

ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 629.78.036

78. АНТИПРОТОН КАК КАТАЛИЗАТОР ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ДУ С ИНЕРЦИОННЫМ УДЕРЖАНИЕМ

An antiproton catalyst for inertial confinement fusion propulsion. Lewis R.A., Newton R., Smith G.A., Toothacker W.S. "AIAA Pap.", 1990. № 2760,5 pp.

Состояние развития ядерных энергетических систем позволяет считать вероятным создание жизнеспособных ДУ для исследования дальнего космоса в 21 веке. Теоретические плотности энергии ядерных и химических ДУ представлены в табл. 1.

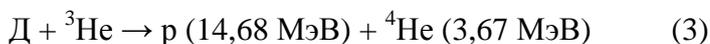
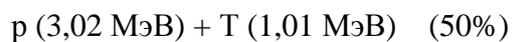
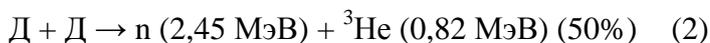
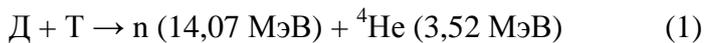
Таблица 1.

Система	Дж/кг	$\Delta E/mc^2$
Химическая		
H ₂ -O ₂	$1,3 * 10^7$	$1,4 * 10^{-10}$
Неустойчивый гелий	$4,8 * 10^8$	$5,4 * 10^{-9}$
Деление U-235	$8,2 * 10^{13}$	$9,1 * 10^{-4}$
Синтез		
ДД	$7,9 * 10^{13}$	$8,8 * 10^{-4}$
ДТ	$3,4 * 10^{14}$	$3,8 * 10^{-3}$
Аннигиляция антиматерии		
$p^- + p$	$9,0 * 10^{16}$	1,0

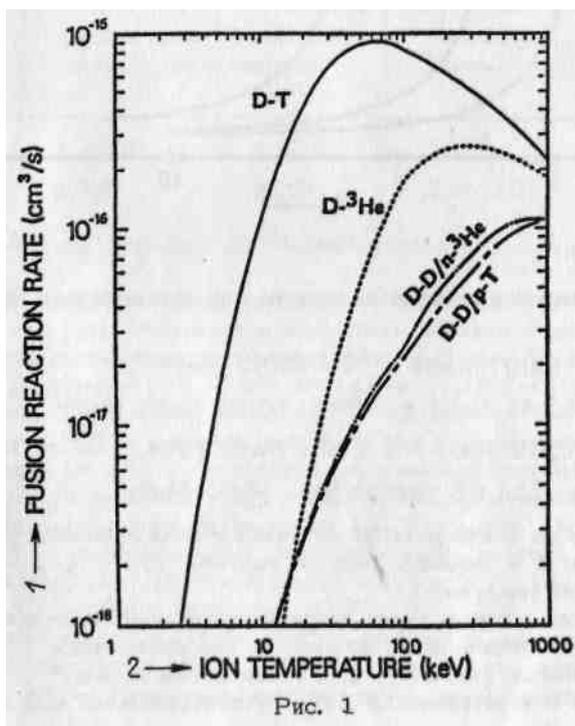
Процессы синтеза и аннигиляции антиматерии имеют громадные плотности энергии. Однако последние исследования показывают, что эффективность использования значительной энергии, уносимой релятивистскими продуктами аннигиляции антиматерии, очень мала [1]. За более чем 30 лет исследований термоядерного синтеза еще не создано работающей системы. Следовательно, трудно серьезно рассматривать эти два процесса для космических ДУ с большими тягой и удельным импульсом. Здесь же ставится цель показать, что соединение двух процессов в одну систему, используя синтез, соединенный

с делением, катализированным антиматерией, позволяет рассмотреть возможность такой системы для ДУ, предназначенной для межпланетных полетов.

Наиболее важными реакциями синтеза для космического применения являются



Зависимости скорости реакций от температуры показаны на рис. 1, где обозначено: 1 - скорость реакции синтеза, $[\text{см}^3/\text{с}]$, 2 - ионизационная температура, $[\text{кэВ}]$.



