

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СКОРОСТНОЙ КОСМОНАВТИКИ XXI ВЕКА

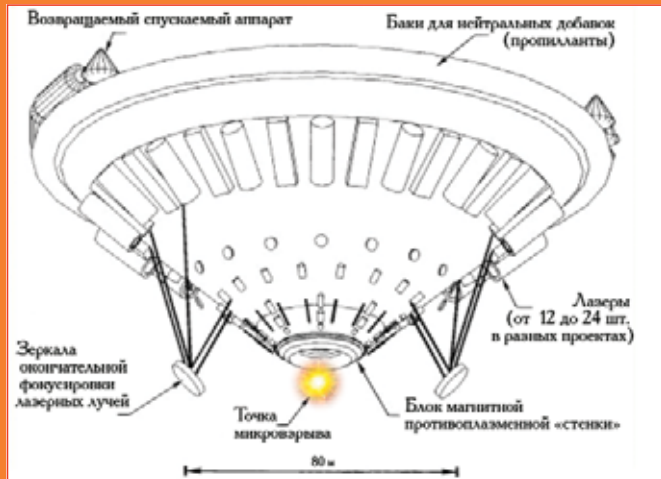
Валентин Анатольевич Белоконов, академик Академии Космонавтики, выпускник ФТФ МГУ/ МФТИ

"Легенду о философском камне я считаю отголоском века, когда люди могли трансформировать элементы и были свободны от таких нужд как наши... могли исследовать Космос и даже мигрировать в другие миры"

Фредерик Содди (1908)

"Если возможен пулемет, то возможен и звездолет"

Константин Эдуардович Циолковский (1933)



Одной из самых приоритетных разработок космической техники ближайших 15-20 лет следует ожидать реализацию применения микровзрывного лазерного термояда для нового класса ракетных двигателей космических пилотируемых кораблей. Характерным примером здесь служит проект VISTA (NASA-LINL) периода 1986-2003 гг. Это - некое циклопическое подобие вьетнамской шляпы массой 6000...6500 т, подталкиваемой к Марсу термоядерными микровзрывами энергии по 7,5 гигаджоулей до 30 раз в секунду. Для инициирования 40-миллиграммовых зарядов из дейтерий-тритиевой смеси используются программируемые по интенсивности 5-мегаджоулевые лазерные выстрелы длительностью ≈ 20 наносекунд. Это дает уплотнение DT заряда до ≈ 100 г/см³ и микровзрыв длительностью около наносекунды. Микробомба обременена десятками грамм нетермоядерной субстанции (propellant - обычный водород общей массой 4000 т), поэтому скорость разлета плазмы микровзрыва характеризуется величиной ≈ 200 км/с, обеспечивая максимальную скорость корабля до такой же величины при тяге до ≈ 20 тс. 200 тонн полезной нагрузки при марсианской экспедиции подразумевают до 10 астронавтов и 2-3 возвращаемых модуля для высадки на поверхность Марса. Стоимость такой экспедиции может составить не менее \$100 миллиардов.

Впервые идея использования ядерной (ранее был в моде термин "субатомной") энергии была в обобщенной, корректной форме внятно высказана студентом Робертом Годдардом. 25-летний будущий классик американской астронавтики в своей публикации 1907 г. выразил уверенность, что именно установленная в 1881 г. Джозефом Джоном Томсоном эквивалентность массы и энергии открывает человечеству реальную перспективу освоения космического пространства.

По сути дела, речь идет об инженерной интерпретации соотношения $E = mc^2$, которое подразумевает наличие массы m у энергии E . И более того, возможность извлечения энергии E из массы m .

Исторические примеры здесь не лишни.

Фриц Газенёрль опубликовал мысленный эксперимент такого рода (февраль 1905 г.): невесомый контейнер с зеркальными стенками заполняется квантами света ($E = \Sigma h\nu$), в результате чего обретает массу $m \cong E/c^2$ (коэффициент у него был не точно равен единице из-за переопределения условий задачи).

