

Анализ осуществимости кинетического реактивного двигателя

Зотьев Дмитрий Борисович, д.ф.-м.н.,
профессор кафедры общей физики Волжского филиала МЭИ

Проблема межзвездной миссии фантастически сложна. Чтобы космический аппарат мог достичь ближайших звезд за время, сравнимое с веком, его скорость должна быть выше 10 000 км/сек. При современном уровне науки нет способа движения, который позволяет развивать такую скорость. Хотя предложено много идей, продуманных в различной степени, в каждой из них присутствует оптимистическое, но безосновательное допущение о физике процессов и/или технологических возможностях. Поэтому поиск двигателей для звездолетов продолжается и вызывает большой интерес. Одна из идей называется кинетическим реактивным двигателем [1, 2]. В общем виде она также описана в [3].

Предполагается разогнать части массы за счет кинетической энергии целого. Безотносительно к реализации, это не может стать ключом к проблеме межзвездного полета. Допустим, что нужно разогнать автоматический зонд до скорости 20 000 км/сек, что означает 65 лет полета до Альфы Центавра. Зонд должен нести двигательную установку и быть способным отправлять сигналы, которые не рассеются на пути в световые годы (для чего мощность излучения должна иметь порядок 1 МВт). Поэтому конечная масса едва ли может быть меньше 100 т. Тогда конечная энергия аппарата составит $2 \cdot 10^{19}$ Дж. Поскольку корабль, как предполагается, разгонится до 20 000 км/сек за счет начального запаса кинетической энергии, она не может быть меньше конечной. Допустим, что разгон начинается со скорости 10 км/сек. Тогда начальная масса корабля составит не менее 400 млн. тонн! Даже если снизить массу зонда до 1 т, чего заведомо недостаточно по многим соображениям, а скорость уменьшить до 10 000 км/сек, то и в этом случае начальная масса должна быть гигантской – не менее 1 млн. тонн. Задача разгона такой массы до 10 км/сек не выглядит более простой, чем одной тонны до 10 000 км/сек. В обоих случаях, образно говоря, придется утилизировать энергию несколько тысяч ядерных бомб классической мощности 20 Кт. Кроме того, миллионы тонн массы нужно еще поднять с Земли, преодолевая гравитацию. В статьях [1,2] эта проблема не затронута.

Снижать планку от 10 000 км/сек до 1 000 км/сек практически бессмысленно, т.к. время полета к ближайшим звездам возрастет до тысячелетий. При этом скорость 1 000 км/сек избыточна для Солнечной системы. При 100 км/сек полет до Сатурна по радиусу от

Солнца продлился бы около 5 месяцев, а до Нептуна - немногим больше 1.5 года. Это приемлемо для пилотируемой экспедиции. Достижение 100 км/сек стало бы важным шагом в развитии космонавтики. Ясно, что масса корабля для пилотируемого, межпланетного полета, не может быть существенно ниже 100 т. Тогда для ускорения на 100 км/сек за счет кинетической энергии (с потерей массы), при начальной скорости 10 км/сек масса корабля должна быть не меньше 10 000 т. Фактически она будет больше. Вместо задачи разгона 100 тонн до 100 км/сек мы получили проблему разгона десятков тысяч тонн до 10 км/сек, а также подъема такого груза с Земли. Можно пытаться упростить задачу, собирая корабль на окололунной орбите. Тогда при стартовой скорости 1.7 км/сек – это первая космическая скорость Луны, начальная масса превысит 350 000 тонн. Таким образом, предлагаемая в [1,2] идея выглядит привлекательной только на первый взгляд, оставляя открытым вопрос о реализации такого принципа.

В [1] предлагается следующая схема. Сначала обычные ракеты разгоняют корабль до нескольких км/сек. На его пути размещены малые "зонды", которые будут влетать в камеру двигателя, сталкиваться там с "мишенями" и испаряться вместе с ними. Таким образом, кинетическая энергия преобразуется в тепло. Затем газообразные продукты взрыва истекают через сопло, чем создается тяга. В результате часть кинетической энергии расходуется на разгон корабля, который освободился от мишеней. Автор считает, что таким способом можно достичь скоростей ~10 000 км/сек, необходимых для межзвездных экспедиций. Выше было показано, что это - иллюзия, безотносительно к реализации. В действительности одна проблема — разгон до большой скорости заменяется другой - разгон гигантской массы, и к ней добавляется еще одна. А именно: как заставить кинетический реактивный двигатель работать?

