

DOI: 10.17725/rensit.2024.16.341

Нелинейная радиофизика межзвездных перелетов: разгон макрообъектов с помощью электромагнитного излучения

Дмитриев А.С.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, <http://www.cplire.ru/>
Москва 125009, Российская Федерация

E-mail: chaos@cplire.ru

Поступила 27.11.2023, рецензирована 04.12.2023, принята 24.04.2024

Аннотация: Обсуждается одна из реализаций разгона космических аппаратов на основе мощного искусственного излучения, способных за двадцать-тридцать лет (т.е. за время активной жизни одного поколения людей) достичь ближайших звезд в созвездии альфа-Центавра. Проект Breakthrough Starshot (BS, Прорыв: Звездный выстрел) предложен в 2016 году. Ключевыми новыми моментами проекта являются: 1) идея о межзвездных аппаратах сверхмалой размерности, что делает физические параметры проекта потенциально достижимыми в обозримое время; 2) модульное построение системы запуска и 3) распространение закона Мура на развитие космической техники. В качестве альтернативы схеме линейного типа «BS», ниже рассматривается закрытая кольцевая схема лазерного разгона макрообъектов. Показывается, что она перспективна для кардинального снижения пиковых требований к схеме запуска линейного типа.

Ключевые слова: межзвездные полеты, Альфа Центавра, нанокрафт, мощные лазеры, кольцевая схема разгона

УДК 535.8, 620.78

Для цитирования: Дмитриев А.С. Нелинейная радиофизика межзвездных перелетов: разгон макрообъектов с помощью электромагнитного излучения. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2024, 16(3):341-352. DOI: 10.17725/rensit.2024.16.341.

Nonlinear radiophysics of interstellar flights: macro objects acceleration using electromagnetic radiation

Alexander S. Dmitriev

Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, <http://www.cplire.ru/>
Moscow 125009, Russian Federation

E-mail: chaos@cplire.ru

Received November 27, 2023, peer-reviewed December 04, 2023, accepted April 24, 2024

Abstract: We discuss one of the implementations of acceleration, based on powerful artificial radiation, of spacecraft capable of reaching the nearest stars in the constellation Alpha Centauri in twenty to thirty years (i.e., during the active life of one generation of people). The Breakthrough Starshot project (BS, Breakthrough: Starshot) was proposed in 2016. The key new aspects of the project are: 1) the idea of interstellar vehicles of ultra-small dimension, which makes the physical parameters of the project potentially achievable in the foreseeable future; 2) modular construction of the launch system and 3) extension of Moore's law to the development of space technology. As an alternative to the linear "BS" type scheme, a closed ring scheme for laser acceleration of macro-objects is considered below. It is shown to be promising for dramatically reducing the peak requirements for a linear-type micro spacecraft launch.

Keywords: interstellar flights, Alpha Centauri, nanocraft, power lasers, circular acceleration scheme

UDC 535.8, 620.78

For citation: Alexander S. Dmitriev. Nonlinear radiophysics of interstellar flights: macro objects acceleration using electromagnetic radiation. RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies, 2024, 16(3):341-352e. DOI: 10.17725/j.rensit.2024.16.341.

Посвящается 100-летию публикации статьи Фридриха Артуровича Цандера «Перелеты к другим планетам» [1]

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (342)
2. ПРОБЛЕМА МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ (343)
3. СИСТЕМЫ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ (343)
4. ЛАЗЕР, КАК ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ (344)
5. ПРОЕКТ «ЗВЕЗДНЫЙ ВЫСТРЕЛ» (345)
 - 5.1. КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММЫ (345)
 - 5.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ (346)
6. СХЕМА С КОЛЬЦЕВЫМ РАЗГОННЫМ БЛОКОМ (348)
 - 6.1. КОСМИЧЕСКАЯ ПРАЦА (348)
 - 6.2. КОЛЬЦЕВАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО РАЗГОНА (349)
7. ВЫВОДЫ ДЛЯ РОССИИ (350)

1. ВВЕДЕНИЕ

Тема данной статьи о звездных перелетах связана с именем Фридриха Артуровича Цандера. С одной стороны как с одним из родоначальников современной космонавтики, но с другой, почти на мистическом уровне, как автором идеи светового паруса для передвижения в космическом пространстве, идее, которая привела к наиболее реалистичной на сегодняшний день схеме реализации межзвездных перелетов. Скоро этой идее, кратко изложенной в статье «Перелеты к другим планетам» [1], исполняется сто лет.

