

**В. В. Подвысоцкий**

## **К ВОПРОСУ О КРИТИКЕ КИНЕТИЧЕСКОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Данная статья представляет собой дополнительное исследование возможностей создания и перспектив применения кинетического реактивного двигателя (ударного), на основе анализа критических замечаний, которые содержатся в статье [2] Д. Б. Зотьева.

### **Кинетический реактивный двигатель и проблема межзвездного полета**

Прежде всего, необходимо отметить, что в статье [1] рассматривались некоторые теоретические вопросы возможности создания кинетического реактивного двигателя безотносительно к проблематике межзвездного полета. Было установлено, что эффективность этого двигателя может возрастать по мере разгона космического аппарата. В результате, при достаточно высокой скорости полета удельная тяга кинетического реактивного двигателя может превышать удельную тягу ряда других перспективных двигателей. На этом основании, был сделан вывод, что кинетический реактивный двигатель может применяться для осуществления полетов в Солнечной системе и для межзвездных полетов.

По поводу межзвездных полетов в статье [1] больше ничего сказано не было. Однако по непонятным причинам Д. Б. Зотьев акцентирует внимание именно на проблематике межзвездных полетов. При этом занимается опровержением несуществующих в статье [1] утверждений. Например, в статье [2] пишет следующее: «Автор считает, что таким способом можно достичь скоростей  $\sim 10\,000$  км/сек, необходимых для межзвездных экспедиций. Выше было показано, что это - иллюзия, безотносительно к реализации».

Возможно, автор статьи [1] действительно считает, что при помощи кинетического реактивного двигателя можно достичь скорости  $\sim 10$  тыс. км/с, но такое его мнение в статье [1] никак высказано не было, и проблема достижения скорости  $\sim 10$  тыс. км/с в указанной статье не рассматривалась.

### **Первоначальное ускорение космического аппарата**

В основе критических замечаний в статье [2] находится допущение, что разгон космического аппарата при помощи кинетического реактивного двигателя начинается со скорости 10 км/с. На этом основании сделан вывод, что начальная масса корабля может составить 400 млн. тонн (при конечной массе 100 тонн, и конечной скорости 20 тыс. км/сек).

Однако это допущение является не совсем корректным по той причине, что в Солнечной системе существуют возможности для получения больших значений стартовой скорости.

В частности, в статье [1] рассматривался вариант начала разгона космического аппарата в окрестностях планет-гигантов Солнечной системы.

Было показано, что системы планет-гигантов являются удобными стартовыми позициями для использования кинетических реактивных двигателей. В них возможна организация движения космического аппарата с очень высокой стартовой скоростью относительно группировки зондов. Например, на расстоянии 70 тыс. км от поверхности Юпитера скорость космического аппарата (относительно группировки зондов) лежит в пределах 90 – 128 км/с. Еще большая относительная встречная скорость (порядка сотен км/с) может быть получена на гелиоцентрических орбитах в окрестностях Солнца.

По неизвестным причинам Д. Б. Зотьев игнорирует эту информацию, и критикует кинетический реактивный двигатель, исходя сначала из стартовой скорости космического аппарата 10 км/с, а потом даже 1,7 км/с (на окололунной орбите). Мотивы такой критики непонятны.

В статье [1] было показано, что эффективность кинетического реактивного двигателя прямо пропорциональна скорости полета космического аппарата (в первом приближении). Поэтому, для повышения эффективности (удельной тяги) кинетического реактивного двигателя необходимо увеличивать начальную скорость космического аппарата. И такие возможности есть, в частности за счет использования гравитационных сил Солнца и планет Солнечной системы.

Кроме того, нельзя забывать и о других перспективных космических двигателях (т. к. невозможно дальше развивать космонавтику на каком-то одном типе двигателе). В каких-то условиях лучше применять один двигатель, а в других условиях лучше применять какой-то другой двигатель. При определенных условиях кинетический реактивный двигатель вполне можно использоваться самостоятельно. Но при необходимости, он может применяться и в комплексе с другими типами двигателей (например, в качестве двигателя второй ступени) и т. д.