В [1] приводятся вычисления, которые, на первый взгляд, выглядят убедительно. Ниже даны другие выкладки, которые раскрывают суть идеи. Пусть в системе отсчета корабля зонд массы m влетает в двигатель со скоростью v . После абсолютно неупругого удара, который наиболее эффективен для производства тепла, корабль получит импульс $mv = (M + m)w$ против движения. Согласно [1], энергия зонда преобразуется в тепло Q («кинетический взрыв»). Тогда

$$Q = \frac{mv^2}{2} - \frac{(M + m)w^2}{2} \quad \text{где} \quad w = \frac{mv}{M + m}$$

Его часть αQ трансформировалась в механическую энергию, из которой кораблю досталась доля $(m + \tilde{m}) / (M + m + \tilde{m})$, где \tilde{m} — масса мишени. Тогда приращение скорости корабля:

$$\Delta V = \sqrt{\frac{m + \tilde{m}}{M + m + \tilde{m}} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{mv^2}{2} - \frac{(M + m)w^2}{2} \right) \cdot \frac{2}{M}}$$

Эта величина может быть больше w , даже если α не близко к единице. В самом деле, при $\alpha = 1$ условие $\Delta V > w$ равносильно $\tilde{m}M > 0$.

Итак, с точки зрения механики возможно, что результирующее приращение скорости будет положительным. Означает ли это, что «кинетический реактивный двигатель» может работать? Ответ, как мы увидим, отрицательный. Но если бы он был способен работать, то расход рабочего тела определялся бы следующим аналогом формулы Циолковского:

$$V = u \frac{\tilde{m} + m}{\tilde{m}} \ln \frac{M + \tilde{M}}{M} \quad (1)$$

где V — скорость аппарата массы M после того, как израсходован запас мишеней с общей массой \tilde{M} (мишени испарились вместе с зондами и вылетели через сопло), u — скорость струи газов относительно двигателя.

Однако есть принципиальные проблемы, которые не учтены в статье. Предполагается, что при скорости зонда в десятки, сотни и тысячи км/сек его можно остановить, поставив прочную "мишень". Струя металла, которую производит кумулятивный снаряд, имеет скорость ~ 10 км/сек и пробивает десятки см брони. Давление, которое при этом развивается, имеет порядок 10 ГПа. Никакой материал не может противостоять такому давлению. Например, предел текучести вольфрама не превышает 1.5 ГПа, а предел прочности алмаза близок к 2 ГПа. Оценим давление, которое развивает «зонд».

Допустим, что зонд представляет собой стальной цилиндр с высотой $h = 10$ см и массой 1 кг. Чтобы испарить его потребуется около 10 МДж. Такую кинетическую энергию цилиндр будет иметь при скорости 4.5 км/сек. Кроме того нужно испарить мишень, поэтому пусть $v = 10$ км/сек. Тогда кинетическая энергия эквивалентна ~ 10 кг ТНТ. Оценим давление, которое возникло бы при торможении цилиндра неподвижной, абсолютно твердой мишенью. Время до полной остановки $\tau = h/v = 10^{-5}$ сек. При этом

импульс уменьшается от $p = 10^4$ до нуля, следовательно средняя сила торможения $F = p/\tau = 10^9$ Н. Тогда среднее давление цилиндра на мишень близко к 1 ТПа. Это на два порядка выше пределов прочности *всех* материалов. Цилиндр насквозь пройдет мишень и стенку камеры сгорания. При этом давление пропорционально квадрату скорости. Зонды будут не столько поставлять тепло в двигатель, сколько разрушать его.

Можно ли спасти эту идею, используя в качестве «зондов» тонкие диски или пленки, ориентированные перпендикулярно движению? Если в примере с цилиндром уменьшить его высоту в β раз, а площадь основания пропорционально увеличить, то время торможения уменьшится, что увеличит в β раз силу торможения. Поэтому оценка давления ~ 1 ТПа не изменится. За счет снижения массы зонда до ~ 0.1 кг давление уменьшится на порядок, однако останется выше пределов прочности. При скорости 10 км/сек энергия такого зонда эквивалентна ~ 1 кг ТНТ. Очевидно, что меньший энерговыход лишен практического смысла.