Если сформулировать смысл настоящей статьи совсем коротко, то он звучит так. Межзвездная космонавтика в отличие от околоземной и межпланетной космонавтики технологически будет опираться не только на механику и термодинамику, но в определяющей степени на радиофизику (в основном нелинейную) в разных масштабах.

О роли визионеров в развитии науки, техники и общества: В.И. Ленин, Г. Уэллс, Ф.А. Цандер, И.А. Ефремов. И так, все по порядку. Конец 1920 год. Только что закончилась Гражданская война. Положение в стране тяжелейшее. Еще не создан Советский Союз, но уже принят и начал выполняться план ГОЭЛРО. За этот план - социалист, великий фантаст и визионер (человек, обладающий даром предвидеть какие-то черты будущего) Герберт Уэллс уже назвал Владимира

Ильича Ленина, после личной встречи с ним и долгой беседы, кремлевским мечтателем.

В декабре В.И. Ленин присутствует на Конференции изобретателей в Москве, где Ф.А. Цандер выступил с докладом о своем проекте межпланетного корабля аэроплана. Вот что рассказал впоследствии сам Цандер об этой встрече своему соратнику Л. Корнееву [2]: «После доклада меня пригласили к В. И. Ленину. Я был очень смущен. Но Владимир Ильич с такой простотой и душевностью расспрашивал о моих работах и планах на будущее, что я даже несколько злоупотребил его временем и очень подробно рассказал о своих трудах и о своей мечте во что бы то ни стало построить ракетный межпланетный корабль.

Я с очень большим воодушевлением говорил Ленину, что работаю не только над конструкцией межпланетного корабля-самолета, но много думаю о том, как и в каких условиях будет летать человек на Марс; как ему выдержать ускорение, как одеваться во время полета, чем и как питаться и т. д. и т. п.

Затем Владимир Ильич спросил меня: «А вы первым полетите?»

Я ответил, что иначе и не мыслю, так как должен показать пример, а после меня смело полетят другие... »

В конце беседы Владимир Ильич пожал мне руку, пожелал успеха в работе и обещал поддержку.

Есть мнение, что это легенда. Но искреннюю заинтересованность руководителей молодого Советского государства, такой, казалось бы экзотике для того времени, как космические полеты, подтверждает тот факт, что когда в 1924 году группа энтузиастов Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского создала секцию реактивных двигателей, которая впоследствии превратилась в Общество изучения межпланетных сообщений, членом президиума общества стал Ф.А. Цандер, а почетными членами — Ф.Э. Дзержинский (бывший в это время Председателем Высшего совета народного

хозяйства СССР (ВСНХ) , К.Э. Циолковский и Я.И. Перельман.

В любом случае идея космических полетов попала в благоприятную почву и, несмотря на всю сложность и технической реализации, и общей обстановки через тридцать с небольшим лет в СССР был запущен Первый искусственный спутник Земли.

Отсюда можно сделать два вывода:

1. Во-первых, для того, чтобы что-то серьезное создать, нужно, как минимум, положить этому начало через фиксацию в сознании активной части общества самой идеи.
2. Во-вторых, важная роль прозорливости руководства молодой страны и его восприимчивость к новым идеям. Именно оно, а не маститый писатель фантаст Г Уэллс являлось в то время коллективным визионером в отношении будущего нашей страны, и фраза из стихотворения «В музее В.И. Ленина»: «... И Ленин видел далеко, на много лет вперед...» уже не кажется только фигурой речи.