Эффективность кинетического реактивного двигателя на второй ступени обусловлена возможностью роста его удельной тяги по мере разгона космического аппарата. В то же время, удельная тяга двигателя первой ступени (например, ядерного ракетного двигателя) остается постоянной. Поэтому, при достижении определенной скорости полета удельная тяга кинетического реактивного двигателя может превысить удельную тягу ядерного ракетного двигателя.

### **Проблема вывода массы с поверхности Земли на околоземную орбиту**

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет, что «... миллионы тонн массы нужно еще поднять с Земли, преодолевая гравитацию». На самом деле нигде в статье [1] не сказано о необходимости поднимать вещество именно с поверхности Земли. В космическом пространстве есть множество более доступных источников вещества: спутники планет, астероиды, кометы и т. д. И если учитывать будущий высокий уровень развития космонавтики (на момент

гипотетического межзвездного полета), то снабжение массой из вземных источников не вызовет серьезных затруднений.

### Формула Циолковского

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет о кинетическом реактивном двигателе: «Но если бы он был способен работать, то расход рабочего тела определялся бы следующим аналогом формулы Циолковского ...».

На самом деле здесь есть одно принципиальное отличие. Формула Циолковского получена для случая, когда скорость истечения реактивной массы – постоянная величина. Для кинетического реактивного двигателя оптимальная скорость истечения реактивной массы – переменная величина, и потому формула Циолковского здесь не совсем подходит.

### Анализ формулы Д. Б. Зотьева

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет: «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».

Вышеуказанная формула не является вполне правильной. Например, из приведенного фрагмента статьи [2] видно, что рассматривается процесс столкновения на бесконечно малом промежутке времени. Следовательно, за бесконечно малый промежуток времени, вещество (продукты взрыва) не может преодолеть расстояние между эпицентром кинетического взрыва и стенками рабочей камеры двигателя. Причем в момент взрыва рабочая камера двигателя и космический корабль физически не связаны с зондом и мишенью. Поэтому, как минимум нельзя согласиться с тем, что Д. Б. Зотьев включает в свою формулу два члена:  $K_s$  – в части кинетической энергии выбитых фрагментов двигателя, и  $E_s$  – приобретенную кинетическую энергию космического корабля.

## Давление при высокоскоростном ударе

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет: «Оценим давление, которое возникло бы при торможении цилиндра неподвижной, абсолютно твердой мишенью». На основе этой предпосылки сделан вывод, что «... среднее давление цилиндра на мишень близко к 1 ТПа». Однако далее в статье [2] написано, что «Цилиндр насквозь пройдет через мишень ...» Возникает логическое противоречие. Сначала предполагается, что мишень абсолютно твердая, но потом говорится что «Цилиндр насквозь пройдет через мишень ...» (что для абсолютно твердой мишени совершенно невозможно). Данное логическое противоречие уже вызывает некоторые сомнения в правильности получаемых в статье [2] оценок.

Кроме того, в статье [2] Д. Б. Зотьев пишет, что «... зонд представляет собой стальной цилиндр ...». Выбор стали в качестве материала зонда в очередной раз вызывает сомнения в объективности критики. Ведь сталь – это один из наиболее прочных и плотных материалов. В этой связи даже возникает закономерный вопрос: почему нужно рассматривать именно прочную сталь, а не скажем относительно мягкое железо? Вероятно потому, что если выбрать стальной цилиндр в качестве зонда, то психологически легче поверить в утверждение, что якобы «цилиндр насквозь пройдет через мишень». Однако вполне очевидно, что при необходимости можно изготовить зонд из любых других менее прочных, менее тугоплавких и менее плотных материалов.

Дополнительно следует отметить, что зонд – это не монолитный слиток, а сложное высокотехнологичное устройство. В его состав входят системы связи и управления, микрореактивный двигатель, запас топлива, система самоуничтожения с зарядом взрывчатого вещества и т. д. За счет этого плотность зонда уменьшается (и соответственно уменьшается давление при ударе). Поэтому, при моделировании удара не совсем правильно будет рассматривать зонд как монолитный стальной цилиндр.

Еще одна неточность в статье [2] заключается в том, что Д. Б. Зотьев строит рассуждения исходя из предположения, что мишень неподвижна. Однако в результате сильного удара зонда произойдет сдвиг мишени в пространстве, что тоже уменьшит силу давления на ее поверхность. И хотя смещение мишени в пространстве, зависит от соотношения массы зонда и мишени, в любом случае это обстоятельство следует учитывать.