До Газенёрля британец Лармор опубликовал в 1900 г., основываясь на электромагнетизме Максвелла (1873), задачу о взаимной аннигиляции электрона с гипотетическим тогда антиэлектроном. Результат - массы обеих частиц исчезают, трансформируясь в расходящееся электромагнитное излучение. Открытие позитрона (Дирак и Андерсон: 1928-1931) сделало реальной эту академическую задачку об извлечении энергии из массы. Автор данной статьи обсуждал в 1962 г. с великим А.М. Люлькой принципиальную возможность создания фотонной ракеты на основе "аннигиляционного лазера", упорядоченный гамма-луч которого генерируется в смеси электронов с позитронами, или в газе, молекулами которого являются "атомы" позитрония...

Изложенное выше не означает попытку приписать создание теории относительности именно Дж. Дж. Томсону. Релятивистская связь энергии E с массой m вообще и массой покоя m_0 в частности была обоснована несколькими выдающимися физиками, отно-

сительная роль каждого из которых подлежит особой оценке.

Здесь уместно лишь упомянуть имена тех, кого нелепо исключить из перечня открывателей эквивалентности массы и энергии: Астон, Вайцзеккер, Газенёрль, Гамов, Дирак, Лармор, Лоренц, Перрен, Планк, Пуанкаре, Содди, Томсон, Толмен, Хан, Эддингтон, Эйнштейн, Юкава.

Что касается провидцев перспектив применимости закона эквивалентности массы и энергии, то наряду с Годдардом и Содди таковым являлся наш Богданов (А. Малиновский), упомянувший **урановый** двигатель на трассе Марс - Земля (в романе "Красная Звезда", 1908). Такие классики космонавтики как Эно Пельтри и Циолковский здесь поотстали...

Из достаточно общего соотношения между полной энергией E , полной массой m , массой покоя m_0 и импульсом $P \equiv mv$

$$E = mc^2 = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2}$$

следует не только общеизвестное

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

но и соотношение для частиц, лишенных массы покоя (привычных фотонов и гипотетических гравитонов)

$$E(m_0 = 0) = mc^2 = hv = pc,$$

что фундаментально для фотонной (и "гравитонной"?) ракеты.

Кстати, согласно идеям Иваненко и Бриджмена, создание гравитационного аналога лазера возможно, поскольку продуктами аннигиляции могут оказаться гравитоны.

Идеальная фотонная ракета, работающая за счет аннигиляционных фотонов, использующая в качестве топлива 100 % вещества, характеризуется абсолютным максимумом топливной эффективности

$$(\Delta m = m_0)c^2/m_0 = c^2 = (3 \cdot 10^{10} \text{ см}/c)^2 \cong 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж/г, ("дефект массы"} \cong 100 \%).$$

Наше Солнце горит (если угодно - тлеет миллиарды лет) за счет более скромного превращения массы в энергию:

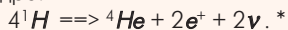
$$c^2\{m(4^1\text{H}) - m(^4\text{He})\}/m(4^1\text{H}) \approx 600 \text{ Дж/нг,}$$

то есть за счет "дефекта массы" $\approx 6 \cdot 10^{11}/9 \cdot 10^{13} \approx 0,7\%$.

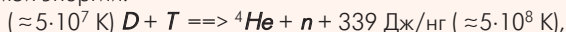
Термоядерный синтез - "варка" элементов (до никеля и железа) из более легких происходит с высвобождением энергии ΔE , соответствующим новому уровню стабильности - "цене" энергетической устойчивости ядер - продуктов термоядерного синтеза. Поэтому "пепел" термоядерного горения состоит из совокупности ядер, масса которой меньше, чем масса совокупности ядер исходного "горючего":

$$\Sigma E = (\Delta M)c^2 \equiv (M_{\text{горюч}} - M_{\text{пепел}})c^2.$$

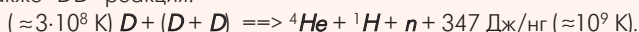
Солнце горит в силу не одноступенчатой трансмутации водорода в гелий при $T \approx 15 \cdot 10^6$ К и плотности $\rho \approx 100$ г/см³ солнечного ядра:



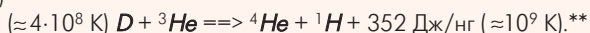
При ≈ 11 -мегатонном взрыве (первого ноября 1952 г.) 80-тонной бомбы "Майк" шли реакции горения трития T с дейтерием D , дающей нейтроны n , на долю которых приходится 50...70 % выделяемой энергии:



а также "DD" реакция:

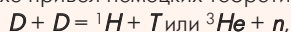


В связи с лучшей применимостью и конкурентоспособностью Гелия-3 как "перспективного" термоядерного топлива космических кораблей, упомянем реакцию (основной канал без нейтронов)



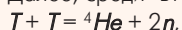
Кстати, поскольку реальное использование термоядерного топлива связано с неполным его выгоранием, для оценок допустимо считать калорийность его равной 100 Дж/нг для DD , DT и $D^3\text{He}$ реакций.