Однако можно предположить, что удар достаточно тонкого диска (пленки) не разрушит двигатель, а вызовет абляцию поверхности мишени. В какой-то мере это так и будет, хотя абляция незначительна (см. ниже). Допустим, что стальная пленка с диаметром 50 см и толщиной 10 микрон на скорости $v = 100$ км/сек ударила о мишень поверхностью. Такая пленка имеет массу 15.5 грамм и кинетическую энергию 77.5 МДж, которая эквивалентна 18.5 кг тротила. Аналогично примеру с цилиндром, давление пленки оценим в 80 ТПа, но из-за инертности вещества мишени пленка не сможет глубоко проникнуть в материал. На первый взгляд все выглядит оптимистично.

Проблема точного наведения зондов в камеру двигателя весьма сложна даже при скорости 10 км/сек. Ошибки в данном случае имели бы катастрофические последствия! Однако трудности быстрого закрывания входного канала имеют фундаментальный характер. Легко понять, что нужно закрыть диафрагму за миллисекунды, иначе раскаленные газы успеют вырваться из камеры. Чтобы получить из сверхтонкой пленки существенную энергию, она должна иметь диаметр в десятки см. Закрыть такое отверстие за миллисекунды крайне сложно, т.к. ускорение частей диафрагмы достигнет $\sim 10\,000$ g. Энергия, которая для этого потребуется, может превысить гипотетический выход кинетического двигателя. Магнитная заслонка, которую упоминает автор, отчасти решает эту проблему. Однако она не остановит нейтральные атомы и микрочастицы вещества, а

расчет на производство полностью ионизированной плазмы является необоснованным (см. ниже).

Оценим принципиальные возможности кинетического двигателя, безотносительно к техническим проблемам. Рассмотрим процесс столкновения с зондом в системе отсчета корабля, которая зафиксирована перед столкновением. Будем считать, что с выделяемым теплом в дальнейшем ничего не происходит. Это позволит сосчитать количество тепла Q , которое выделяется в процессе столкновения. Тогда на произвольном, бесконечно-малом промежутке времени $[t; t + dt]$ в силу закона сохранения энергии:

$$dE_0 + dB_c + dB_s + dR_c + dR_s + dK_c + dK_s + dE_s + dQ = 0 \quad (2)$$

где E_0 - энергия «зонда», $dB_c + dB_s$ - приращение энергии связи атомов, dB_s - приращение энергии связи в твердом веществе, dB_c - приращение энергии связи от разрушения твердой структуры вещества (зонда и мишени), R_c - энергия отталкивания атомов конденсированной материи, в которую превращается твердое вещество, R_s - энергия отталкивания атомов твердого вещества, K_c - кинетическая энергия разлета конденсированной материи (в т.ч. энергия абляции), K_s - кинетическая энергия разлета твердого вещества (выбитые фрагменты двигателя и т.п.), E_s - кинетическая энергия корабля, приобретенная за счет удара зондом, Q - термическая энергия, начальное значение можно считать нулевым.

В любом куске твердого вещества сумма энергии связи и взаимного отталкивания атомов постоянна, поэтому $dB_s + dR_s = 0$. Тогда из (2) получаем:

$$dE_0 + dB_c + dR_c + dK_c + dK_s + dE_s + dQ = 0$$

Интегрируем это уравнение:

$$(0 - E_0) + (0 - B) + \int dR_c + \int (dK_c + dK_s) + E_s + Q = 0 \quad (3)$$

где E_0 - начальная энергия зонда, $B < 0$ - начальная энергия связи атомов в зонде и мишени. Поскольку по завершении столкновения зонд распался на атомы, энергия

взаимодействия атомов конденсированной материи стала равной нулю (ее ничто не сжимает). Поэтому $\int dR_c = 0$. Часть кинетической энергии перейдет в бесполезное тепло \tilde{Q} (нагрев двигателя и других узлов), остаток обозначим \tilde{K} , таким образом $\int (dK_c + dK_s) = \tilde{Q} + \tilde{K}$. Окончательно из (3) получаем :

