

DIRECT-FLOW RELATIVISTIC ENGINE – HYPOTHESIS FOR DISCUSSION

ПРЯМОТОЧНЫЙ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ – ГИПОТЕЗА ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ

Alexander P. SENKEVICH,
Master of Applied Physics and Mathematics,
Researcher, Institute of Nuclear Research,
General Director STAR LLC., Moscow, Russia,
senkevi4@gmail.com

ABSTRACT | In this paper, the engineering and scientific community is invited to consider and discuss the possibility of developing and constructing a ramjet engine for movement in the interstellar medium when the speeds of an aircraft are close to the speed of light. The idea is based on existing developments in high energy physics and accelerator technology.

For interstellar flight, a motion scheme is proposed using accelerated relativistic high-energy protons to create efficient jet engines based on accelerating superconducting structures. The proposed scheme is based on the existing developments in the field of accelerator technology, using superconducting resonator systems, klystrons and high-frequency generators.

The use of the impulse of the relativistic motion of charged particles is proposed as a hypothesis for discussing the design of a direct-flow engine for motion in the interstellar medium.

Keywords: *Jet propulsion, deep space, thrust module, multifunctional jet engine, superconducting resonator accelerator, high-energy protons, manned space exploration, linear accelerator direct-flow engine*

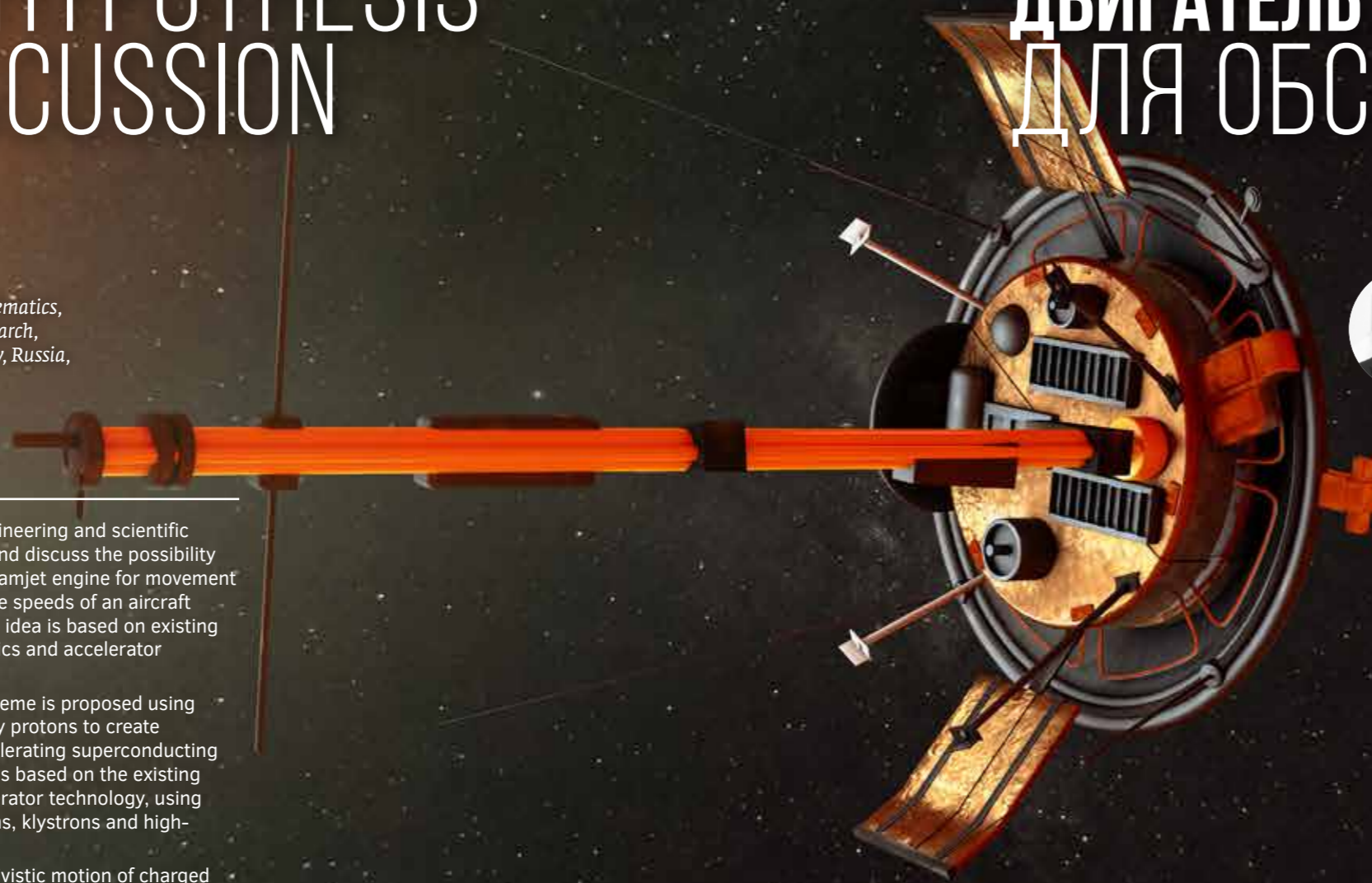
Александр Павлович СЕНКЕВИЧ,
магистр прикладной физики и математики,
научный сотрудник Института ядерных исследований,
генеральный директор ООО «Звезда», Москва, Россия,
senkevi4@gmail.com