Преимущества использования ядерной и особенно термоядерной ДУ для исследования Марса видно из рис. 2, где обозначено: 1 - требуемая удельная масса, $[\text{кг}/\text{кВт}]$; 2 - общее время полета, $[\text{сут}]$; 3 - ядерная ракета с электрической ДУ; 4 - относительная полезная нагрузка (10^{-2} = две ступени, 10^{-1} = одна ступень); 5 - термоядерная ракета.

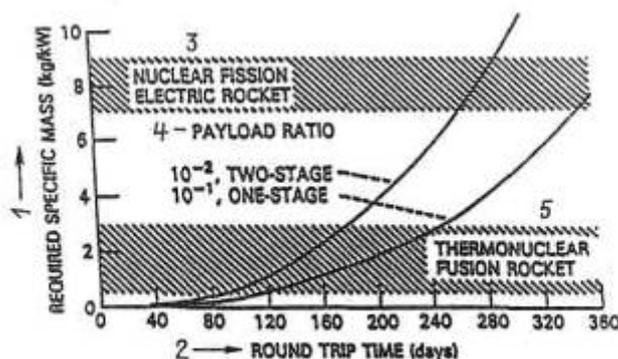


Рис. 2

Термоядерная ДУ позволит осуществить полет на Марс за время порядка 80 сут [2]. Результаты подробного анализа полета человека на Марс с использованием термоядерной энергии для ДУ с удельной мощностью 10 кВт/кг (3), 1 кВт/кг (4) и 0,067 кВт/кг (5) приведены на рис. 3 и в табл. 2. На рис. 3 обозначено: 1 - начальная масса аппарата, [т]; 2 - время полета, [годы] (отправляемая полезная нагрузка = 133 т; возвращаемая полезная нагрузка = 6 т).

В зависимости от достигнутой удельной массы, требуемые мощность и удельный импульс будут около 1,0 ГВт и 10^5 Н*с/кг [3].

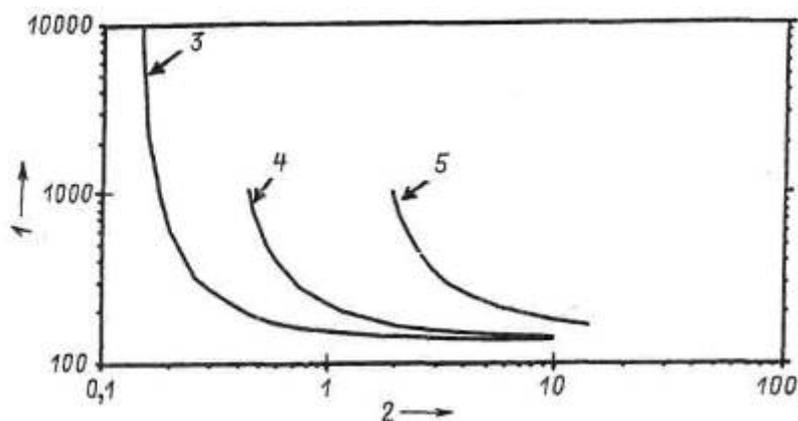


Рис. 3

Таблица 2

Параметры	Удельная мощность ДУ a_p , кВт/кг	
	1,0	10
Время полета, годы	0,44-0,5	0,18-0,5
Начальная масса на низкой земной орбите M_0 , т	613-1041	185-1034
Масса топлива и разбавителя, M_p , т	335-681	30-676
Доля полезной нагрузки, γ , %	22-12,8	72-12,9

Мощность ДУ P_j , МВт	145-227	227-2255
Средний удельный импульс, I_{sp} , Н*с/кг	9200-104000	185400-351000
Приращение скорости ΔV , км/с	90-98	90-196

КА VISTA с применением термоядерного синтеза с инерционным удержанием имеет удельную массу 0,05 кг/кВ удельный импульс 166770 Н*с/кг и мощность 20 ГВт [4].