$$Q = E_0 - |B| - E_s - \tilde{Q} - \tilde{K} \quad (4)$$

Правая часть (4) меньше кинетической энергии зонда, т.к. все вычитаемые величины положительны. Ниоткуда не следует, что значительная часть E_0 перейдет в тепло. В статье [1] этот вопрос не рассматривается. По существу предполагается, что в правой части (4) есть *только* величина $E_0 = mv^2 / 2$. Утверждается, что в результате кинетического взрыва получится горячая плазма, однако эта декларация безосновательна. При этом учет энергии связи электронов с ядрами только уменьшит Q , т.к. добавит отрицательное слагаемое в правую часть (4). В [1] вводится КПД η , как доля тепла Q , преобразованная в кинетическую энергию струи. Однако в действительности $Q \ll E_0$, т.к. из энергии, которая останется после разрыва межатомных связей в зонде и мишени ($E_0 - |B|$), почти все будет затрачено на разрушение двигателя и его нагрев ($\tilde{K} + \tilde{Q}$). Из-за относительной малости Q КПД η окажется ничтожным. Величиной E_s можно пренебречь, но остальные члены (4) радикально меняют картину «кинетического взрыва». Рассмотрим численные оценки.

В статье [1] вещество считается идеальным газом, что означает пренебрежение всеми видами внутренней энергии, кроме тепловой. Однако при давлении в миллионы бар, которое развивается от удара на скорости ~ 10 км/сек, без дополнительного подогрева твердое вещество ведет себя, как конденсированная материя. Отнюдь не газ! Это стало известно после исследований, связанных с разработкой ядерного оружия. В процессе удара преобладает энергия отталкивания электронных оболочек атомов. При этом термическая энергия не является существенной, что характерно для конденсированной материи. По мере того, как зонд теряет структуру твердого тела и превращается в сгусток такой материи, давление исчезает и энергия отталкивания переходит в кинетическую энергию разлета вещества. И хотя эта кинетическая энергия $K_s + K_c$ может частично

перейти в тепло \tilde{Q} , его основная часть будет рассеяна в двигателе, а не в зонде и мишени. При этом полезная энергия Q мала сравнительно с $E_0 = mv^2 / 2$ (см. ниже).

Теперь оценим внутреннюю энергию конденсированной материи под давлением в 10 млн. бар (атмосфер). Известно, что ее массовую плотность можно оценить формулой

$$E = \frac{P + P_0}{(\gamma - 1)\rho} \quad (5)$$

где ρ - плотность, P - внешнее давление, P_0 - давление внутри вещества при нормальных условиях, γ - эффективный термодинамический показатель. Последний экспериментально определяется для каждого из материалов. Кроме того он зависит от давления, однако в приближенных вычислениях можно принять, что $(\gamma - 1)\rho = const$. Для примера рассмотрим медь: $P_0 = 575$ Кбар, $\rho_0 = 8900$ кг/куб.м, $\gamma = 3$. По формуле (5) $E = 58$ МДж/кг, из которых на термическую энергию приходится малая часть. Результат соответствует кинетической энергии зонда массой 1 кг на скорости 10.8 км/сек. Следовательно тепло, которое выделится при ударе, заведомо недостаточно для испарения зонда и мишени под давлением ~ 1 Мбар (при нормальном давлении нужно ~ 10 МДж), не говоря о разогреве получаемых паров.

Но может быть кинетический двигатель заработает на скорости ~ 100 км/сек? Выше рассматривалась пленка с толщиной 10 мкр, диаметром 50 см и массой 15.5 грамм, которая останавливается за ~ 0.1 нс. В этом случае давление на мишень приближается к миллиарду бар. Однако импульс торможения достаточно мал, $\Delta p = 1550$ кгм/сек. Предположим, что такой удар не вызовет механических повреждений двигателя.

Оценим температуру аблирующих газов. До этого они были конденсированной материей в тонком слое на поверхности, под давлением ~ 1 Гбар. Известно, что при давлении 12.5 Гбар дейтерий имеет плотность в 1000 раз больше нормы и находится в полностью ионизированном состоянии. При этом его электронный газ является холодным Ферми-газом при Ферми-температуре 5.2 млн. К. Последнее означает, что обычная температура электронного газа существенно ниже 5.2 млн. К. На другом конце спектра находится уран, который при давлении 100 Гбар имеет плотность в 83 раза больше нормы и пребывает в состоянии с высокой степенью ионизации (около 40%). При этом его

электронный газ является Ферми-газом при Ферми-температуре 12 млн. К. Таким образом, при давлении в миллиарды бар температура вещества зонда и мишени не выше ~1 млн. К. Элементарная оценка в [1] - 45 млн. К при скорости 75 км/сек - является несостоятельной.