АННОТАЦИЯ | В данной работе инженерно-научному сообществу предлагается рассмотреть и обсудить возможность разработки и построения прямоточного двигателя для движения в межзвездной среде при достижении скоростей летательного аппарата, приближенных к скорости света. Идея основана на имеющихся наработках в физике высоких энергий и ускорительной техники.

Для межзвездного полета предлагается схема движения с использованием ускоренных релятивистских высокоэнергетических протонов для создания эффективных реактивных двигателей на базе ускоряющих сверхпроводящих структур. Предложенная схема основана на имеющихся разработках в области ускорительной техники с использованием сверхпроводящих резонаторных систем, клистронов и высокочастотных генераторов.

Предлагается использование импульса релятивистского движения заряженных частиц как гипотеза для обсуждения проектирования прямоточного двигателя для перемещения в межзвездной среде.

Ключевые слова: *реактивное движение, дальний космос, тяговый модуль, многофункциональный реактивный двигатель, ускоритель на сверхпроводящих резонаторах, высокоэнергетические протоны, пилотируемая космонавтика, линейный ускоритель, прямоточный двигатель*



ВВЕДЕНИЕ

Межзвездное путешествие – одна из тем, которые широко и довольно подробно обсуждаются в научном сообществе, – представлена в научной фантастике и рассматривается футурологами как обязательный элемент эволюции и требование для выживания и развития человеческого рода. Для инженера-физика это сложная техническая задача, которая может опираться на многие современные разработки в разных областях науки и техники. В последние 300 лет с каждым витком развития науки и технологий появляются проекты, которые в рамках данного развития могут предложить решение задачи межзвездных полетов. Создаются такие космические корабли, как аппараты серии «Вояджер», которые преодолели границы нашей Солнечной системы и покинут гелиосферу. Они будут лететь миллионы лет до ближайшей звезды. Можно ли считать это полетом к звездам с точки зрения человека и длительности его жизни? Чтобы совершить полет, продолжающийся соизмеримое с человеческой жизнью время, придется думать над новыми двигателями для звездных кораблей, которые смогут обеспечить им скорость, близкую к скорости света. Опишем проблематику, связанную с этим. А также предложим гипотезу для построения двигательной установки, которая может быть перспективна в будущем.

Чтобы совершить полет, продолжающийся соизмеримое с человеческой жизнью время, придется думать над новыми двигателями для звездных кораблей, которые смогут обеспечить им скорость, близкую к скорости света

Современные ученые выделяют три главные проблемы межзвездного полета [1]. Во-первых, это время полета: даже при близких к скорости света скоростях для полетов в рамках нашей Галактики потребуются тысячи лет. Проблема номер два – это потоки пыли, газа и единичных частиц, которые могут повреждать защиту корабля и угрожать экипажу. И самая большая проблема – энергетическая (весовая). При использовании термоядерной реакции и скоростях истекающих газов, близких к световым (0,7 c), соотношение конечной и начальной массы космического аппарата при классическом истечении газов по формуле Жуковского оказывается больше 10^{30} , что показывает: возможность построения космического аппарата при классической компоновке отсутствует.

