

## UTILIZATION OF O'NEILL'S MODEL I LAGRANGE POINT COLONY AS AN INTERSTELLAR ARK

GREGORY L. MATLOFF

*Division of Applied Sciences, New York University, 26-36 Stuyvesant Street, New York, N.Y. 10003, U.S.A., and Dept. of Physical Science, Bergen Community College, Paramus, New Jersey 07652, U.S.A.*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛОНИИ О'НЕЛЛИ В КАЧЕСТВЕ МЕЖЗВЕЗДНОГО КОВЧЕГА

МАТЛОФФ ГРЕГОРИ Л.

(«Журнал Британского Межпланетного Общества» том 29, стр. 775-785, 1976 г.)

Пер. с англ. Моисеев И.М.

#### АННОТАЦИЯ

Обсуждается возможность объединения техники межзвездного зонда, созданного на уровне проекта "Дедал", и Модели I колонии в лангранжевой точке, созданной по проекту О'Нелли для создания Межзвездного Ковчега. Рассматриваются концепции электростатического ионного сборника для торможения ракетно-ускоряемого аппарата. Обсуждаются более перспективные Усиленные Прямоточные Межзвездные Ракеты (УПМР) и прямоточный двигатель для корабля, оборудованного электростатическим ионным сборником. Рассматриваемая двигательная техника способна доставить корабль к ближайшим звездам за время от нескольких столетий до 1000 лет. Корабль может служить для полетов этой и большей длительности.

#### Содержание

1. Межзвездный полет с экипажем .....	2
2. Электростатический ионный сборник для межзвездного корабля .....	4
2.1. Торможение .....	5
2.2. УПМР - ускорение .....	8
2.3. Концепции прямоточного двигателя .....	10
3. Выводы .....	12
Литература .....	12

## 1. Межзвездный полет с экипажем

Всесторонний план колонизации околоземного и окололунного пространства был недавно опубликован О'Нелли [1] и далее описан Паркером [2]. Колонии О'Нелли, которые могут располагаться в 4-й и 5-й точках Лагранжа системы Земля-Луна, строятся из материалов, полученных, главным образом, с Луны и, позднее, из пояса астероидов.

Постройка первой колонии - колонии Модель I может стоить столько же, сколько и проект "Аполлон". При этой стоимости мы можем создать Лунную горнодобывающую колонию на 200 чел., Лунный линейный ускоритель для транспортировки материалов в точки Лагранжа и космическую колонию - Модель I.

Модель I - колония с полным самообеспечением содержит около 2 тысяч домов в 2-х цилиндрах, около километра длиной и 100 м в радиусе и имеет массу около 500 тыс. тонн. Из этой массы только 2% доставляется с Земли при помощи системы "Спейс-Шатл" (космический самолет - космический буксир) или аналогичной системой следующего поколения.

После ее постройки, колония Модель I может участвовать в создании больших колоний - Модель II и Модель III для 100 тыс. и 2 млн. чел, соответственно. После создания колонии Модель II, программа дальнейшего строительства колоний должна стать независимой от Земли.

Большие колонии могут участвовать в различных проектах улучшения жизни на Земле, таких как лучевая передача солнечной энергии [3], контроль погоды и изменение климата [4], космическое производство. Колония Модель I может использоваться как полностью замкнутая космическая биосфера типа обсуждаемой Циолковским и Берналом [5,6].

Так как О'Нелли предполагает, что количество материала, доставляемого с Земли для создания Лунной колонии, составит 3 тыс. тонн, 6 тыс. тонн может быть доставлено к колонии Модель I для создания самостоятельных колоний на Марсе и марсианских спутниках. После того, как колония Модель I получит достаточный опыт в колонизации Марса, марсианских спутников или астероидов [7], члены этого космического общества смогут обсуждать возможность расширения человеческой цивилизации к ближайшим звездам. Если колония Модель I будет создана в середине 21 века, мы можем ожидать начала первой пилотируемой межзвездной экспедиции в конце 21 - начале 22 века.

Хотя не модифицированная колония Модель I может действовать только во внутренних областях Солнечной системы, дальнейшие модификации могут обеспечить работоспособность замкнутой биосферы во время межзвездной ночи. Как было замечено Паркером [2] еще более важным изменением может быть добавление двигательного модуля и, конечно, топливного бака. На рис.1 показан пример такой конструкции; топливный бак и двигательная установка (ДУ) показаны не в масштабе. Следует заметить, что хотя зеркала и солнечные энергоустановки включены в межзвездный вариант конструкции, они используются только в окрестностях звезды-цели. В межзвездном пространстве они не работают.