А как же межзвездные перелеты?

2. ПРОБЛЕМА МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ

Отечественный читатель широко познакомился с идеей межзвездных полетов в январе 1957 года, когда журнал «Техника молодежи» начал публикацию романа И.А. Ефремова «Туманность Андромеды» (Рис. 1) [3]. До запуска первого искусственного спутника Земли оставалось еще полгода, но идея освоения космоса уже витала в воздухе. И разница между полетом в космос и



Рис. 1. Начало публикации романа И.А. Ефремова "Туманность Андромеды" в журнале "Техника молодежи", 1957 г..

полетом к звездам для большинства читателей не казалась столь масштабной, как это есть на самом деле: и то, и другое, было еще фантастикой. Но в своем романе визионер И. Ефремов уже заглянул на несколько веков вперед, представив человечеству грандиозную и развернутую перспективу его звездного будущего.

Прошло всего несколько лет, и задача полета к звездам стала широко обсуждаться в научно-технической литературе.

В качестве примеров приведем книги [4,5], посвященные рассмотрению принципов движения в космическом пространстве со скоростями, намного превышающими первую, вторую и третью космические скорости. Ведь для того, чтобы долететь до ближайших звезд нужны скорости сопоставимые со скоростью света, т.е. десятки тысяч километров в секунду и больше, что превосходит первые три космические скорости, по меньшей мере на три порядка. Анализ известных источников энергии и рабочих тел быстро показал, что все возможные источники знакомые человечеству на тот момент, и даже гипотетические схемы представляются, если и потенциально достижимыми, только в очень удаленной и туманной перспективе. Кроме того, не удалось выявить этапы, достижения которых существенно приближало бы хотя бы технологически к решению целевой задачи.

3. СИСТЕМЫ С ВНЕШНИМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В последние несколько десятилетий надежды по решению грандиозной задачи полета к звездам стали связывать с использованием для ускорения космических аппаратов внешних источников энергии, прежде всего формирующих направленное электромагнитное излучение диапазона видимых и более коротких длин волн. Эта идея возникла по историческим масштабам времени практически сразу после изобретения лазера [6]. Однако, было показано, что и она сталкивается в случае полета полномасштабных межзвездных кораблей (а это объекты массой, как минимум, сотни и тысячи тонн) с невообразимыми для современного состояния науки и техники масштабами требуемых энергетических затрат и заоблачного уровня технологий.

Постепенно пришло понимание, что задача межзвездных перелетов требует какого-то конструктивного переформулирования. И мысль человеческая постепенно стала сдвигаться в этом направлении.

Собственно, в качестве одной из первых, по использованию внешних источников энергии для разгона и управления космическими кораблями, справедливо рассматривать идею солнечного паруса, разработанную Ф.А. Цандером применительно к межпланетным перелетам [1,2].

Появление этой идеи связано с публикацией научно-фантастического романа, в котором давления солнечного излучения или (в современной терминологии) «солнечного паруса» использовалось для передвижения летательных аппаратов в атмосфере Земли.

Как пишет Г.М. Салахутдинов [7], Ф.А. Цандер узнал об этой идее из книги известного популяризатора идей космонавтики И.Я. Перельмана [8]. Проведя соответствующие расчеты, И.Я. Перельман отверг идею как нецелесообразную при существующем уровне техники. Однако Ф.А. Цандер, заинтересовавшись «солнечным парусом», переформулировал задачу о возможности использования давления светового излучения для передвижения в космосе. В своих работах он рассмотрел несколько конструкций «солнечного паруса», наиболее целесообразная из которых была подробно описана им в 1924 году в неопубликованном варианте статьи «Перелеты на другие планеты». В кратком виде идея использования «солнечных парусов» присутствует и в опубликованном варианте статьи [1].