Таким образом, для оценки давления необходимо учитывать все существенные факторы и использовать соответствующие специальные формулы, например из статьи [3]

$$P_{\text{уд}} = \frac{\rho_{\text{м}} V^2}{\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{з}}}}\right)^2}$$

где  $P_{\text{уд}}$  – давление при ударе,  $V$  – скорость соударения,  $\rho_{\text{з}}$  – плотность зонда,  $\rho_{\text{м}}$  – плотность мишени. Допустим, масса зонда и мишени одинаковы. Скорость зонда составляет 10 км/с, однако в результате неупругого удара зонд и мишень приобретут

одинаковую скорость 5 км/с. Поэтому, скорость соударения зонда и мишени для формулы  $P_{уд}$  лежит где-то в пределах  $V = 5 - 10$  км/с.

Подставим в формулу  $P_{уд}$  скорость соударения (5 – 10 км/с), плотность стального зонда (7800 кг/м<sup>3</sup>), плотность вольфрамовой<sup>1</sup> мишени (19250 кг/м<sup>3</sup>). Получаем давление  $P_{уд} = 0,073 - 0,291$  ТПа. Таким образом, фактическое давление при ударе будет значительно (как минимум в несколько раз) меньше, чем указано в статье [2].

Это обстоятельство имеет принципиальное значение, поскольку оценка давления в 1 ТПа (или 10 млн. бар) используется для дальнейших манипуляций с цифрами в статье [2].

### **Возможность разрушения рабочей камеры продуктами кинетического взрыва**

В статье [2] утверждается, что зонды будут разрушать рабочую камеру кинетического реактивного двигателя. Причем возможность разрушения кинетического реактивного двигателя зондами фактически поднимается на уровень фундаментальной проблемы.

Безусловно, возникновение осколков в кинетическом взрыве возможно, и понимание этого есть. В частности, в статье [1] было сказано, что «нужно организовать столкновение зонда и мишени таким образом, чтобы исключить образование крупных осколков». Более подробно этот вопрос не рассматривался, т. к. его обсуждение выходило далеко за пределы объема статьи [1].

Необходимо отметить, что преобразование вещества зонда и мишени в газ зависит от многих факторов. Это скорость столкновения, химический состав зонда и мишени, конструкция зонда и мишени и т. д. Нереально проанализировать в одной статье все возможные варианты организации столкновения зонда и мишени (и все вопросы оптимизации кинетического взрыва). С уверенностью можно сказать, что защита рабочей камеры от разрушения является легко решаемой технической задачей. В этой связи можно привести следующий простой пример.

В статье [1] было сказано, что и зонд и мишень могут изготавливаться из всевозможных химических соединений. Было также сказано, что зонд необходимо оснастить системой самоликвидации (т. е. снабдить зарядом взрывчатого вещества). В порядке развития этой идеи можно рассмотреть вариант, когда и зонд и мишень почти полностью состоят из бризантных взрывчатых веществ. Т. е. форма зонда или мишени никакого значения не имеет (будь это цилиндр, плоская пленка и т. д.).

В химических взрывчатых веществах распад инициируется ударной волной. В бризантных взрывчатых веществах скорость ударной волны достигает нескольких км/с. Допустим, масса зонда 1 кг, плотность 2000 кг/м<sup>3</sup>, диаметр 0,1 м. При скорости взрывной волны 5 км/с, она пройдет через весь зонд за время не более 20 мкс. Если скорость зонда 100 км/с, то за этот же промежуток времени 20 мкс, зонд (точнее уже его твердые осколки) пройдут расстояние не более 2 м. И полностью распадутся, превратившись в

---

<sup>1</sup> В качестве возможного материала мишени Д.Б. Зотьев упоминает вольфрам.

горячий газ. Поэтому, скорее всего в заднюю стенку рабочей камеры двигателя попадет уже относительно безвредный сгусток газа.

Наша задача заключается в том, чтобы исключить и или минимизировать угрозу разрушения рабочей камеры кинетического реактивного двигателя твердыми осколками. Из вышеуказанного примера видно, что эта задача вполне решаемая. Не вызывает сомнений, что есть и другие способы решения проблемы твердых осколков. Например, возможно использование в составе зонда и мишени жидких или даже газообразных веществ (т. е. в принципе зонд и мишень могут быть выполнены в виде тонких оболочек, наполненной жидкостью или газом). Очевидно, что и в этом случае возникновение большого количества твердых крупных осколков маловероятно.