В настоящее время получена реакция деления в мишени U-238, вызванная антипротоном [5-7]. Обычно 10 нейтронов производятся одним антипротоном. Как будет показано ниже, такая реакция идеально подходит для катализирования в микромишени реакции термоядерного синтеза с инерционным удержанием, используя антипротон, который может сохраняться в ловушке. В последнее время получена возможность сохранения антипротонов в ловушках длительное время. Используя гармонические свойства ловушки получена возможность фиксации массы антипротонов относительно массы нейтронов как 1 на $100 \cdot 10^6$ [8, 9]. Также важно, что можно сохранять годами в ловушке до 10^{10} антипротонов. С ожидаемым повышением эффективности замедления антипротонов до энергии ловушки и улучшением самой ловушки такие параметры могут быть достигнуты через несколько лет. Следовательно, можно предположить, что в ближайшем будущем можно будет иметь в космосе 100 ловушек с общим числом антипротонов 10^{12} . Для импульсной термоядерной системы с частотой 0,1 Гц и 10^7 антипротонов за импульс этого достаточно для катализации термоядерного реактора, необходимого для осуществления полета на Марс.

Все системы с инерционным удержанием требуют сжатия для нагрева мишени до температуры, представленной на рис. 1.

Рассматриваются системы с 3 МэВ протонами и 32 МэВ ионами лития, которые разрабатываются в Sandia National Laboratory [10-23].

Поглощение энергии возбуждения предполагается золотом. Параметры луча приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Тип луча	Поперечный размер, мкм	Диапазон энергии, МэВ	Интенсивность	Длительность генерации, нс
3 МэВ	$\pm 2\ 800$	$\pm 20,23$	10^{18}	40
32 МэВ	± 500	$\pm 2,5$	$2,9 \cdot 10^{17}$	10

Лучшие характеристики получены для 32 МэВ системы на литии, энергия и плотность энергии которой позволяет поджечь микромишень.

Назначением систем с инерционным удержанием является инициирование самоподдерживающейся ядерной реакции в малом количестве топлива. Топливо сжимается и инерционные силы поддерживают высокую плотность во время течения реакции. Необходимо организовать такую скорость реакции, чтобы практически все топливо участвовало в реакции до его абляции.

Для реакции ядерного деления и синтеза скорость в определенный момент зависит от предшествующей реакции. Так скорость ядерного деления зависит от числа нейтронов, выделившихся в предыдущей реакции. Для исключения начальной стадии цепной реакции предполагается использовать антипротон, который инициирует ядерную реакцию.

Мишень для реакции ядерного синтеза с инерционным удержанием показана на рис. 4, где обозначено: 1 - ДТ, Р активная зона, 2 - экран из золота, 3 - эжектор из золота, 4 - перед сжатием, 5 - пучок ионов лития Li^+ , 6 - максимальное сжатие; 7 - пучок антипротонов p^- .

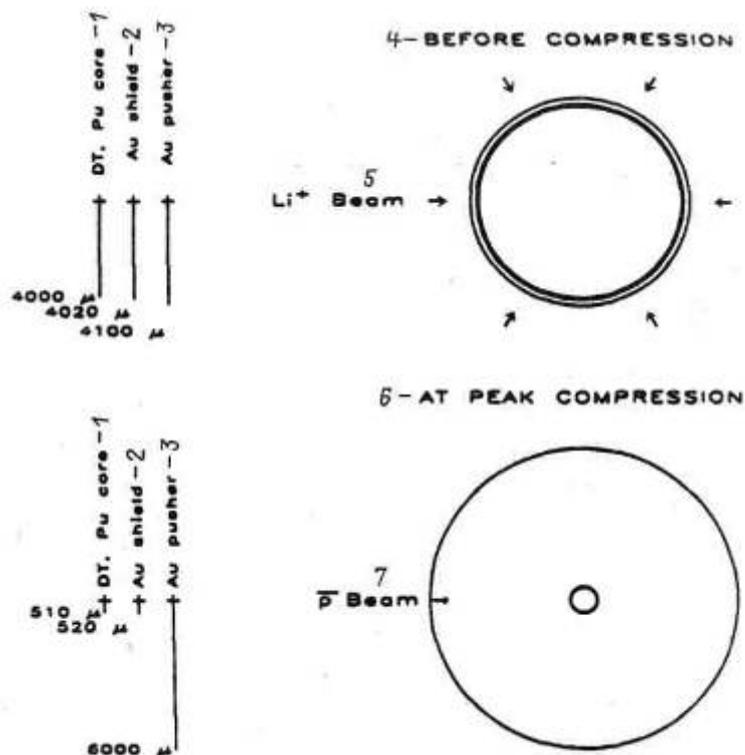


Рис. 4

Активная зона радиусом 4000 мкм из 77 мг ДТ и 680 мг плутония окружена 80 мкм золотым эжектором. Материал эжектора нагревается 32 МэВ литиевым пучком. При моделировании активная зона сжимается адиабатически давлением, возникающем в эжекторе. 20 мкм экран из золота внутри нагреваемой зоны служит радиационным барьером для предотвращения тормозного излучения. Повышение давления до $11 \cdot 10^{14}$ Па, создаваемое литиевым пучком, приводит к плотности мишени 1000 г/см^3 и радиусу 510 мкм. Время абляции или удержания 12 нс.