«Солнечный парус» по замыслу Ф. Цандера должен был иметь площадь 1 квадратный километр при толщине экрана 0.01 миллиметра и массу – триста килограммов. «Парус» должен был иметь центральную ось и некоторый набор силовых элементов, поддерживающих его форму. Ф.А. Цандер отмечал, что толщина экрана может быть еще меньше, так как к этому времени Т. Эдисону удалось изготовить никелевые листы толщиной 0.001 миллиметра и размером 3200 квадратных метров.

Ф.А. Цандер считал также целесообразным направлять на «солнечный парус» космического

аппарата поток света, собранный вторым «парусом», расположенным на некоторой промежуточной межпланетной станции. Эта его идея переключается с современными предложениями об использовании для разгона космического аппарата искусственного лучистого (лазерного) «ветра», обеспечивающего существенно большее давление на поверхность, чем солнечные лучи. Исследователь попытался разработать и основы теории движения космических аппаратов «под солнечным парусом». В целом работы Ф.А. Цандера по использованию светового давления для передвижения в межпланетном пространстве носили пионерский характер.

4. ЛАЗЕР, КАК ВНЕШНИЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

Изобретение лазеров резко активизировало интерес к схемам запуска с внешними источниками энергии. Их можно условно поделить на два класса: с обычным рабочим телом и с использованием фотонного излучения в качестве рабочего тела. Среди многочисленных проектов движителей первого класса, безусловно есть немало очень интересных, но они лежат вне данного рассмотрения, поскольку даже потенциально не могут обеспечить разгон материальных объектов до скоростей, сопоставимых со скоростью света, и не являются претендентами на средства межзвездных перелетов. Лазерным движителям второго класса посвящены, например, работы Г. Маркса [5] и Р. Форварда [9], в которых было предложено использовать расположенный на Земле лазер для разгона ракеты до релятивистских скоростей. Статья Г. Маркса включает также релятивистский анализ движения паруса, т.е. плоского совершенного зеркала, ускоряемого радиационным давлением.

Однако, как уже отмечалось во введении, и такие системы для их применения для полетов полномасштабных межзвездных кораблей (а это объекты массой, как минимум, сотни и тысячи тонн) требуют невообразимых для современного состояния науки и техники масштабов энергетических затрат и заоблачного уровня технологий.

Появление внешних источников энергии в виде лазерных систем технически переводит проблему межзвездных полетов из сферы механики и термодинамики, в основном связанных с реактивным движением, в сферу радиофизики сверхбольших энергий.

5. ПРОЕКТ «ЗВЕЗДНЫЙ ВЫСТРЕЛ»

Breakthrough Starshot (Прорыв: Звездный выстрел) - исследовательская и инженерная программа стоимостью 100 миллионов долларов, целью которой является демонстрация концепции новой технологии, позволяющей осуществить полет сверхлегкого беспилотного космического аппарата со скоростью 20% от скорости света; и заложить основу для полета к Альфе Центавра в течение одного поколения. В рамках концепции «Прорывных инициатив» (Breakthrough Initiatives), Starshot был запущен Юрием Мильнером и Стивеном Хокингом в 2016 году и финансируется фондом, основанным Юрием и Джулией Мильнер [10,11].

Председателем Консультативного комитета проекта Starshot по предложению Мильнера стал профессор Леб, декан факультета астрономии Гарвардского университета. За некоторое время до формального старта программы, в середине 2015 года, молодые сотрудники Леба, начали сортировать варианты межзвездных перелетов на невозможное, невероятное и выполнимое. В декабре того же года они получили статью Филипа Любина, физика из Калифорнийского университета в Санта Барбара, названную «Дорожная карта к межзвездному полету» [12,13]. На основе своих предшествующих исследований по исследованию возможностей создания систем защиты Земли от метеоритной опасности в рамках проекта DE-STAR, профинансированного DARPA, Любин выбрал двигательную установку с лазерной фазированной антенной решеткой, то есть большим количеством маленьких лазеров, объединенных вместе так, чтобы их свет когерентно образовывал единый луч. Этот лазерный луч толкает, несущий парус, чип, который должен будет двигаться с хорошей долей световой скорости, чтобы достичь другой звезды за пару десятилетий. (Подобная идея была опубликована в 1976 году физиком и писателем-фантастом Робертом Форвардом; который назвал