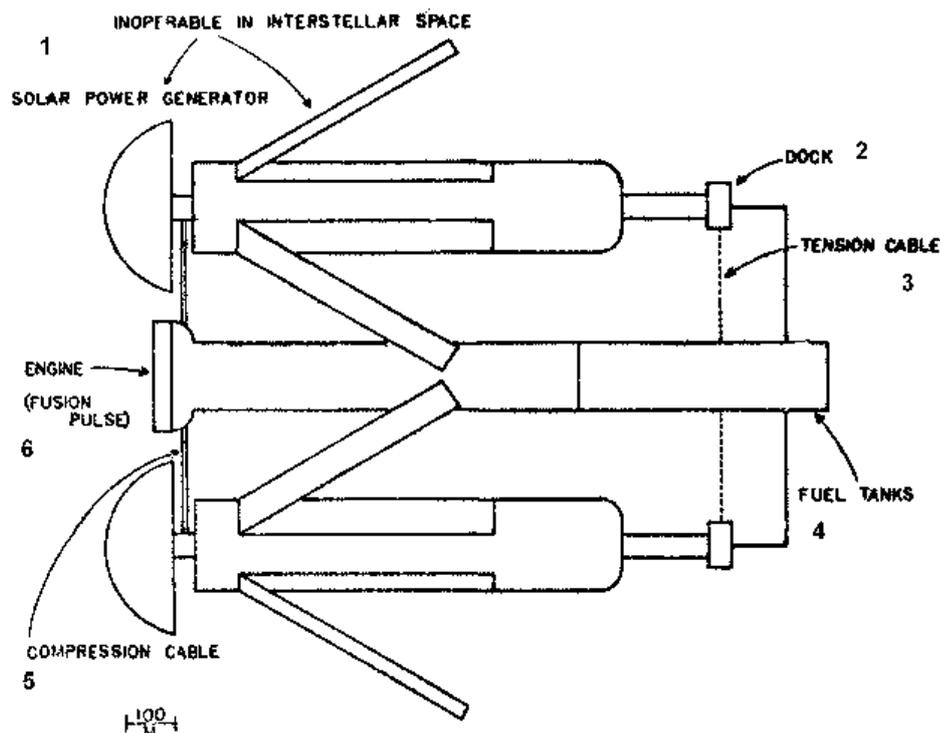


Рис. 1. Колония О'Нелли Модель I модифицированная в межзвездный корабль. Скорость полета 0,01 - 0,02 с; ускорение 0,004 g при использовании двигателя типа "Дедал".

Торможение с использованием электростатического паруса.

1- Солнечный энергогенератор - не задействуется в межзвездном пространстве. 2 -Стыковочное устройство, 3 - Натянутый трос. 4 - Топливные баки. 5 - Сжатая опора. 6 - Двигатель (термоядерный импульсный).

Позвольте нам предположить, что термоядерный двигатель, предложенный для проекта "Дедал" [8,9], останется окончательным словом двигательной техники еще век или два термоядерных исследований. Этот двигатель, в котором сгорает  $D-^3He$ , имеет скорость истечения 0,03 с - удельный импульс около 1 млн. сек. Масса этого двигателя около 500 т. D-T двигатель с похожими характеристиками обсуждался Геппенгеймером [10], а литий-водородный реактор был предложен Бондом [11], но их параметры еще не достаточно известны.

Кроме того, мы предположим, что предлагаемый межзвездный корабль несет столько же топлива для ускорения, сколько и зонд, рассматриваемый в проекте "Дедал" - 150 тыс. тонн, и что для торможения используется электростатический парус [12,13]. Ускорение до 0,002 с и торможение с этой скорости до нуля может осуществляться за счет гравитационного воздействия гигантских планет [14]. Используя уравнение движения ракеты и параметры, обсуждаемые выше, мы получим крейсерскую скорость 0,01 с. Таким образом, за время полета 400, 600, 1100 лет можно достичь звезд Альфа Центавра, Барнарда и Тау Кита соответственно. Мы можем снизить время полета за счет увеличения массы топлива.

Интересен вопрос - может ли экология колонии оказаться разрушенной в следствие утечек в течение длительного времени полета. Много меньше разработанная схема колонии, чем у Гилфиллана [15], теряет на земной орбите около 1% экологических материалов в столетие. Учитывая низкую микрометеоритную плотность межзвездной среды, можно надеяться на много лучшие результаты, особенно, если в течение полета и периода торможения корабль будет защищен курсовым экраном, подобным тем, что был описаны Геппенгеймером [10]. Таким образом, утечки в межзвездной среде не представляют проблемы.

Обеспечение энергией для повседневных нужд так же не ставит серьезных проблем при применении термоядерной техники. Если мы, вместе с О'Нелли [1], предположим, что на каждого

члена на колонии нужно 120 кВт электроэнергии, то требуется 1200 МВт мощности термоядерного генератора. Если эффективность (выгорание) термоядерного реактора равна эффективности двигателя для проекта "Дедал" (15%) и если 10% выходной энергии синтеза расходуется на нужды колонистов, расход топлива составит 0,2 г/с. Тогда для путешествия длительностью в 1000 лет потребуется 6 тыс. т топлива. Однако так как люди в высокоиндустриальных районах Земли используют 10 кВт на человека, 600 т топлива должно оказаться достаточно для полета.

Часть этой энергии понадобится для обеспечения некоторых форм искусственного освещения для сельского хозяйства и создания нормальных условий существования. Так как ксенон встречается в лунном грунте [16], ксеноновые дуговые лампы могут быть применены для этой цели. Возможно, что некоторые агрегаты, такие как устройства для хранения энергии и других ресурсов, которые во время полета не нуждаются в земных условиях будут конструироваться как ряд отдельных блоков, таких как предложенный лунный "контрапункт" [17], на стенках цилиндров. При полете к отдаленным звездным системам, экология корабля может быть "просыпающейся", похожей на не слишком невероятную систему, описанную А.Кларком в его романе "Свидание с Рамой".

Как только корабль достигнет намеченной звездной системы, он может использовать ресурсы некоторых своих систем для создания колоний Модель II и Модель III, колонизации лун, астероидов или планет. Потом, если члены общества захотят, корабль может дозаправиться и направиться к новой цели.

Топливо для D-<sup>3</sup>He реактора может быть получено из комет или льда, покрывающего спутники или астероиды [дейтерий]. Изотоп гелия может быть извлечен из атмосфер больших планет, или, как предложил Ловелл, произведен в D-D реакторе [18].