После сжатия активной зоны 10^7 антипротонов используются для индуцирования равного числа делений и 10^8 нейтронов в плутонии. Так как активная зона находится в надкритическом состоянии, то деление быстро увеличивается. Энергия, выделяемая при сгорании мишени, показана на рис. 5, где обозначено: 1 - энергия, [Дж]; 2 - время, [пс]; квадрат - деление; треугольник - синтез.

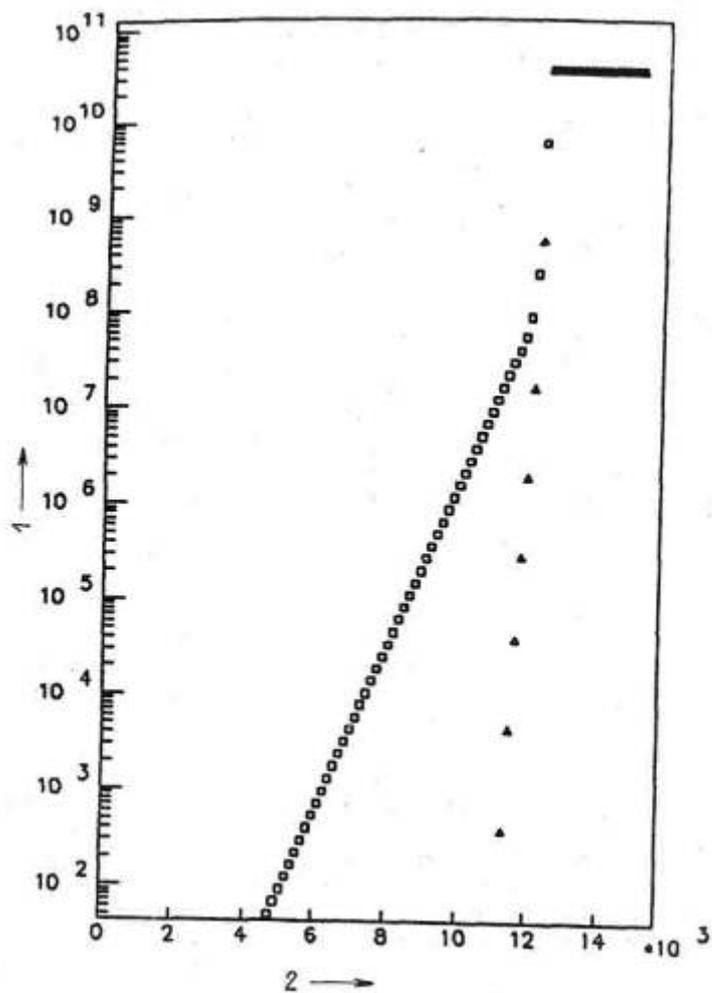


Рис. 5

Выделяемая энергия цепной реакции деления доминирует до 11,9 нс. К этому времени температура в активной зоне достигает 2 кэВ и скорость реакции синтеза становится сравнимой со скоростью деления. Энергия ядерного синтеза добавляется к энергии деления. Кроме того, 14 МэВ нейтроны от реакции синтеза инициируют добавочное деление. 99,7% ДТ и плутония потребляется в последние 100 пс.

Условия 100% сгорания мишени с инерционным удержанием будут следующими.

Масса плутония 680 мг .

Число атомов плутония $1,7 \cdot 10^{21}$.

Масса ДТ 77 мг.

Число ДТ пар $7,2 \cdot 10^{21}$.

Начальный радиус 4000 мкм.

Начальная плотность $1,91 \text{ г/см}^3$.

Конечная плотность 1000 г/см^3 .