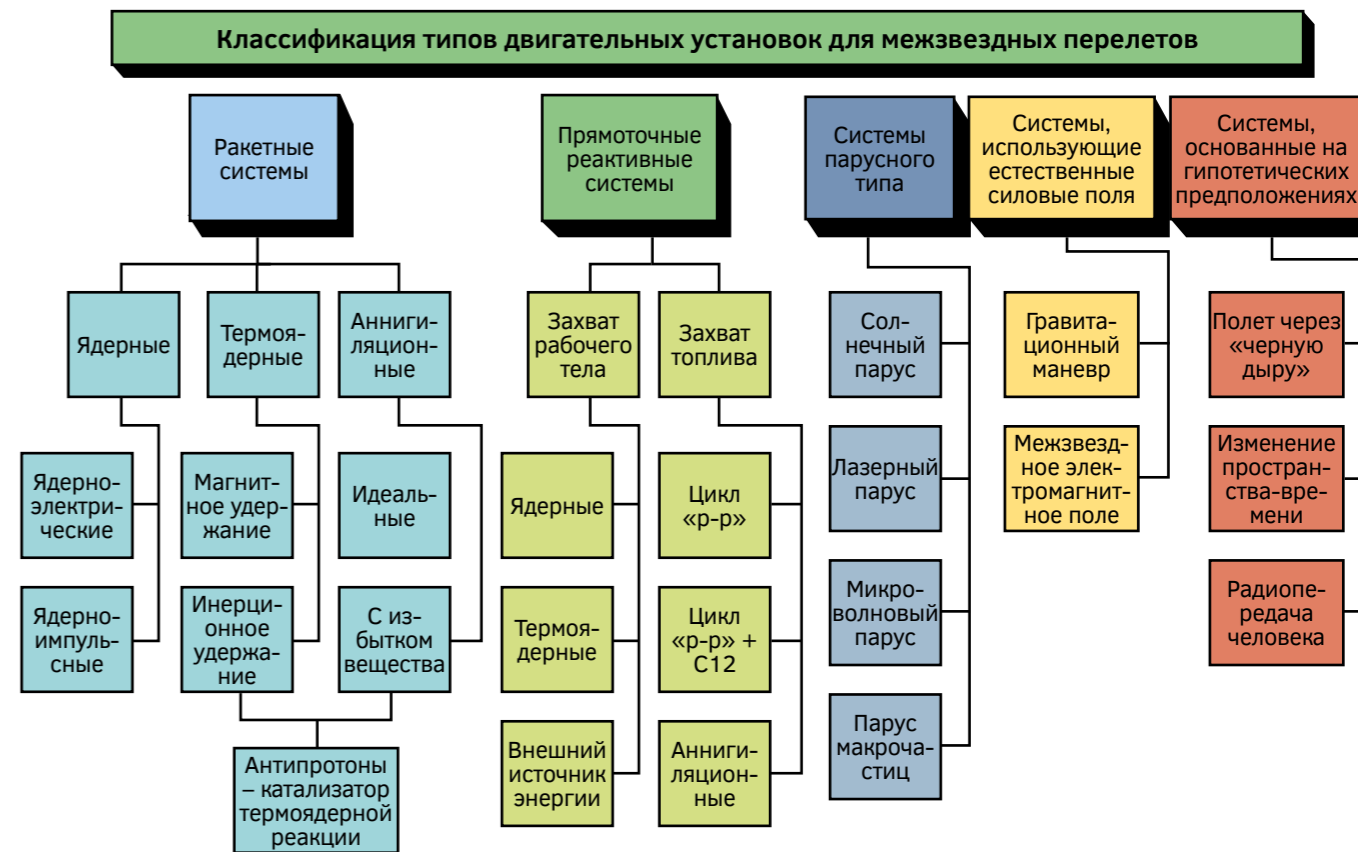
СИТУАЦИЯ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Есть только один способ ускорить тело в вакууме. Чтобы наш аппарат приобрел нужную скорость, его работа должна основываться на действии закона сохранения импульса (если векторная сумма всех внешних сил, действующих на систему, равна нулю, то импульс системы сохраняется, то есть не меняется со временем). Этот закон работает при любых скоростях и в любых условиях. В пустом пространстве космический аппарат может ускорить себя, только лишившись части своей массы или в общем случае импульса (закон сохранения импульса). Возьмем простейший случай и рассмотрим детали релятивистского реактивного движения. Пусть ракета массой M , летящая со скоростью U , за малый интервал времени dt выбрасывает в противоположном направлении движения некто, обладающее кинетической энергией \mathcal{E} и скоростью – u .

Примем этот случай за основу и рассмотрим процесс приобретения скорости у аппаратов. Учтем, что речь идет о замкнутой системе, то есть тело находится в абсолютном вакууме и не подвергается действию внешних воздействующих сил. Если мы выбираем этот вариант применительно к звездному кораблю, возникает проблема: чем больше надо ускорить тело, тем больше должно быть само исходное тело. Чтобы решить эту проблему, нужно рассматривать нашу систему как открытую. В такой системе могут использоваться не только внутренние резервы, но и материя, которая находится в межзвездном пространстве. Другими словами, будем рассматривать наш космический аппарат как систему, в которой «рабочее тело», или материал для истечения, поступает из внешней среды, а импульс генерируется установкой, которая с помощью внешней энергоустановки обеспечивает генерацию электроэнергии, необходимой для работы. Сформулируем задачу: как получить импульс и с помощью каких инструментов?