В то время как дейтерий или водород для D-T или литий-водородного реактора может быть подучен из комет или льда, покрывающего спутники или астероиды, литий, требуемый как топливо или используемый для производства трития [19] может быть получен из лунного грунта или вещества астероидов. Используя значение 0,001% содержания лития в лунном грунте [16], мы можем получить 200 тыс. тонн лития из 20 тыс. млрд. кг лунного грунта. Так как масса Луны 74 млрд. млрд. тонн, 300 тыс. млрд. звездных кораблей может быть запущено, используя только лунный литий. Если мы предположим, что плотность астероидов та же, что и Луны (3,3 г/см<sup>3</sup>) и концентрация лития близка к лунной, астероид радиусом 1,2 км может предоставить весь литий, необходимый для питания литий-водородного или D-T реактора в межзвездном полете (<sup>7</sup>Li используется в литий-водородном реакторе, <sup>6</sup>Li в D-T реакторе. Около 1% <sup>6</sup>Li содержится в природном литии).

Тип реактора, который наиболее пригоден для полетов этого типа, будет, конечно, определен позднее. Однако, так как колонисты могут пожелать набрать топливо в районе звезды-цели, реактор должен быть как можно более гибким в выборе топлива. В ситуации, когда корабль имеет массу 500 тыс. тонн и мы не ограничены в полезной нагрузке, такой гибкости нетрудно будет достигнуть. Большое разнообразие челночных аппаратов и научных приборов так же будет иметь место при таких размерах корабля.

В заключение, можно подчеркнуть, что из-за самостоятельного характера колоний О'Нелли, одной или двух этих колоний типа Модель I достаточно для распространения человечества далеко в космос за короткий, по геологическим масштабам период времени. Все это может быть достигнуто за счет вложения 30 млрд. долларов и исследований по проекту "Дедал".

## 2. Электростатический ионный сборник для межзвездного корабля

Сразу подчеркнем, что рассматривая межзвездные полеты продолжительностью в несколько столетий, которые может выполнить межзвездный корабль, мы можем начать с рассмотрения нескольких вариантов первоначальной идеи Бассарда - прямоочных межзвездных двигателей [20], которые не пригодны для коротких полетов. В отличие от нашего раннего

рассмотрения прямоточных ДУ [21], теперь мы согласны с Витмайером и Ловеллом [22,23], в том что для сбора межзвездных ионов комбинированный электростатическо-электромагнитный сборник лучше, чем чисто электромагнитный.

## 2.1. Торможение

На рис.2 изображен свободный от эрозии тормозной экран, а на рис.3 - электростатическо-электромагнитный ионный сборник для УПМР с каталитической  $^{12}\text{C}$ -H прямоточной ДУ или даже с низкоскоростной D- $^3\text{He}$  ДУ. Эти сборники весьма похожи на технику описанную Витмайером [22]. Сначала мы рассмотрим торможение, так как по всей видимости техника торможения будет развита раньше, чем УПМР. Система, показанная на рис.2, является свободным от эрозии тормозным экраном и, поэтому может быть использована неоднократно.

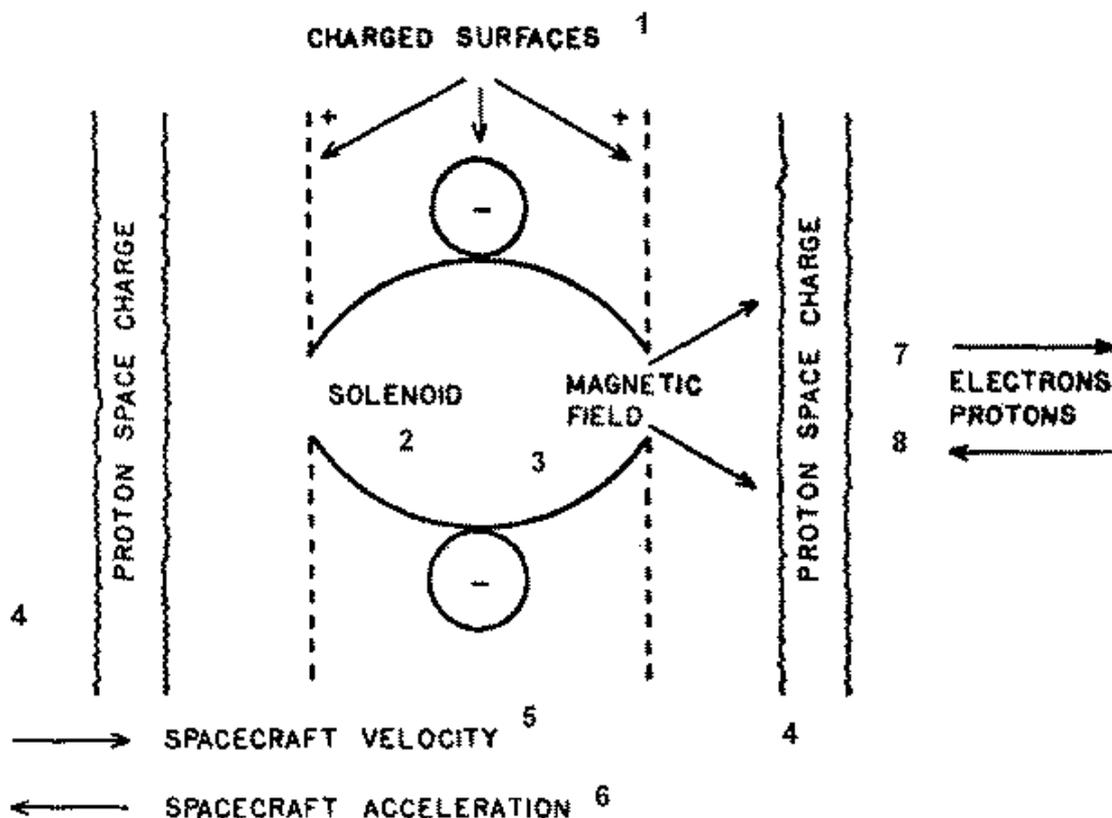


Рис. 2. Свободный от эрозии тормозной экран. Общий заряд отрицателен.  
 1- Заряженные поверхности. 2- Соленоид. 3 - Магнитное поле. 4 - Пространственный протонный заряд. 5 - Скорость корабля. 6 - Ускорение корабля. 7 - Электроны. 8 - Протоны.

