно экономной в отношении расходуемой массы рабочего вещества (в качестве которого выступает лучистая энергия), такая ракета нуждается в чудовищных расходах энергии. В самом деле, заданная единичной тягой $F = 1$ ньютон.

¹ https://ru.wikipedia.org/wiki/Удельный_импульс

² https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотонный_двигатель



Проект фотонной ракеты Эйгена Зенгера. 1957 год.
 Источник: Wikipedia, https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотонный_двигатель

Полагая скорость $v = c$, находим требуемую секундную массу \dot{m} лучистой энергии E , используя соотношения $E = mc^2$ и $F = \dot{m}c$: $\dot{m} = 1 \text{ Н}/c \cong 3.3 \cdot 10^{-9} \text{ кг}$ и $E \cong 3 \cdot 10^8 \text{ Дж}$.

Результат впечатляющий: излучаемая энергия почти ничего не весит – всего 3.3 микрограмма в секунду, но ее мощность грандиозна – три десятых гигаватта. Достаточно вспомнить, что мощность 1 ГВт – типичная единица измерения мощностей блоков атомных электростанций. И все это для обеспечения тяги в 1 Н, т.е., всего $\cong 102$ грамма силы!

Сопоставим это фантастическое чудо с реальным чудом техники – с ракетой «Сатурн-5», доставлявшей людей на

Луну³. Вторая и третья ступени этой ракеты были оснащены кислородно-водородными двигателями J-2 Rocketdyne, каждый из которых развивал тягу около 1 миллиона ньютонов (10^6 Н), сжигая в одну секунду около 80 кг водорода, что соответствует тепловой мощности около 10 ГВт. В пересчете на тягу в 1 Н это дает потребляемую мощность около 10 кВт, что на 4 порядка меньше энергии, излучаемой фотонной ракетой при равной тяге!

Вообще говоря, энергетический проигрыш на 4 порядка – это еще не смертный приговор. Огромный проигрыш можно восполнить соответственным повышением эффективности горючего. Действительно, великолепный кислородно-водородный двигатель использует химическую реакцию окисления водорода с энергетическим выходом около 120 МДж на 1 кг водорода, или около 2.5 эВ на одну молекулу водорода. Естественно, казалось бы, перейти

от химических реакций к ядерным, где счет энергии идет уже на миллионы электрон-вольт! Поэтому рассмотрим перспективы ядерных фотонных ракет, каковыми (т.е. ядерными) они, впрочем, и виделись исходно авторам этих идей.

Идеальная (фантастическая) фотонная ракета подразумевала использование реакции аннигиляции вещества и антивещества, в результате чего якобы вся масса топлива превращается в лучистую энергию, которая с помощью отражателей преобразуется в направленный луч. Однако подобный проект оказался неосуществимым по ряду причин. Во-первых, мы

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Saturn_V

не умеем создавать значительные количества антивещества и не умеем его запасать. До недавнего времени ядерщики умели производить только незначительные потоки позитронов, которые удавалось удерживать в накопительных кольцах. Во-вторых, аннигиляция приводит к полному превращению вещества в излучение только в случае электрон-позитронных столкновений. В-третьих, не существует эффективных отражателей для γ -излучения.

Тем не менее идея фотонной ракеты с ядерным источником энергии не представляется безнадежной, имея в виду весь уже 80-летний опыт ядерной энергетики. Отвлечемся от нереальной идеи аннигиляции и обратимся к другим источникам ядерной энергии. Таковых имеется три:

1) ядерный синтез; впрочем, этот источник явно не пригоден в обозримой перспективе, потому что до сих пор реализован только в режиме разрушительного взрыва, несмотря на уже затраченные 70 лет на разработку путей управляемого синтеза и почти 60 лет на попытки осуществления дозированных мини-взрывов;

2) ядерный реактор;

3) радиоактивный изотоп.

Если сравнивать энергетические возможности ядерных источников энергии, то они распределяются следующим образом⁴. Приняв за единицу эффективности реакцию аннигиляции электрона и позитрона, эффективности преобразования массы в энергию (любого сорта – кинетическую энергию частиц и лучистую энергию) трех перечисленных ядерных источников распределяются так:

1) в реакции ${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \Rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$ (реализована в водородной бомбе) преобразование массы ядерной взрывчатки в кинетическую энергию

⁴Таблицы физических величин. Справочник под редакцией академика И.К. Кирикова. Москва, Атомиздат, 1976.

нейтронов происходит с эффективностью всего около 0.4%;

2) эффективность реакции деления урана-235 (или плутония) близка к 0.1%;

3) эффективности выделения ядерной энергии при распаде радиоактивных изотопов сильно различаются от изотопа к изотопу, не превышая, однако, эффективности реакции деления урана (или плутония). Но при этом необходимость наработки и хранения значительных количеств «горючего» требует использовать только долгоживущие изотопы, выбор среди которых не велик – это прежде всего изотопы полония с энергией α -распада около 5 МэВ и с эффективностью около 0.003%.

Начнем с третьей возможности. Несмотря на ее наименьшую энергетическую эффективность, она имеет преимущество необычайной технической простоты и надежности фотонного двигателя на ее основе. Нет ничего проще! Достаточно заключить, например, изотоп полония ${}^{210}\text{Po}$ в вольфрамовый контейнер необходимого объема, чтобы этот объем разогрелся до достаточно высокой температуры (один кубический сантиметр ${}^{210}\text{Po}$ выделяет мощность около 1320 Вт). При этом ядерная энергия распада будет целиком преобразовываться в тепло, которое будет в условиях космического вакуума полностью уходить в виде теплового излучения. Если поместить контейнер в фокус параболического алюминиевого зеркала, почти идеального отражателя для теплового излучения, то получится источник квазипараллельного луча. Выбор размера контейнера и массы полония, обеспечивающих безопасный разогрев подобного ядерного светильника, – простая инженерная задача, на деталях которой нет смысла останавливаться на этом этапе. Важнее оценить динамические возможности подобной «ракеты», чтобы понять, стоит ли овчинка выделки.