Таким образом, предотвращение разрушения рабочей камеры двигателя продуктами кинетического взрыва является вполне решаемой технической задачей, а не фундаментальной проблемой на пути создания кинетического реактивного двигателя.

### **Влияние давления на температуру вещества**

В статье [2] Д. Б. Зотьев утверждает, что «... при давлении в миллионы бар, которое развивается от удара на скорости  $\sim 10$  км/сек, без дополнительного подогрева твердое вещество ведет себя, как конденсированная материя ... При этом термическая энергия не является существенной, что характерно для конденсированной материи». Но это утверждение не совсем верно.

По современным физическим представлениям, при высокоскоростном столкновении в веществе возникают ударные волны. Ударная волна – это движущаяся в веществе поверхность разрыва. При ее прохождении через вещество скорость, давление, плотность и температура этого вещества скачкообразно возрастают. Поэтому, утверждение, что якобы при столкновении термическая энергия вещества не будет существенной, не вполне соответствует действительности.

На самом деле, термическая энергия существенна, и при высокой скорости столкновения ее хватает для полного испарения вещества во фронте ударной волны. В статье [2] давление при скорости столкновения 10 км/с оценивается примерно в 1 ТПа. Но уже при меньшем давлении в 0,1 ТПа начинает происходить испарение, например, такого металла, как свинец. Как пишет об этом статья [4]: «Согласно экспериментальным данным, оценочное давление в ударной волне, при котором свинец начинает испаряться, составляет 0,1 ТПа».

Кроме того, в статье [4] есть данные, что «... для полного испарения при разгрузке вещества в ударной волне, удельная энергия  $V^2/2$  примерно в 10 раз должна превосходить удельную теплоту испарения ...». На основе этого соотношения можно подсчитать примерную скорость столкновения, необходимую для полного испарения разных веществ.

Таблица 1. Примерная скорость высокоскоростного столкновения, необходимая для полного испарения некоторых веществ

Вещество	Удельная теплота испарения [5], кДж/кг	Необходимая для испарения удельная кинетическая энергия, кДж/кг	Необходимая для испарения скорость соударения, км/с
Никель	6480	64800	11,4
Медь	4790	47900	9,8
Алюминий	10900	109000	14,8
Олово	2450	24500	7,0
Ртуть	285	2850	2,4
Сера	290	2900	2,4
Железо	6340	63400	11,3
Цинк	1755	17550	5,9
Вода	2256	22560	6,7
Жидкий азот	198	1980	2,0
Жидкий кислород	213	2130	2,1

Из таблицы 1 видно, что при скорости 10 км/с медь и железо (сталь) не подходят для изготовления зонда и мишени. Следовательно, критика кинетического реактивного двигателя в статье [2] основана на подборе неоптимальных тугоплавких материалов (медь, сталь, вольфрам), и заведомо неоптимального режима работы (скорость 10 км/с). Из таблицы 1 видно, что при скорости 10 км/с необходимо изготавливать зонды и мишени из материалов с низкой теплотой парообразования (жидкий кислород, жидкий азот, вода, цинк, сера, ртуть, олово и т. д.). При большей скорости полета (15 – 20 км/с и выше) можно будет использовать материалы с более высокой теплотой парообразования (никель, медь, алюминий, железо и т. д.).

Таким образом, при высокоскоростном столкновении есть все возможности для преобразования вещества зонда и мишени в газ (с переходом энергии кинетического взрыва в энергию этого газа). Вполне можно так организовать столкновение зонда и мишени (подобрать соответствующий химический состав, придать им оптимальную форму и т. д.), что даже твердое вещество полностью превратится в раскаленный газ. Но в случае необходимости дополнительно можно использовать в составе зонда и мишени взрывчатые вещества, жидкость, сжатый газ или др.