Следующая проблема связана со временем полета: как его сократить? Она может быть решена, только если скорость полета будет близка к скорости света. Как известно, это предел скорости путешествия между звездами. При этом из-за релятивистских эффектов возникает эффект замедления времени внутри летящего аппарата. Но существует и другое ограничение: корабль не может мгновенно развить нужную скорость. Чтобы ее набрать, потребуется время и ускорение a . Для длительного путешествия человеку будет комфортно ускорение, равное ускорению свободного падения на Земле, то есть равноускоренное движение с ускорением $a \sim g$ (9,8 м/с²).

Рис. 1. Классификация типов двигательных установок



Теперь приведем пример расчета времени полета при данных граничных условиях. Пусть полеты туда и обратно состоят из трех фаз: равноускоренного разгона, полета с постоянной скоростью и равноускоренного торможения. Расчет времени полета выглядит так:

Собственное время любых часов будет иметь вид

$$\int_0^t \sqrt{1 - u^2(t)/c^2} \cdot dt,$$

где $u(t)$ — скорость этих часов.

Земные часы неподвижны $u = 0$ и их собственное время равно координатному $\tau_0 = t$.

Часы космонавтов имеют переменную скорость $u(t)$. Так как корень под интегралом остается всегда меньше единицы, время этих часов, независимо от явного вида функции $u(t)$, всегда оказывается меньше t . В результате $\tau_0 < \tau$.

Если разгон и торможение проходят релятивистски и равноускоренно (с параметром собственного ускорения a) в течение τ_1 , а равномерное движение – τ_2 , то по часам корабля пройдет время:

$$\tau_0 = \frac{2c}{a} \ln \left[\frac{a\tau_1}{c} + \sqrt{1 + \left(\frac{a\tau_1}{c} \right)^2} \right] + \frac{\tau_2}{\sqrt{1 + (a\tau_1/c)^2}} = \frac{2c}{a} \operatorname{arcsinh} \frac{a\tau_1}{c} + \frac{\tau_2}{\sqrt{1 + (a\tau_1/c)^2}}$$

где $\operatorname{arcsinh}$ – гиперболический арксинус.

Если космический аппарат разгоняется до середины расстояния S до цели, а затем тормозится, то полное корабельное время полета до цели в одном направлении равно

$$T_k = \frac{2c}{a} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{aS}{2c^2} \right) \cdot [2]$$

Рассмотрим полет к звездной системе альфы Центавра, удаленной от Земли на расстояние в 4,3 световых года. Если время измеряется в годах, а расстояние в световых годах, то скорость света с равна единице, а единичное ускорение $a=1$ св. год/год² близко к ускорению свободного падения и примерно равно 9,5 м/с².

Пусть половину пути космический аппарат двигается с единичным ускорением, а вторую половину – с таким же ускорением тормозит. Затем корабль разворачивается и повторяет этапы разгона и торможения. В этой ситуации время полета в

земной системе отсчета составит примерно 12 лет, а по часам на корабле пройдет 7,3 года. Максимальная скорость космического аппарата достигнет 0,95 от скорости света.

Такой режим полета и такое время могут быть вполне приемлемы для человека, они укладываются в рамки его активной жизни.

Перейдем к проблеме потоков пыли и газа. При движении космического аппарата с околосветовой скоростью протоны межзвездного газа Галактики (плотностью 0,2 атома/см³) превратятся в пучок, направленный против направления полета космического корабля. Энергия пучка – 10 – 30 МэВ плотностью 1010 частиц на квадратный сантиметр в секунду. На поверхности Земли, как известно, интенсивность космического излучения составляет всего 2 частицы на квадратный сантиметр в секунду [3]. При этом поток приходится в основном в передней полусфере, которая будет сужаться, концентрироваться с возрастанием скорости движения [4]. Данный поток можно будет собирать или отклонять так, чтобы он не мешал экипажу и общему движению.