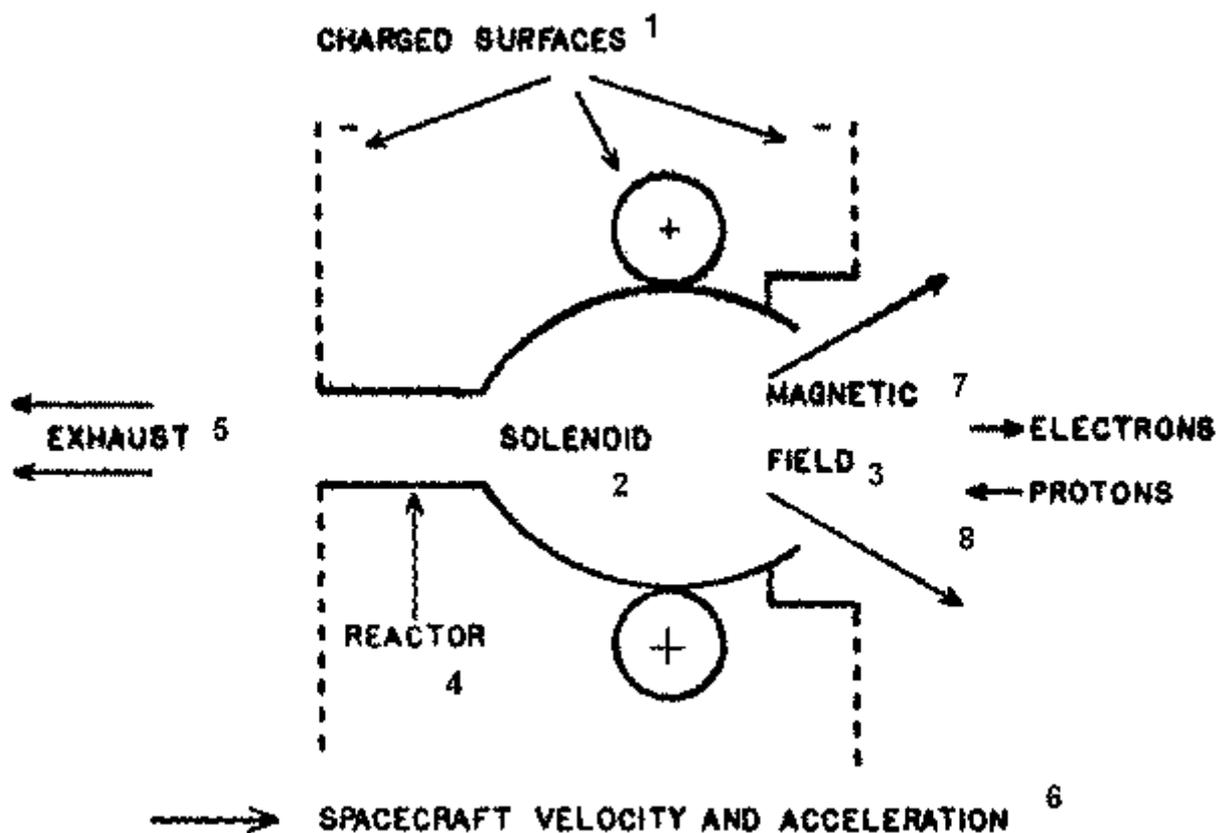


Рис. 3. Ионно-собирающая система для УПМР и прямоточной ДУ (основана на подходе Витмайера). Общий заряд отрицателен.

1 - Заряженные поверхности. 2 - Соленоид. 3 - Магнитное поле. 4 - Реактор. 5 - Выхлопная струя. 6 - Скорость и ускорение космического корабля. 7 - Электроны. 8 - Протоны.

Корабль,двигающийся в космосе в указанном на рисунке направлении, заряжен большим чисто отрицательным зарядом, сосредоточенном на полых поверхностях-сферах, имеющих около 1 км в диаметре. Этот отрицательный заряд может быть получен прямым взаимодействием со средой [12], радиоизотопными генераторами, подробно обсуждаемыми Форвардом [24] или с помощью другой техники.

Свободный отрицательный заряд будет притягивать протоны и отражать электроны. До того как протоны столкнутся с поверхностью, они будут тормозиться меньшим положительным зарядом протоно-тормозной решетки. Протонный пространственный заряд возникнет в области электростатического равновесия перед тормозной решеткой. Рост этого заряда ограничен, так как когда он станет достаточно большим, межзвездные электроны будут захватываться им, а протоны отталкиваться.

Для контроля этого пространственного заряда может быть использован соленоид эффективным радиусом около 10 км. Для этого соленоида могут быть использованы обычные проводящие материалы. Протоны, входящие в этот соленоид, могут ускоряться или тормозиться, используя заряженную решетку и усиливающий или нейтрализующий заряд поверхностей или соленоид.

Кормовая решетка, которая при взаимодействии с отрицательным зарядом поверхностей заряжается положительно, предохраняет отрицательный заряд от эмитируемых протонов. Пространственный заряд позади кормовой решетки может быть рассеян периодической контролируемой нейтрализацией отрицательно заряженных поверхностей или контролируемым увеличением положительного заряда на решетках.

Эффективность этого межзвездного тормоза или любой другой ионной собирающей электростатической системы может быть оценена в предположении, что эффективный радиус поля определяется расстоянием от корабля, на котором межзвездное электростатическое поле становится больше, чем поле корабля. Мы можем оценить величину межзвездного поля, рассматривая межзвездную среду в окрестностях Солнечной системы, которая имеет протонную плотность  $0,05 \text{ см}^{-3}$  [25]. Для электрически нейтральной межзвездной среды расстояние между зарядами составит 2,7 см. По закону Кулона, поле, создаваемое чистым отрицательным зарядом в  $0,02 \text{ °К}$  на расстоянии 10 000 км будет больше, чем электрическое поле между соседними ионами в межзвездной среде. Для чисто отрицательного заряда в  $20 \text{ °К}$  эффективный радиус поля будет около 300 000 км.