Давление $11 \cdot 10^{14} \text{ Па}$.

Конечный радиус 510 мкм.

Скорость звука $4,1 \cdot 10^6$.

Время удержания 12 нс.

Работа сжатия 1,1 МДж.

Выделение энергии деления $3,8 \cdot 10^{10}$ Дж, синтеза $3,8 \cdot 10^{10}$ Дж.

Увеличение энергии 70000. 24

Описанная мишень для термоядерного синтеза может полностью сгореть при работе сжатия 1,1 МДж, создаваемой пучком 32 МэВ ионов лития. Процесс протекает в пределах времени удержания из-за подачи 10^7 антипротонов. Такое применение антипротонов в качестве катализатора позволяет сжечь мишень до ее абляции. Технологии для создания сжатия внутри мишени при помощи лазера, для улавливания и сохранения антипротонов являются перспективными и могут быть доступными для космического применения в будущем.

Увеличение энергии мишени в 70000 раз дает выход энергии 76 ГДж. Работая с частотой 0,1 Гц, система будет давать мощность 7,6 ГВт, что удовлетворяет требованиям для межпланетных полетов.

А.А. Зинчук

Литература

1. Callas, J.L., "The Application of Monte Carlo Modeling to Matter-Antimatter Annihilation Propulsion Concepts," Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, JPL D-6830, October 1, 1989.
2. Roth, J.R., Fusion Technology, 15, 1375 (1989).
3. Schulze, N.R., Miley, G.H., and Santarius, J.F., "Space Fusion Energy Conversion Using a Field Reversed Configuration Reactor: A New Technical Approach for Space Propulsion and Power," paper presented at the Space Transportation Propulsion Technology Symposium, Penn State University, June 25-29, 1990.
4. Orth, C.D. et al, "The Vista Spacecraft - Advantages of ICF for Interplanetary Fusion Propulsion Applications," paper presented at the IEEE 12th Symposium on Fusion Engineering, Monterey, Ca, Oct. 12-16, 1987.
5. Armstrong, T.A. et al, Phys. Lett. 205, 590 (1988).
6. Armstrong, T.A. et al, Z. Phys. A, III, 519 (1988).
7. Bocquet, J.P. et al, Physics at LEAR With Low Energy Antiprotons Proceedings of the Fourth LEAR Workshop, Viliars-sur-01Ion, Switzerland, Harwood Academic Pub, Switzerland, 1988, p. 793.
8. Gabrielse, G. et al, Phys. Rev. Lett. 63, 1360 (1989).
9. Gabrielse, G. et al, "A 1000-Fold Improvement in the Measured Antiproton Mass," submitted to Phys. Rev. Lett., 1990.
10. VanDevender, J.P. et al, Laser and Particle Beams 3, 93 (1985).
11. Dreike, P.L. and Miller, P.A. , J. Appl. Phys. 57 (5). 1589 (1985).
12. Miller, P.A., J. Appl. Phys. 57 (5), 1473 (1985).
13. Slutz, S.A. , Seidel, D.B., and Coats, R.S., J. Appl. Phys. 59 (1), 11 (1986).
14. Slutz, S.A. and Seidel, D.B. , J. Appl. Phys. 59 (8), 2685 (1986).
15. Vandevender, J.P. et al, Laser and Particle Beams 5 (3), 439 (1987).

16. Vandevender, J.P. and Wright, T.P., Proceedings of the 1987 IEEE Particle Accelerator Conference. IEEE, New York, 1987, Vol. 3, p. 1975.
17. Leeper, R.J. et al, Rev. Sci. Instrum. 59 (8), 1800 (1988).
18. Stygar, W.A. et al, Rev. Sci. Instrum. 59 (8), 1703 (1988).
19. Maenchen, J. et al, Rev. Sci. Instrum. 59 (8), 1703 (1988).
20. Mehlhorn, T.A. et al, Rev. Sci. Instrum. 59 (8), 1709 (1988).
21. Kahalas, S.L., Nucl. Instrum. & Methods A278, 31 (1989).
22. Leeper, R.J. et al, Nucl. Instrum. & Methods B40/41. 973 (1989).
23. Ziegler, J.F., Biersack, J.P., and Littmark, U., The Stopping and Range of Ions in Solids. Pergamon Press, New York, 1986.