ПРОРАБОТАННЫЕ НА ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ ВАРИАНТЫ ЗВЕЗДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Чтобы долететь до звезд, потребуются реактивные аппараты другой конструкции. Необходимо увеличить либо тягу двигателей, либо время их работы. К примеру, ракета с химическими двигателями обладает тягой несколько тысяч тонн, но работать будет всего несколько минут. И наоборот – космический аппарат с двигателем другого вида, например ионным, обладает небольшой тягой, но работать в открытом космосе способен годами. Таким образом, для межзвездного полета пригодны не все типы двигателей. Необходимы или высокие скорости истечения рабочего вещества, или большое значение ускорения (соотношение тяги двигателя и массы летательного аппарата).

Современный российский исследователь данной проблематики Иван Михайлович Моисеев (руководитель Института космической политики) в своей работе [5] дает такую классификацию двигателей для межзвездных перелетов (МП) (рис. 1):

Согласно данной классификации для рассмотрения предлагается ядерно-электрическая реактивная система с захватом рабочего тела, работающая на внешнем источнике.

ПРЕДЛАГАЕМАЯ ДЛЯ РАССМОТРЕНИЯ ИДЕЯ

Согласно принципу сохранения импульса импульс системы остается постоянным в отсутствие внешних сил. Мы будем использовать для ускорения внутренние силы и энергию, накопленную в веществе, и, отдав импульс через тело, получим импульс в противоположную сторону [6].

С другой стороны, согласно специальной теории относительности, объекты набирают массу по мере приближения к скорости света. Ускорив тело до скорости, близкой к скорости света, мы придадим ей сколь угодно большой импульс.

Для оценки параметров габаритов просчитаем зависимость массы космического аппарата при условии, что он движется с постоянным ускорением. Из закона сохранения импульса выходит:

$$P_k = M_k \cdot U_k = M_k \cdot a \cdot t = P_p = M_p \cdot u_p,$$

где M_k – масса космического аппарата, a – ускорение, получаемое космическим аппаратом, u_p – скорость протонов, M_p – общая масса протонного пучка; с другой стороны, импульс потока протонов опишем через его ток и учтем, что мы рассматриваем быстрые протоны, где u_p стремится к скорости света. Исходя из этого, импульс можно записать так:

$$M_p u_p = m_{p0} N_p Y u_p = I_p Y t \left(\frac{c \cdot m_{p0}}{q_p} \right),$$

где I_p – суммарный ток протонов, m_{p0} – масса покоя протонов, q_p – заряд протона, Y – гамма-фактор с учетом скорости:

$$Y = \left(\frac{u_p}{c} \right) \cdot \left(\frac{E_p + E_{p0}}{E_{p0}} \right).$$

При скорости протона значительно релятивистской $u_p \rightarrow c$ и $E_p \gg E_{p0}$

$$Y \approx \frac{E_p}{E_{p0}},$$

где E_p – энергия протонов в эВ, E_{p0} – вес покоя протона в эВ = 938,272 МэВ, вводим константу

$$S_{const} = \left(\frac{c \cdot m_{p0}}{q_p} \right) = 3,1297142.$$

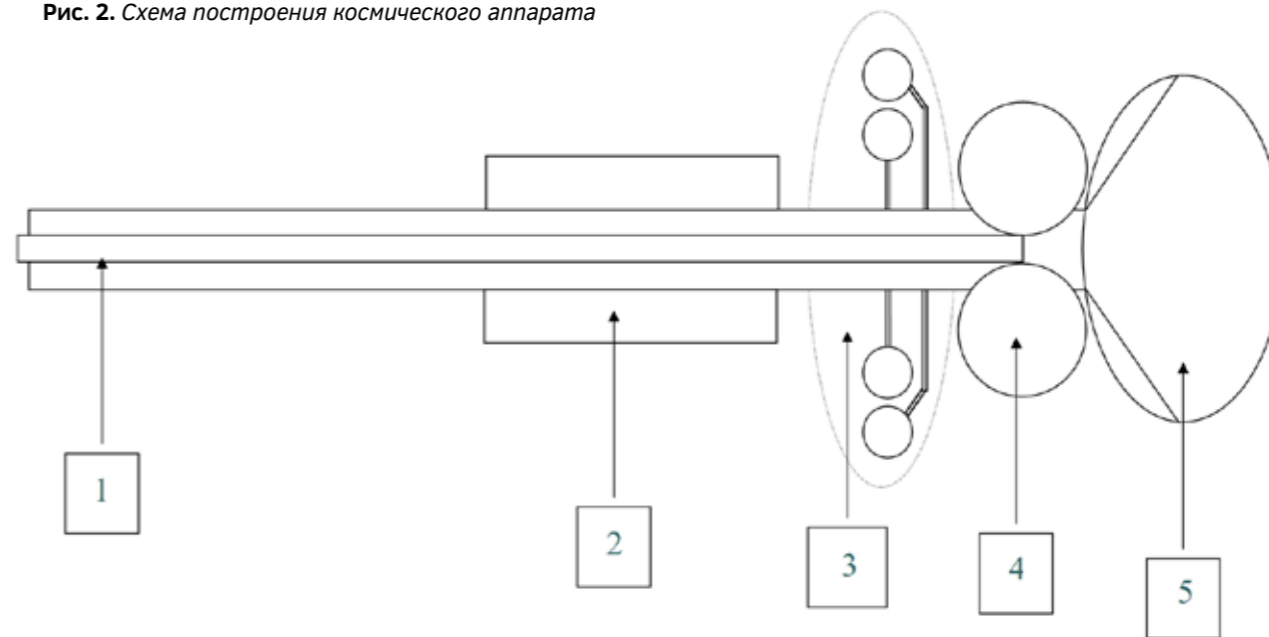
Получаем простое соотношение между массой ускоряемого космического аппарата и токами испускаемых протонов:

$$M_k \cdot a = I_p \cdot Y \cdot S_{const}.$$

Эти эффекты возьмем за принцип построения и работы двигателя, а именно ускорение заряженных частиц до релятивистских скоростей в электромагнитном поле и последующем испускании.

Космический аппарат можно представить в виде большого линейного ускорителя заряженных частиц, которые разгоняются электрическим полем и, достигнув околосветовых скоро-

Рис. 2. Схема построения космического аппарата



стей, выбрасываются в виде реактивной струи. При этом масса частиц в процессе ускорения возрастает в тысячи раз. А так как укоряется малый объем частиц, расход вбрасываемого тела может быть минимальным.

Это вариант длинного линейного ускорителя заряженных элементарных частиц, которыми могут быть и ионизированные атомы водорода, и электроны. Такой принцип устройства близок к описанным выше ионным двигателям.

Также можно решить еще одну из проблем скоростного звездного полета, используя свободные межзвездные атомы водорода. По современным оценкам, в каждом кубическом сантиметре межзвездного пространства содержится примерно один такой атом. Одним из возможных решений была бы защита от данных частиц при помощи электромагнитных полей с одновременным захватом для восполнения расходуемого для реактивного движения вещества. То есть в процессе полета будем производить ионизацию и сбор заряженных частиц с использованием в ускорителе для создания тяги.

Одним из возможных решений проблемы защиты от заряженных элементарных частиц может стать ионизация и сбор этих частиц с использованием в ускорителе для создания тяги.

При дальнейшем развитии технологии энергоустройств можно использовать собираемые атомы для реакции термоядерного синтеза [7] в целях получения энергии для общей работы космического корабля. И как вариант предельного развития системы — полностью замкнуть энергообеспечение и расходное вещество на получаемое из внешнего пространства.

ПРИМЕР КОНСТРУКЦИИ

В целях обсуждения мною предлагается такой вариант конструкции прямого релятивистского двигателя (рис.2):

- 1) линейный ускоритель частиц;
- 2) ядерная энергоустановка;
- 3) система вращающихся жилых модулей, систем жизнеобеспечения и производства пищи, размещенная в радиационно-поглощающей оболочке и накопителе водорода (вариант – ледяной щит);
- 4) предускорители протонов (инжекторы и протонные синхротроны для предускорения протонов до энергии 500 – 900 МэВ);
- 5) система сбора и ионизации звездного водорода на базе тонкого заряженного сеточного паруса или сильных магнитных систем, собирающих и сепарирующих полученные ионы для предускорителей.

Оценим параметры конструкции с учетом имеющихся наработок в ускорительной технике.

РАСЧЕТ ВАРИАНТА МАССОГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для текущих параметров линейных ускорителей возможно использовать сверхпроводящие магниты, которые позволяют выдавать ускорение до 100 МэВ/м при работающих резонаторах на частоте 2,6 ГГц. [8 – 12].

Используются сверхпроводящие резонаторы с добротностью 10^{10} и выполненные из 3 – 5-мм ниобиевого контура и сверхпроводник Nb₃Sn (18,5 К) с охлаждением жидким водородом H₂ (14,01 К – 20,28 К) или гелием в замкнутом контуре [13].

Ускоритель может состоять из 200 трубок резонаторов диаметром 10 – 15 см, которые будут рассчитаны на ток до 10 А.

Для описанных выше параметров для получения 300 ГэВ или γ -300 необходима длина ~3 км.