Так как электрическое взаимодействие упруго, торможение корабля мы можем рассчитать, используя сохранение импульса:

$$\dot{V}_{sd} = \frac{A\varphi M_p V_s^2}{M_s} = \frac{A\varphi M_p c^2}{M_s} \left[ \frac{V_s}{c} \right]^2 \quad (1)$$

где:

$A$  - площадь сбора ионов,

$\varphi$  - плотность протонов ( $0,05 \text{ см}^{-3}$ ),

$M_p$  - масса протонов ( $1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ )

$M_s$  - масса корабля ( $5 \cdot 10^8 \text{ кг}$ ),

$V_s$  - скорость корабля.

На рис.4 показаны величины отрицательных ускорений для сборников с радиусами 10 000, 100 000, 300 000 км в диапазоне скоростей 0,02 - 0,001  $c$ . Сборник с радиусом 10 000 км затормозит корабль с 0,02  $c$  до 0,001  $c$  за 80 лет.

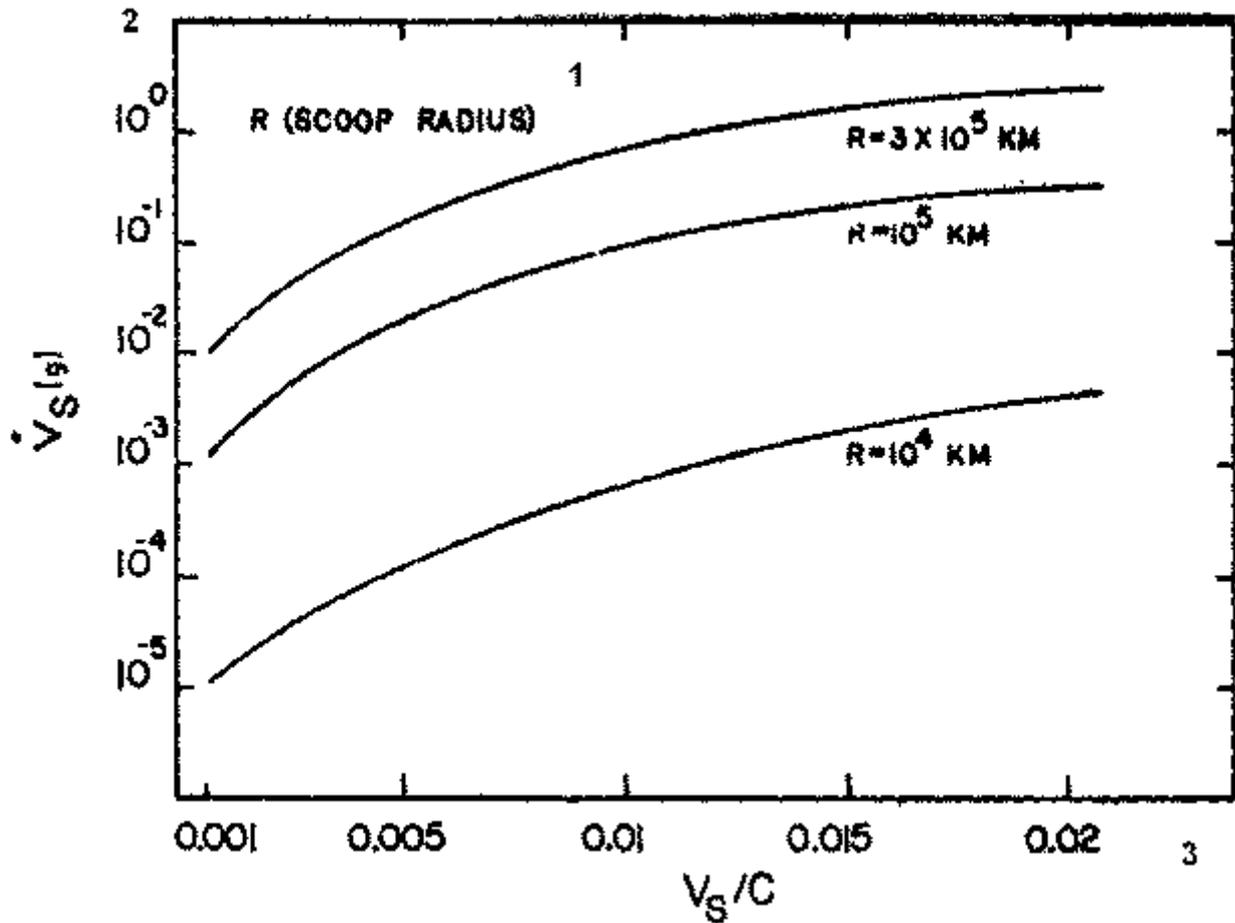


Рис.4. Торможение межзвездного корабля при использовании тормозного экрана.  
 1 - Радиус сборника, км. 2 - Ускорение корабля (доли g). 3 - Скорость корабля по отношению к скорости света.

Следовательно, чистый заряд в 1 К может быть достаточен для торможения. Как мы увидим, большие заряды могут оказаться необходимыми для определенных ускоряющих систем. Мы можем оценить размеры полой проводящей сферы, требуемой для поддержания заряда более чем 1000 К, используя оценку Витмайера, по которой сферический проводник в космосе может поддерживать электростатическое поле порядка  $10^7$  В/м [22]. По закону Кулона, сфера радиусом в 1 км, может иметь заряд в 1000 К в космосе.