Чтобы оценить термическую энергию при ударе зонда на скорости ~100 км/сек, найдем из (5) плотность внутренней энергии меди под давлением $P = 1$ Гбар. Получим $E = 5.6$ ГДж/кг. При температуре $T = 1$ млн. К идеальный газ из меди имел бы внутреннюю энергию

$$U = \frac{3}{2} \nu RT = 0.2 \text{ ГДж/кг}$$

что не превышает 3.5% энергии $E = 5.6$ ГДж/кг, которую при 106 км/сек имеет масса 1 кг. Таким образом, при скорости корабля до ~100 км/сек малая часть кинетической энергии зонда трансформируется в *полезное* тепло. Расчеты тяги в [1] исходят из обратного, поэтому они безосновательны. Кроме того, поскольку малая часть $E_0 = mv^2 / 2$ перейдет в Q , большая часть будет затрачена на разрушение двигателя. При скорости 1 000 км/сек доля тепла, возможно, возрастет. Зонд с массой 1 г будет иметь энергию 500 МДж, что эквивалентно 120 кг ТНТ. Однако из (4) видно, что *вся* кинетическая энергия не перейдет в полезное тепло. Если хотя бы 10% составит $\tilde{K} + \tilde{Q}$, то стенка камеры сгорания будет пробита (направленный взрыв 12 кг ТНТ).

В статье [1] представлена известная идея инерционного, термоядерного синтеза, осуществляемого за счет соударения дейтерий-тритиевой смеси с жестким телом на скорости в сотни или тысячи км/сек [4, 5]. Нельзя исключать, что это может работать, однако элементарные оценки [1] далеки от реальности. Энергоэффективные реакции синтеза, которые до сего дня создавались только в бомбах, происходят при давлениях в миллиарды бар на *всей* поверхности термоядерного топлива. Это на много порядков выше пределов прочности *всех* материалов. Поэтому никакой тампер не сможет жестко остановить капсулу с 2_1D и 3_1T для достижения таких условий. Фактически, вещество капсулы проникнет глубоко в тампер или пройдет его насквозь. Реакции синтеза будут наблюдаться, однако общий выход остается под большим вопросом. Кроме того, заявленные в [1] температуры в десятки миллионов К заведомо не достигаются (см. выше). Поэтому оценка критерия Лоусона является несостоятельной.

Для того, чтобы зонды не разрушали двигатель, мишени должны служить экранами от ударов. Из-за экстремальных давлений, которые при этом развиваются, прочность материала не существенна. Поэтому масса мишени \tilde{m} должна быть значительно больше массы зонда m . В этом случае (1) мало отличается от формулы Циолковского, но вместо топлива придется нести на борту запас мишеней $\tilde{M} \gg M$. Поэтому идея [1], на самом деле, не обещает преимуществ перед ЖРД и ЯРД в отношении затрат рабочего тела. Даже с учетом того, что «зонды» будут размещены снаружи! Основная проблема имеет фундаментальный характер: большая часть кинетической энергии будет расходоваться не на производство полезного тепла, а на разрушение и нагрев двигателя. Но кроме этого нужно решать задачу начального разгона корабля с огромной массой, которая пропорциональна квадрату конечной скорости. Такова особенность любого «кинетического двигателя», поэтому, на мой взгляд, у этого принципа нет перспектив реализации в нечто практически полезное.

Ссылки:

1. В.В. Подвысоцкий. Теоретическое исследование возможности создания кинетического реактивного двигателя // <http://Infm1.sai.msu.ru/SETI/koi/media/Podvysockiy.pdf> (2013)
2. В.В. Подвысоцкий. Космические двигатели третьего тысячелетия // <http://n-t.ru/tp/ts/kd3.htm> (2003)
3. А.Е. Семенов. "Парадокс" межзвездной прямоголки или сквозь Бассард-барьер на "бильярдном звездолете" // http://go2starss.narod.ru/sem/S012_buassard.html (2005)
4. Y. A. Lei, J. Liu, Z. X. Wang, C. Chen. Fast Ignition Impact Fusion with DT methane // http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/FEC2008/if_p7-30.pdf (2008)
5. R. A. Krakowski and R. L. Miller. Systems-design and energy balance considerations for impact fusion // <https://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00258872.pdf> (1979)