Поскольку в результате кинетического взрыва образуется газ, угрозы разрушения рабочей камеры кинетического двигателя нет. Что касается взаимодействия продуктов кинетического взрыва (в виде раскаленного газа) со стенками рабочей камеры, то такое взаимодействие зависит от многих факторов. Это размеры рабочей камеры, материалы из которых она изготовлена, свойства внутреннего покрытия рабочей камеры, масса продуктов взрыва, химический состав продуктов взрыва, энергия кинетического взрыва, частота взрывов, использование разных методов защиты поверхности (например, при помощи электромагнитных полей или др.), полная замена твердых поверхностей кинетического двигателя электромагнитными полями и т. д.

Поэтому нельзя согласиться с тем, что преобладающая часть энергии кинетического взрыва уйдет на разрушение и нагревание двигателя. Рабочая камера, безусловно, будет нагреваться, но чтобы определить степень этого нагрева (причем в оптимальном режиме работы кинетического двигателя) нужны серьезные теоретические и экспериментальные исследования.

Кроме того, даже та часть тепловой энергии, которая будет потрачена на нагрев рабочей камеры, вполне может быть с пользой утилизирована. Наиболее очевидный и простой способ утилизации – это подача в рабочую камеру через специальные форсунки легких газов (например, водорода). В результате контакта с нагретыми стенками рабочей камеры произойдет разогрев легких газов, с последующим их истечением через реактивное сопло (и созданием реактивной тяги). Причем эта подача может осуществляться в промежутках между кинетическими взрывами, и при закрытом входном отверстии (затворе). Либо каналы для пропуска легких газов (с последующим истечением их через отдельные реактивные сопла) могут быть проложены в стенках рабочей камеры. Следующий способ заключается в том, чтобы при помощи тепловых машин и электрогенераторов преобразовывать тепло в электрический ток, который будет приводить в действие электрореактивные движители. В общем, вариантов очень много, интересных и разных.

### **Что такое «конденсированная материя»?**

В статье [2] часто использует понятие «конденсированная материя». Например, Д. Б. Зотьев пишет: «... 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! ... 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».

Непонятно, как именно твердое тело превращается в «конденсированную материю». Если вещество переходит из одного состояния в другое, то этот процесс является фазовым переходом. Следовательно, должен быть фазовый переход из состояния «твердое тело» в состояние «конденсированная материя». Сам физический термин конденсация, означает переход вещества из газообразного состояния в жидкое или твёрдое состояние. Поэтому, даже по самому определению твердое тело находится вполне в конденсированном состоянии. Что же тогда может означать переход твердого тела в «конденсированную материю»? Твердое тело становится еще более твердым? Или может жидким? Что подразумевается под «конденсированной материей» совершенно непонятно.

На самом деле, при высокой скорости столкновения в веществе проходят ударные волны, и фазовый переход действительно может иметь место: но это переход твердого вещества зонда и мишени либо в состояние сверхплотного газа (при низкой степени ионизации), либо в состояние сверхплотной плазмы (при наличии высокой степени ионизации).

Кроме того, не совсем ясно как, почему и куда с точки зрения Д. Б. Зотьева «давление исчезает»? Если нет давления, то, как внутренняя энергия вещества может перейти в кинетическую энергию разлета вещества? Если давление вдруг по неизвестным причинам



исчезло, то сгусток такой «конденсированной материи», о которой пишет Д. Б. Зотьев так и останется сгустком «конденсированной материи».

### Температура и энергия продуктов кинетического взрыва

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет: «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».

Таким образом, в статье [2] утверждается, что первоначально вещество находится в тонком слое в виде «конденсированной материи». Потом упоминается о том, при давлении 12,5 Гбар дейтерий имеет плотность в 1000 раз выше нормы и находится в полностью ионизированном состоянии. В этой связи, возникает закономерный вопрос. Чем все же является эта «конденсированная материя», у которой все атомы полностью ионизированы? Не плазма ли это на самом деле?

Непонятен также способ получения оценки температуры не выше ~1 млн. К. Эти данные в статье [2] не подкреплены никакими, даже самыми элементарными расчетами. Ссылки на температуру Ферми не выдерживают никакой критики. Ведь понятие «температура Ферми» не имеет никакого отношения к текущей температуре вещества. По своему физическому смыслу это есть энергетическая ширина заполненной части зоны проводимости рассматриваемой системы при абсолютном нуле градусов (энергия Ферми), деленная на постоянную Больцмана. С текущей температурой общая здесь только размерность величины и само слово "температура". Температура Ферми является также температурой вырождения в том смысле, что ниже такой температуры ферми-газ начинает проявлять квантовые свойства, а выше ведет себя как невырожденный классический газ, что не имеет никакого отношения к рассматриваемой задаче. Поэтому, понятие «температура Ферми» говорит о фактической температуре вещества, примерно как понятие «температура замерзания воды» о средней температуре Мирового океана.