Если мы имеем две 1-км сферы, каждая из которых заряжена до 1000 К и отделена от другой расстоянием в 10 км, кулоновские силы отталкивания между двумя сферами будут приблизительно равны  $10^{13}$  дин и напряжение составит 10 дин/см<sup>2</sup>. Учитывая модуль Юнга для алюминия [26] - деформация/размер =  $10^{-11}$ , получаем, что напряжения незначительны даже для зарядов больше рассматриваемых.

Другой аспект рассмотрения напряжений, возникающих из-за сил кулоновского отталкивания - предположение, что сила в  $10^{13}$  дин передается на два цилиндра корабля. Тогда эти два цилиндра будут отталкиваться с ускорением 0,02 g, что кажется приемлемым.

## 2.2. УПМР - ускорение

Как заметил Бонд [11], легче всего использовать межзвездную среду путем добавления рабочего тела, получаемого из среды, к термоядерному топливу, находящемуся на корабле. Для рассмотрения электростатической системы, собирающей ионы, мы должны сначала

продемонстрировать, что УПМР приемлемы в диапазоне скоростей 0,001 - 0,02 с и затем рассчитать возможность их использования для увеличения скорости корабля.

Мы оценим торможение в предположении, что все электроны отталкиваются, а все протоны притягиваются отрицательно-заряженной ионо-собирающей системой.

Если:

$V_p$  - скорость истечения протонов,

$M_f$  - расход термоядерного топлива в единицу времени,

$\epsilon$  - энергия на единицу массы на реакцию синтеза,

$\nu$  - выгорание,

$\tau$  - часть термоядерной энергии, уносимая нейтронами,

$k$  - часть энергии, используемая на ускорение межзвездных ионов,

мы можем записать:

$$\varphi M_p V_s A V_p^2 = \epsilon \tau k M_f c^2 \quad (2)$$

(Заметим, что в этой модели предполагается, что энергия сообщаемая рабочему телу, получаемому из межзвездной среда - это тепловая энергия нейтронов.)

Если мы предположим, что  $\varphi M_p V_s A < M_f$ , или что масса собираемая из межзвездной среды более чем в 100 раз больше массы, расходуемой в реакторе,  $\epsilon=0,004$ ,  $\nu=0,15$ , как в реакторе "Дедал",  $\tau=0,3$  как в реакторе Геппенгеймера [10] и предположим спорное, но приемлемое значение  $k=0,3$ , то из уравнения (2)  $V_p$  приблизительно равно  $10^{-3}$  с.

Определяя значение тормозящего (электронного) импульса как  $P_e$  и ускоряющего (протонного) как  $P_p$  мы можем определить  $P_p$  больше  $10 P_e$  (по абсолютной величине) как условие для существенно свободного от торможения УПМР, т.е.

$$\varphi M_p |V_p| |V_s| A > 10 \varphi M_e V_s^2 A \quad (3)$$

где  $M_e$  - масса электрона и мы предполагаем равную концентрацию протонов и электронов в межзвездной среде. Для свободной от торможения работы УПМР  $V_s$  меньше 0,185 с, что соответствует как зондам класса "Дедал", так и межзвездному кораблю.

Чтобы иллюстрировать превосходство УПМР над чисто ракетной ДУ, мы рассмотрим корабль сухой массой 500 тыс. тонн, несущий термоядерное топливо массой 150 тыс. тонн и сравним приращение скорости при использовании ракетной ДУ и УПМР.

Будем считать постоянным отношение массы рабочего тела собираемого из межзвездной среды к расходу термоядерного топлив,  $f$ , и, для простоты, будем считать продукты горения и рабочее тело хорошо смешанным. Тогда скорость истечения ракеты  $V_{eR}$  и УПМР,  $V_{eRAIR}$  могут быть записаны:

$$V_{eR} = c\sqrt{2\epsilon\eta}, \quad V_{eRAIR} \approx c\sqrt{\frac{2\epsilon\eta}{1+f}} \quad (4)$$

Увеличение импульса ракеты будет:

$$\Delta P_R = \Delta M_{R \text{ fuel}} V_{eR}$$

где  $\Delta M_{R \text{ fuel}}$  - масса топлива, выработанного за рассматриваемое время. Для общей массы топлива,  $M_f$ ,

$$\Delta P_R = M_f V_{eR} = M_f c \sqrt{2 \epsilon \eta}$$

В случае УПМР  $\Delta M_{RAIR}$  равна массе термоядерного топлива плюс масса межзвездных ионов. Поэтому:

$$\Delta P_{RAIR} = M_f (1 + f) \dot{V}_{eRAIR} \simeq M_f c \sqrt{2 \epsilon \eta (1 + f)}$$

Рассматривая топливо, космический корабль и межзвездные ионы как части замкнутой системы,

$$\Delta P = M_S \Delta V$$

и ускорения корабля может быть выражено:

$$\dot{V}_R = \frac{c M_f \sqrt{2 \epsilon \eta}}{M_S}, \quad \dot{V}_{RAIR} \simeq \frac{c M_f \sqrt{2 \epsilon \eta (1 + f)}}{M_S} \quad (5)$$

Исходя из этого, отношение ускорения УПМР к ускорению ракеты может быть оценено как:

$$\frac{\dot{V}_{RAIR}}{\dot{V}_R} \simeq (1 + f)^{1/2} \quad (6)$$

Таким образом, конечная скорость УПМР будет вдвое больше скорости ракеты при  $f=3$  и втрое при  $f=8$ . Результаты для  $f=8$  в этой оценке соответствуют результатам, приведенным в табл.5 Ловелла [23], полученных при той же  $f$  и эффективности. Эти два метода дают схожие результаты для  $V_S$  меньших  $0,025 c$ . Можно возразить, что эти значения  $f$  чрезмерно оптимистичны, т.к. в любой реальной УПМР продукты термоядерной реакции и межзвездные ионы не будут хорошо смешаны в выхлопной струе. Сильным контраргументом будет то, что если собирающее электрическое поле поддерживается постоянным,  $f$  увеличивается с увеличением скорости, значения  $f=3$  и  $f=8$  при  $V_S=0,001$  увеличатся до  $f=30$  и  $f=80$  при  $V_S=0,01$ , что с избытком покрывает любые ошибки, сделанные в предположении хорошего смешения.