Поиск путей к созданию водородной бомбы в Германском Рейхе привел немецких теоретиков к рассмотрению реакций



а также $6\text{Li} + D \implies 2^4\text{He}; 7\text{Li} + D \implies 2^4\text{He} + n \dots$

Далее, среди "вторичных" немаловажна реакция



ухудшающая шансы применения DT -топлива для космических кораблей с магнитными соплами.

Далее, удобной оценкой доли ϕ выгорания данного топлива является формула

$$\phi \approx 1 / (1 + \{\rho R\} / \langle \rho R \rangle),$$

где $\{\rho R\}_{DT} = 6 \dots 7$, $\{\rho R\}_{DD, D^3\text{He}} = 40 \dots 50$ г/см².

Поскольку масса сферической конфигурации

$$m \equiv (4/3)\pi R^3 \rho \equiv (4/3)\pi \langle \rho R \rangle^3 / \rho^2,$$

значит энергия Y сгорания топлива калорийности q составляет

$$Y \equiv m\phi q \equiv \phi q (4/3)\pi R^3 \rho \equiv \phi q (4/3)\pi \langle \rho R \rangle^3 / \rho^2,$$

что означает при $\phi \approx 40\%$

$$Y (\text{Дж}) \approx 10^{14} / \rho^2 (DT) \dots \approx 10^{16} / \rho^2 (DD, D^3\text{He}).$$

Получается, что подходящий для космического корабля микровзрыв $\approx 10^{10}$ Дж капсулы с $D^3\text{He}$ обусловлен суперсжатием топлива до 1 кг/см³, в то время как такая же плотность DT топлива дает более компактный взрыв $\approx 10^8$ Дж, но с худшей экологичностью.

Здесь очевидна ключевая проблема практической достижимости суперплотности термоядерного топлива. Весь технический прогресс дотермоядерного мира творился под потолком "нормальной" плотности, во всяком случае не превосходящей что-нибудь около 50 г/см³, притом для веществ уже очень плотных.

Теперь 1000 г/см³ перестает быть фантастикой, а это - десятикратная плотность плазмы в центре Солнца! Можно не сомневаться в предстоящем изобилии изобретений, основанных на этой принципиальной технической революции, инициированной гонкой ядерных вооружений. Некоторым вкладом автора в этот прогресс является работа, представленная академиком Роальдом Сагдеевым в Доклады АН СССР (публикация 1975 г.).

Тем не менее кое в чем "все старо как мир" даже в нынешней "революции сверхплотностей", хотя автору и удалось найти нечто новое неожиданное в попытках участия в этой революции.

* Здесь ν - это нейтрино, e^+ - позитрон. В самых ранних работах, когда (до 30-х годов) эти частицы были неизвестны, имелась в виду "реакция" $4^1\text{H} + 2e^+ \implies 4^4\text{He}$, подвергнутая резонным сомнениям.

** Залежи Гелия-3 (^3He) на лунной поверхности настолько велики, что привлекли заинтересованное внимание даже олигарха Чубайса.

Проблема оптимизации процессов высокого сжатия уже оказывалась чрезвычайно актуальной для сверхзвуковых воздушно-реактивных двигателей. Ранее считалось "вполне естественным" возникновение скачка уплотнения (ударной волны) перед входом в ВРД. И даже сам Стечкин считал эффективность таких двигателей слишком низкой при достаточно высоких числах Маха, поскольку рост энтропии в этом скачке вредит сжатию.

Кстати, до сих пор тиражируют том "Гидродинамика" знаменитого курса Ландау и Лифшица, где (с 1-го издания 1944 г.) утверждается, что, мол, в сверхзвуковом потоке перед любым телом возникает ударная волна.