Далее в статье [2] Д. Б. Зотьев пишет: «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<sup>2</sup>. Однако такую же энергию масса в 1 кг имеет на скорости 106 км/с, о чем упоминается в том же абзаце статьи [2]. Поэтому

---

<sup>2</sup> При скорости ~100 км/с кинетическая энергия медного зонда в расчете на единицу массы ~ 5 ГДж/кг. По данным статьи [2], при ударе на скорости ~100 км/с внутренняя энергия меди в расчете на единицу массы 5,6 ГДж/кг (или ~ 112% от первоначальной кинетической энергии 1 кг зонда). По закону сохранения энергии этого быть не должно, но никаких объяснений по этому поводу в статье [2] не содержится.

совершенно непонятно, почему термическая энергия при ударе зонда на скорости ~100 км/с, приравнивается к кинетической энергии зонда на скорости 106 км/с. Какой тогда смысл поиска в статье [2] энергии через давление, если ее можно элементарно определить из первоначальной кинетической энергии зонда с применением законов сохранения.

### **Магнитная заслонка**

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет: «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». Ранее в статье [2] утверждалось, что при скорости ~100 км/с температура может составлять ~1 млн. К (а на самом деле значительно больше). Этой температуры даже ~1 млн. К вполне достаточно для ионизации всех известных веществ, и поэтому расчет на магнитную заслонку является вполне обоснованным.

### **Ядерные реакции**

В статье [2] Д. Б. Зотьев пишет, что «Реакции синтеза будут наблюдаться, однако общий выход остается под большим вопросом». Видно, что Д. Б. Зотьев соглашается с тем, что в процессе работы кинетического реактивного двигателя могут происходить реакции синтеза. Однако к этому нужно добавить, что общий выход ядерной энергии принципиального значения не имеет.

Выход ядерной энергии очень важен для промышленных энергетических установок. Для получения положительного выхода электрического тока, ядерная энергия должна существенно превышать затраты на организацию этих реакций. Этим обстоятельством и вызваны сложности в реализации существующих проектов термоядерных реакторов.

В случае кинетического реактивного двигателя нет никаких минимальных требований к выходу ядерной энергии (поскольку ядерные реакции являются лишь дополнительным «бонусом»). Кинетический двигатель может работать даже при полном отсутствии ядерных реакций. Поэтому, любой даже самый минимальный выход ядерной энергии лишь повышает его эффективность.

### **Заключение**

Анализ критических замечаний в статье [2] Д. Б. Зотьева не дает оснований для возникновения серьезных сомнений в возможности технической реализации принципа ускорения космического аппарата за счет его кинетической энергии. Способ разгона космического аппарата при помощи кинетического реактивного двигателя (ударного) является вполне перспективным новым направлением в процессе развития космических двигательных систем. Кроме того, существует большое количество других перспективных типов кинетических двигателей и различных схем их применения, для эффективной реализации принципа разгона космического аппарата за счет его кинетической энергии.

## Литература

1. В. В. Подвысоцкий. Теоретическое исследование возможности создания кинетического реактивного двигателя  
<http://Infml.sai.msu.ru/SETI/koi/media/Podvysockiy.pdf>
2. Д. Б. Зотьев. Анализ осуществимости кинетического реактивного двигателя  
<http://Infml.sai.msu.ru/SETI/koi/articles/index.html>
3. М. М. Русаков. Эквивалентность высокоскоростного удара сгустком частиц вольфрама по преградам и столкновения с реальными космическими частицами  
<http://www.vniitf.ru/rig/konfer/8zst/s1/1-30.pdf>
4. М. К. Жекамухов, Л. З. Шухова. О диспергировании тел при высокоскоростных ударах <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/099.pdf>
5. Инженерный справочник DPVA.info.  
<http://www.dpva.info/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/SpecificHeatOfEvaporation/LatentHeatOfVaporization/>