Мы можем оценить площадь сбора, требуемую, чтобы получить  $f=3$  и  $f=8$ , предполагая, что 150 тыс. тонн термоядерного топлива сгорает с постоянной скоростью в течении 50 лет ( $1,5 \cdot 10^9$  сек) периода ускорения. Таким образом, каждую секунду сгорает 100 г топлива. При скорости  $0,001 c$  площадь сбора  $A$  будет собирать  $3 \cdot 10^{-18} \cdot A$  грамм. Для  $f=3$  и  $f=8$  радиусы сборников составят 60000 и 100 000 км соответственно. Эти радиусы будут снижаться при увеличении скорости, если поддерживать постоянным  $f$ . Чистый отрицательный заряд не более, чем в 2 К должен быть достаточным для ускорения УПМР до скоростей  $0,02 - 0,03 c$  при рассматриваемом отношении масс.

### 2.3. Концепции прямоточного двигателя

Наиболее интересные ДУ - это межзвездные прямоточные ДУ [20], так как они делают наш корабль абсолютно независимым в космосе. Если возможен прямой синтез водорода, сборник с радиусом 10 000 км позволяет создать постоянное ускорение  $0,003 g$  для нашего корабля массой 500 тыс. тонн при скорости больше  $0,02 c$ . Однако пока реакторы на каталитической C-H реакции не станут реальными [22], такая возможность не может рассматриваться как осуществимая.

В настоящее время мы технически ограничены рассмотрением D-D или D-<sup>3</sup>He прямоточными ДУ, которые требуют сбор этих изотопов с их очень малым содержанием в межзвездной среде. Мы рассмотрим, какие ограничения существуют для D-<sup>3</sup>He прямоточных ДУ, действующих в Галактической окрестности Солнца.

В межзвездной окрестности Солнца, отношение концентраций этих изотопов к водороду составляет  $D/H=1,4 \cdot 10^{-5}$  и  ${}^3\text{He}/H=3 \cdot 10^{-5}$  [27]. Это оправдывает принятие отношения термоядерное топливо/водород =  $6 \cdot 10^{-5}$  (по массе). Мы рассмотрим ДУ, в которой собирались положительные ионы, электростатически отделяются ионы термоядерного топлива, которые вступают в реакцию между собой, постоянно или запасаются и сжигаются в импульсном режиме. В каждом из этих случаев возможности реактора идентичны возможностям реактора зонда "Дедал". Детали электростатической сепарации ионов будут рассмотрены в последующей статье. Сопротивление движению будет рассмотрено в предположении, что положительные ионы собираются, а отрицательные отталкиваются. Это анализ худшего случая, так как электронный луч может быть отброшен в нужном направлении.

Масса термоядерного топлива, захватываемая прямоточной ДУ составит:

$$M_{FR} = 6 \times 10^{-5} \varphi A M_p V_s \quad (7)$$

а энергия, имеющаяся в распоряжении для ускорения ионов:

$$E_I = 6 \times 10^{-4} M_{FR} c^2 \quad (8)$$

для энергии на единицу массы на реакцию равной 0,004 и выгорании 0,15. Для продуктов синтеза скорость истечения составит 0,03 с и импульс ускоренного топлива будет равен:

$$P_{FR} = V_e M_{FR} = 6 \times 10^4 \varphi A M_p V_s \quad (9)$$

Работа прямоточного двигателя становится невозможной, когда сила сопротивления электронов станет больше, чем постоянный импульс передаваемый кораблю продуктами синтеза. Для нерелятивистского прямоточного полета мы можем применять уравнение Бассарда [14], если собирающее поле не сообщает какой-нибудь скорости входящим ионам. Для реактора, имеющего то же выгорание, что и в проекте "Дедал"

$$\dot{V}_s = 3.6 \times 10^{-8} \frac{\varphi A M_p c^2}{M_s}, \text{ for } V_s \gtrsim 2 \times 10^{-4} c \quad (10)$$

Для площади сбора  $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^2$ , которая создается чистым отрицательным зарядом в 20К.

$$\dot{V}_s \approx 1.5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}^2 = 1.5 \times 10^{-5} \text{ g.}$$

Теперь, предполагая массу корабля постоянной, изменение импульса в течение маленького ускорительного периода может быть записано как

$$\Delta P_A = M_s \Delta V_s = 7.5 \times 10^9 \text{ gm-cm/sec}^2, \quad (11)$$

для корабля массой 500 тыс. тонн в течение одной секунды.

Для того, чтобы существовало ускорение, надо чтобы это изменение импульса было больше соответствующего изменения за счет электронного торможения, и из уравнений (3) и (11)

$$V_s < 0.008 c \approx 0.01 c,$$

Если пренебречь торможением, ускорение от 0,001  $c$  до 0,005  $c$  требует 270 лет. В течение этого периода корабль пройдет 0,6 светового года. Таким образом, если мы примем 0,005  $c$  как конечную скорость нашего корабля, так как пренебрежение торможением не вводит существенной ошибки, путешествие к Альфа Центавра займет около 1000 лет.

Следует заметить, что если не достаточно тщательно спроектировать электростатический сборник, ионы могут приходиться в реактор со скоростью значительно превышающей скорость корабля и приведенный выше анализ будет существенно недооценивать эффект электронного торможения. Этот аспект конструкции проточной ДУ и электростатической техники для подавления электронного сопротивления представляется очень трудной, но, возможно, не неразрешимой проблемой. Более детально эти вопросы будут рассмотрены в следующей статье.