Автору довелось пытаться убедить Лифшица убрать эту формулировку, но она была оставлена, правда, в ослабленной форме.

Итак, сильная ударная волна мешает высоким сжатиям. Иными словами, даже очень сильный удар не дает сильного сжатия. Что же делать?

Проиллюстрируем эту принципиальную проблему строгими выкладками для типичных сжимаемых сред.

Для понимания сути дела достаточно исходить из уравнения состояния совершенного газа при локальном термодинамическом равновесии, меняющемся согласно уравнению Гиббса

$$dE = TdS - pdV \text{ при } E = pV / (\gamma - 1) \equiv (f/2)pV.$$

Этим нетривиально моделируется весьма широкий диапазон условий - от холодного "газа Ферми-Дирака" до горячей плазмы при $f = 3$ или $\gamma \equiv c_p / c_v = 5/3$, а также "Бозе-газа" фотонов при $f = 6$ или $\gamma = 4/3$, который доминирует при достаточно высокой температуре любой субстанции.

При таком достаточно общем подходе интегрирование уравнения Гиббса дает зависимость прилагаемого давления от степени сжатия при сопутствующем росте энтропии:

$$p_+ / p_- = (p_+ / p_-)^\gamma \exp \int (T/E) dS \implies (p_+ / p_-)^\gamma \exp(\Delta S / c_v) \text{ при } E \implies c_v T.$$

Таким образом, рост энтропии принципиально ограничивает достижение высоких сжатий. Но (аналогично циклам Дизеля и Карно) энтропия подсказывает с температурой при зажигании относительно холодного топлива.

В конкретном случае ударных волн сжатие сред строго ограничено величиной $f + 1 \equiv (\gamma + 1) / (\gamma - 1)$, поскольку рост числа Маха таких волн подразумевает существенный рост энтропии:

$$(p_+ / p_-)_{\text{shock}} = (f + 1) / (1 + f/M^2) \implies f + 1 \text{ при } M \implies \infty.$$

Оптимальное решение этой трудности было найдено в 1944 г. Клаусом Осватичем (Австрия), но публикация была закрытой, а затем не афишировалась из-за возможности плагиата. Теорема Осватича звучит просто: сжимать не одной, а серией ударных волн равномерной амплитуды. Именно такой метод широко применен для эффективных ВРД при $M > 2$, как в Ту-144 и "Конкорде", а теперь внедряется при лазерном термояде, но уже в тщательно программируемом нестационарном режиме суперсжатия.

Что касается автора, то мною найдено точное аналитическое решение для низкоэнтропийного многоскачкового сжатия, наглядным примером которого является процесс реверберации волн при симметричном (веерообразном) захлопывании книги, все страницы которой ударно соприкасаются одновременно.

В следующей статье будет показано, сколь непосредственное отношение имеет такая модель сжатия к созданию термоядерных космических кораблей XXI века. □

Пользуясь случаем, выражаю глубокую благодарность Архипу Михайловичу Люльке, Валентину Петровичу Глушко, Адольфу Буземанну, Александру Александровичу Микулину, Борису Ивановичу Каторгину, Виктору Михайловичу Чепкину, Николаю Аполлоновичу Анфимову, а также Игорю Петровичу Волку, Валентину Анатольевичу Битюрину и Чарльзу Орту за неформальный интерес к усилиям автора в этой проблематике.

Краткая хронология публикаций

1982. J. Nuckolls: PERSPECTIVES OF INERTIAL FUSION, PHYSICS TODAY (русск. перевод: УФН 1984). Лекция пионера и классика микровзрывного термояда.
 1998. J. Lindl: INERTIAL CONTROLLED FUSION, Springer, Berlin - New York.
 2003. Ch.Orth: VISTA-SPACE TRANSPORT BY INERTIAL FUSION, Liverpool UCRL-TR.
 2005. Ядерн. синтез с инерц. удержанием (ред. Б. Шапков, ИТЭФ РАН).
 2005. V.A. Belokogne: Micro Fusion Flying Machine, XV MHD conf., VI MHD-AERODYN. Workshop, Moscow May, pp 840-853.
 2010. М. Баско: Лекции (МФИ/МИФИ) по основам инерциального термояда, Москва, 2010.