Так как материал сверхпроводящего канала выталкивает электрические поля и они проходят в материал не более чем на 0,5 – 1 мм, сами каналы могут быть выполнены из тонкого материала 1 – 2 мм, соединены в пакеты с волноводами и пронизаны капиллярной системой, проводящей жидкий водород. Примерно оценим вес этих каналов. При учете того, что канал есть полая труба 10 см в диаметре и 5 – 7 см трубы волновода, вес ускорительного канала в среднем равен 500 кг/м (данный параметр оценочный, плотность материала Nb₃Sn 8,9 г/см³). Итого выходит ~1500 т.

На первых этапах проектирования целесообразно разрабатывать оборудование для межзвездных кораблей как системы, генерирующие энергию на Земле, или как линейные ускорители с высоким током заряженных частиц для исследовательских и медицинских задач.

Также из тока 2000 А можно оценить расход водорода ($T \cdot I_p^* / q_p$), и он выходит ~600 кг/год, то есть двигатель дает импульс 1 878 000 кг·м/с.

Исходя из этого, ускоряемая масса космического аппарата может быть ~1900 т при ускорении 0,1 g.

Необходимая мощность реактора при ~90% эффективности резонаторов и клистронов – 11 МВт.

Но данные параметры электрических систем – это параметры систем, существующих на сегодняшний день. По мнению специалистов по фи-

зике высоких энергий, они не предельны и могут быть существенно улучшены до сотен ГэВ на метр [14]. И если технологии позволят в ближайшем будущем создавать такие устройства, километровые ускорители смогут ускорять ядра до сотен тераэлектронвольтов (10^{15} эВ). γ ~100 000.

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Оценим возможности использования полученной плазмы, протонного газа с энергией 300 ГэВ и плотностью тока 2000 А для поджога термоядерной реакции. Чтобы вступить в реакцию, ядра должны преодолеть потенциальный барьер [15]. Например, для реакции дейтерий-тритий величина этого барьера составляет примерно 0,1 МэВ (1 эВ соответствует $1,16 \cdot 10^4$ кельвин). То есть протон может ионизировать $3 \cdot 10^5$ протонов, достаточных для проведения термоядерной реакции (0,1 МэВ). При этом если ток — 2000 А, это $6 \cdot 10^{21}$ событий термоядерного синтеза на стоящих частицах или потенциально до 10 ГВт исходящей энергии, которую можно собирать и использовать для движения и сбора межзвездной материи. Данные оценки показывают, что на первых этапах проектирования можно разрабатывать оборудование для межзвездных кораблей как системы, генерирующие энергию на Земле, или как линейные ускорители с высоким током заряженных частиц для исследовательских и медицинских задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена идея построения прямого релятивистского двигателя и намечена принципиальная схема релятивистского атомного звездолета. Идея основана на имеющихся разработках в области ускорительной техники и энергоустановок. Основная цель данной работы – привлечь внимание к проблеме использования имеющихся наработок в физике высоких энергий для прикладного применения в сфере исследований космоса. Принципы построения и работы двигателя космического аппарата ограничены базой хорошо изученных физических законов и явлений СТО. Опираясь на них, можно построить аппарат, способный решить поставленную задачу: долететь до ближайших звезд и вернуться в сроки 20 – 30 лет.

Литература

1. Феоктистов К. Полет к звездам // Квант. 1990. № 9. С. 50 – 57.
2. Левантовский В.И. Механика космического полета в элементарном изложении. М.: Наука, 1970. С. 452.
3. Мирошниченко Л.И. Космические лучи // Физическая энциклопедия. В 5 т. / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2: Добротность – Магнитооптика. С. 471 – 474.
4. Багров А.В., Смирнов М.А., Смирнов С.А. Межзвездные корабли с магнитным зеркалом // Труды XX чтений К.Э.Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Калуга, 1985.
5. Моисеев М.И. Межзвездные перелеты: к вопросу о методологии исследований // К. Э. Циолковский и инновационное развитие космонавтики. Материалы XLVIII Научных чтений памяти К. Э. Циолковского, Калуга, 2013.
6. Бурдаков В.П., Данилов Ю.И. Ракеты будущего. М.: Атомиздат, 1980. 160 с.
7. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1991. 528 с.
8. Азарян Н.С., Батурицкий М.А. и др. Состояние и перспективы создания резонаторов для нового поколения e+e-линейных ускорителей и коллайдеров. Международное рабочее совещание, Минск, 22-25 апреля 2014 г. Дубна: ОИЯИ, 2015.
9. Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ-структуры. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.
10. Тепляков В.А., Мальцев А.П., Степанов В.Б. Высокочастотная квадрупольная фокусировка (к истории ее возникновения и развития). Протвино, 2006. 34 с.