Даже если все эти проблемы будут разрешены, высокоскоростной полет типа рассматриваемого Бассардом [20] будет весьма затруднен. Громадный прогресс в технике, особенно в технике реакторов синтеза, потребуется для осуществления проточного полета со скоростью, превышающей 0,03  $c$ . Это следствие того, что при применении двигателя типа "Дедал", единственного двигателя, появление которого представляется вероятным, требуется медленно ввести ионы, нейтрализовать их, конденсировать в мишени и затем сжечь. При скоростях, больших 0,03  $c$ , сопротивление вводимых и конденсируемых ионов может оказаться больше, чем импульс, сообщавший кораблю при их сгорании.

### 3. Выводы

Мы представили проект межзвездного корабля, основанного на трех двигательных системах увеличивающейся сложности. Ракета, УПМР, проточные двигательные системы, все кажутся интересными, но проточная ДУ, по крайней мере, типа D-<sup>3</sup>He, может оказаться непрактичной, так как она требует надежной работы в течение 1000 лет полета. Если каталитический C-H реактор Витмайера станет практичным, эта сложность отпадет.

Более интересно то, что для межзвездного полета требуется только прогресс существующей техники и использование космических колоний, которые могут быть построены по следующей программе. Исходя из этого и из того факта, что в нашей Галактике значительно количество звезд, более старых, чем Солнце, многие цивилизации должны были создать такие движущиеся поселения в прошлом и запустить их в межзвездное пространство. Некоторые из них могут колонизировать соседние звездные системы, но по крайней мере, некоторые из них могут выбрать жизнь вечных туристов или странников, приближаясь к звездам только для исследований или дозаправки.

Кажется весьма вероятным, что один или несколько из этих движущихся миров мог побывать в нашей солнечной системе задолго до появления человеческой техники. Действительно, если мы не найдем следов такого визита в поясе астероидов или где-нибудь еще, мы можем оказаться в положении, когда потребуются объяснения такого отсутствия следов.

### Литература

1. G. K. O'Neill, 'The colonisation of space', *Physics Today*, 27, No. 9, 32-40 (September 1974).
2. P. J. Parker, 'Lagrange point colonies', *Spaceflight*, 17, 269-273 (1975).
3. P. E. Glaser, 'Solar power via satellite', *Astronautics and Aeronautics*, 11, No. 8, 60-68 (August 1973).
4. E. S. Gilfillan, Jr., *Migration to the stars*, Luce, Washington (1975), Appendix 6.
5. K. E. Tsiolkovsky's works are discussed by W. Sullivan, *We Are Not Alone*, McGraw-Hill, New York (1964). Chapter 16.
6. J. D. Bernal, *The World, the Flesh, and the Devil*, Indiana University Press, Bloomington, Indiana,

(republished 1969).

7. D. M. Cole and D. W. Cox, *Islands in space: Challenge of the planetoids*, Chilton, Philadelphia (1964).
8. Starship study: Progress report, *Spaceflight*, 15, 232-233 (1973).
9. Project Daedalus: An interim report on the BIS Starship Study, *Spaceflight*, 16, 356-358 (1974).
10. T. A. Heppenheimer, 'Some advanced applications of a 1-million second Isp rocket engine', *JBIS*, 28, 175-181 (1975).
11. A. Bond, 'An analysis of the potential performance of the Ram Augmented Interstellar Rocket', *JBIS*, 27, 674-685 (1974).
12. A. R. Martin, 'The effects of drag on relativistic spaceflight', *JBIS*, 25, 643-652 (1972).
13. N. H. Langton, 'The erosion of interstellar drag screens', *JBIS*, 26, 481-484 (1973).
14. K. A. Ehricke, 'Saturn-Jupiter rebound: A method of high speed spacecraft ejection from the solar system', *JBIS*, 25, 561-571 (1972).
15. E. S. Gilfillan, 1975, Chapter 3 and Appendix 1.
16. Lunar Sample Preliminary Examination Team, 'Preliminary examination of lunar samples from Apollo 11', *Science*, 165, 1211-1227 (1969).
17. J. R. Dossey and G. L. Trotti, 'Counterpoint: A lunar colony', *Spaceflight*, 17, 259-268 (1975).
18. C. Powell, 'Interstellar flight and intelligence in the Universe', *Spaceflight*, 14, 442-447 (1972).
19. K. Boyer, 'Laser-initiated fusion-key experiments looming', *Astronautics and Aeronautics*, 11, No. 1, 28-38 (1973).
20. R. W. Bussard, 'Galactic matter and interstellar flight', *Astronautica Acta*, 6, 179-194 (1960)
21. G. L. Matloff and A. J. Fennelly, 'A superconducting ion scoop and its application to interstellar flight', *JBIS*, 27, 663-673 (1974).
22. D. P. Whitmire, 'Relativistic spaceflight and the catalytic nuclear ramjet', *Acta Astronautica*, 2, 497-509 (1975)
23. C. Powell, 'Flight dynamics of the Ram-Augmented Interstellar Rocket', *JBIS*, 28, 553-562 (1975)
24. R. L. Forward, 'Zero thrust velocity vector control for interstellar probes: Lorentz force navigation and circling', *AIAA Journal*, 2, 885-889, 1964.
25. A. Dalgarno and R. A. McCray, 'Heating and ionisation of HI regions', *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 10, 375-426(1972).
26. F. W. Sears and M. Zemansky, *College Physics*, Addison-Wesley, Reading Mass. (1960) p. 210
27. H. Reeves, 'On the origin of the light elements', *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 12, 437-469 (1974).

(Presented at the British Interplanetary Society Conference on Interstellar Travel and Communication, London, 31 March 1976.)