Оценим предельное ускорение, которое может обеспечить описанный ядерный фонарь. Для этого будем считать, что всю массу ракеты M определяет радиоактивное топливо и что вся энергия радиоактивного распада переходит в направленное излучение. При известном времени жизни τ изотопа ($\tau = \tau_{1/2} \ln 2$, $\tau_{1/2}$ – время полураспада) мощность $W(t)$ уходящего излучения от ядерного фонаря массы M равна, очевидно,

$$W(t) = \varepsilon a M \exp(-t/\tau) / (A\tau), \quad (1)$$

где ε – энергия α -частицы, A – атомный вес изотопа, a – число Авогадро. Экспоненциальный множитель учитывает распад изотопа со временем t . Ускорение $G(t)$ находится делением силы $F = W/c$ на массу M :

$$G(t) = G_0 \exp(-t/\tau), \quad G_0 = \varepsilon a / (A\tau), \quad (2)$$

При использовании в качестве топлива радиоактивного изотопа ^{210}Po ($\varepsilon = 5.3$ МэВ, $\tau_{1/2} = 138$ дней) получаем в качестве верхней оценки ускорения $G_0 = 0.047$ см/сек². Оценка эта является верхней в двух смыслах: во-первых, мы пренебрегли массой конструкционных материалов «ракеты», в том числе массой контейнера и отражателя, не говоря уже о массе полезной нагрузки (подобного рода пренебрежение типично для нынешней ракетной техники). Действительно, при стартовом весе заправленной топливом ракеты «Сатурн-5» около 2900 тонн, ее сухой вес составлял всего 177 тонн. Во-вторых, такое ускорение соответствует моменту $t = 0$, т.е. «свежей» заправке изотопом, количество которого экспоненциально убывает со временем. При этом масса «фотонной ракеты» практически не меняется (что резко отличает ее от «химической ракеты») вследствие очень низкой эффективности конверсии массы в энергию: при α -распаде ядра ^{210}Po превращаются в стабильные ядра ^{206}Pb почти той же массы.

Ничтожное на первый взгляд ускорение 0.047 см/сек² способно, однако, сообщить «фотонной ракете» за достаточно большое время (много большее времени жизни изотопа) дополнительную скорость ΔV , равную в пределе $t \rightarrow \infty$ величине $G_0 t = \varepsilon a / (A\tau)$. Это следует из (2). Переписав его в виде

$$G(t) = dV/dt = G_0 \exp(-t/\tau)$$

и интегрируя по времени от 0 до бесконечности, для V получаем:

$$V = V_0 + G_0 \tau$$

В отличие от ускорения G предельное приращение скорости ΔV не зависит от времени жизни изотопа, определяясь только энергией распада и атомным весом. Для ^{210}Po дополнительная скорость $\cong 8.1$ км/сек, т.е. скорость вполне «космического» масштаба.

Для каких задач имело бы смысл прибегать к подобному фотонному двигателю? Пожалуй, только для исследований дальнего космоса – за пределами Солнечной системы. В ее пределах доступны другие способы увеличения скорости космического аппарата. Это прежде всего использование гравитационных маневров в окрестности планет, что позволяет изменять скорость аппарата на величины порядка орбитальных скоростей планет. Возможно также использование солнечного паруса в качестве версии фотонного двигателя⁵ (действительно, в окрестности орбиты Земли мощность

⁵ См., например, *McInnes C.R. Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications. London: Springer, 2013.* Опубликованы, впрочем, и проекты достижения релятивистских скоростей мини-аппарата, снабженного зеркалом, освещаемым с Земли мощным лазером: *Ilic O., Went C.M., and Atwater H.A. Nanophotonic light sails for relativistic spaceflight by high-power laser beams // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper FF1H.6.*

солнечного излучения равна примерно полутора киловаттам на квадратный метр, что обеспечивает тягу того же порядка, что и «полониевый фонарь» весом в десяток граммов). Применительно же к миссии вне Солнечной системы уместнее в качестве топлива «фотонной ракеты» использовать более долгоживущий изотоп ^{208}Po , для которого $\tau_{1/2} = 2,9$ года или даже ^{209}Po с $\tau_{1/2} = 103$ года.

Как уже было отмечено, главным достоинством описанной «фотонной ракеты» выступает предельная простота ее конструкции. Существенно повысить ускорение и максимальное приращение скорости (скажем, на порядок) можно, перейдя к использованию ядерного реактора в качестве источника света, однако ценой очень значительного усложнения конструкции. Скорее всего, при этом идея «фотонного двигателя» уже не выдержит конкуренции с электрическими и плазменными ракетными двигателями,

также питаемыми от ядерного реактора. Дело в том, что, обладая предельно высоким удельным импульсом, фотонный двигатель крайне затратен в отношении расхода энергии, в то время как фактор преимущества высочайшего удельного импульса становится несущественным при малом расходе рабочего вещества по сравнению с полной массой ракеты. В самом деле: ракета с рекордным удельным импульсом, сжигающая 0.003% начальной массы, не имеет реальных преимуществ перед ракетой, сжигающей хотя бы в 100 раз больше топлива (при равных тягах). Иными словами, «фотонный двигатель» обладает избыточно высоким удельным импульсом, не дающим ему никаких преимуществ перед «нехимическими» ракетными двигателями электрического или плазменного типа, которые также имеют достаточно высокий удельный импульс, но зато много экономнее в отношении расхода энергии.