11. Полозов С.М., Фертман А.Д. Ускорители протонного пучка большой мощности для подкритических ядерных установок // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 3. С. 155 – 162.
12. Патент № 2231235Л РФ. Способ изготовления сверхпроводящего резонатора / Севрюкова М., Суздаев В.И., Филиппов Д.Л. Опубл. 20.06.2004.
13. Борисов Л.М., Гельвич Э.А., Жарый Е.В., Закурдаев А.Д. и др. Мощные многолучевые электровакуумные усилители СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1993. № 1. С. 12 – 20.
14. Григорий Трубников. История ускорителей атомных ядер [Электронный ресурс] // ПостНаука. 2014. 01 сентября. URL: <https://postnauka.ru/longreads/50411> (Дата обращения: 12.11.2020).
15. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Физматлит, 1961. 467 с.

References

1. Feoktistov K. Polet k zvezdam. Kvant, 1990, no. 9, pp. 50 – 57.
2. Levantovskiy V.I. Mekhanika kosmicheskogo poleta v elementarnom izlozhenii. Moscow, Nauka, 1970, p. 452.
3. Miroshnichenko L.I. Kosmicheskie luchi. Fizicheskaya entsiklopediya. In 5 vol. Ed. A. M. Prokhorov. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1990. Vol. 2: Dobrotnost' – Magnitooptika, pp. 471 – 474.
4. Bagrov A.V., Smirnov M.A., Smirnov S.A. Mezhzvezdnye korabli s magnitnym zerkalom. Trudy XX chteniy K.E.Tsiolkovskogo. Kaluga, 1985.
5. Moiseev M.I. Mezhzvezdnye perelety: k voprosu o metodologii issledovaniy. K.E.Tsiolkovskiy i innovatsionnoe razvitie kosmonavtiki. Materialy XLVIII

© Сенкевич А.П., 2020

История статьи:

Поступила в редакцию: 11.09.2020
Принята к публикации: 04.10.2020

Модератор: Гесс Л.А.

Конфликт интересов: отсутствует

Для цитирования:

Сенкевич А.П. Прямоточный релятивистский двигатель – гипотеза для обсуждения // Воздушно-космическая сфера. 2020. № 4. С. 70 – 77.



Nauchnykh chteniy pamyati K.E.Tsiolkovskogo, Kaluga, 2013.

6. Burdakov V.P., Danilov Yu.I. Rakety budushchego. Moscow, Atomizdat, 1980. 160 p.

7. Lebedev A.N., Shal'nov A.V. Osnovy fiziki i tekhniki uskoriteley. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 528 p.

8. Azaryan N.S., Baturitskiy M.A. et al. Sostoyanie i perspektivy sozdaniya rezonatorov dlya novogo pokoleniya e+e- lineynykh uskoriteley i kollayderov. Dubna, OIYaI, 2015.

9. Didenko A.N., Sevryukova L.M., Yatis A.A. Sverkhprovodyashchie uskoryayushchie SVCh-struktury. Moscow, Energoizdat, 1981. 208 p.

10. Teplyakov V.A., Mal'tsev A.P., Stepanov V.B. Vysokochastotnaya kvadropol'naya fokusirovka (k istorii ee vozniknoveniya i razvitiya). Protvino, 2006. 34 p.

11. Polozov S.M., Fertman A.D. Uskoriteli protonnogo puchka bol'shoy moshchnosti dlya podkriticheskikh yadernykh ustanovok. Atomnaya energiya, 2012, vol. 113, iss. 3, pp. 155 – 162.

12. Sevryukova M., Suzdalev V.I., Filippov D.L. Sposob izgotovleniya sverkhprovodyashchego rezonatora. Pat. RF no. 2231235L (2004).

13. Borisov L.M., Gel'vich E.A., Zharyy E.V., Zakurdaev A.D. et al. Moshchnye mnogoluchevye elektrovakuumnye usiliteli SVCh. Elektronnaya tekhnika. SVCh-tekhnika, 1993, no. 1, pp. 12 – 20.

14. Grigoriy Trubnikov. Istoriya uskoriteley atomnykh yader. PostNauka. 2014. September 01. Available at: <https://postnauka.ru/longreads/50411> (Retrieval date: 12.11.2020).

15. Artsimovich L.A. Upravlyayemye termoyadernye reaktzii. Moscow, Fizmatlit, 1961. 467 p.