эту схему Starwisp [9].) Хотя технология все еще была больше научной фантастикой, чем фактом, «я в основном передал Starshot дорожную карту», - рассказывал Любин, согласившийся присоединиться к проекту.

5.1. КОНЦЕПЦИЯ ПРОГРАММЫ

Программа Breakthrough Starshot воплощает подход Кремниевой долины к космическим путешествиям, использующий экспоненциальный прогресс в ключевых областях технологий с начала 21 века.

Система доставки включает две составляющие: Нанокрафты и Систему Светового луча.

Нанокрафт это – роботизированный космический аппарат, состоящий из двух основных частей: StarChip (Звездный чип) и Lightsail (Световой парус).

StarChip. Закон Мура позволил резко уменьшить размер микроэлектронных компонентов. Это дает возможность создать пластину граммового масштаба, несущую камеры, фотонные двигатели, источник питания, навигационное и коммуникационное оборудование, и составить полностью функциональный космический зонд.

Ситуацию применимости закона Мура к эволюции космической техники можно проиллюстрировать сравнением характеристик Первого искусственного спутника Земли, запущенного СССР в октябре 1957 года и наноспутника разработанного в Корнельском университете в 2018 году. Оба объекта (Рис. 2) представляли собой автономные низкоорбитальные спутники способные передавать небольшие объемы информации на расстояние нескольких сотен километров.

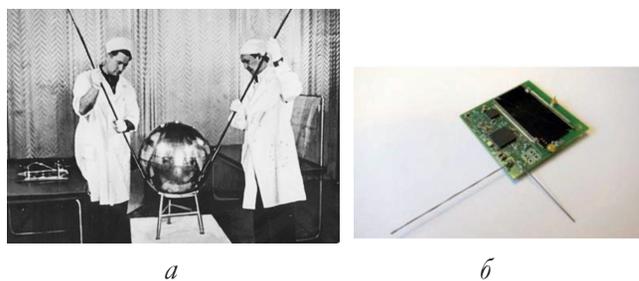


Рис. 2. Иллюстрация закона Мура для космической техники: (а) Первый спутник Земли с антеннами, разработанными в лаборатории МВ. Краушукина, ОКБ-1, 1957 год, масса 83 кг; (б) Наноспутник (нанокрафт), разработанный в Корнельском университете 2018 год, масса 5 г.

Т.е. функционально они похожи друг на друга. При этом масса Первого искусственного спутника Земли составляла 83 кг, а наноспутника Корнельского университета, появившегося на 60 лет позже – 5 г. Т.е. при прочих равных условиях, масса сопоставимых по возможностям спутников уменьшилась 16,6 тысяч раз. При продолжении тенденции спутники с подобными характеристиками уменьшатся к 2040 еще примерно в 25 раз и будут иметь массу 0.2 г.

Lightsail. Достижения в области нанотехнологий приводят к созданию все более тонких и легких метаматериалов, обещающих сделать возможным изготовление парусов метрового масштаба толщиной не более нескольких сотен атомов и массой в граммы. Действительно, в 1993 года феврале в России был проведен эксперимент «Знамя 2» [14]. 4 февраля 1993 года космический корабль «Прогресс М-15» отстыковался от орбитальной космической станции «Мир» и, отойдя на расстояние 160 метров, развернул солнечный парус. Парус представлял собой круг диаметром 20 метров, состоящий из отдельных секторов (Рис. 3). Он был выполнен из металлизированной полимерной пленки толщиной 5 мкм. Квадратный метр такой пленки имеет массу около 7 г.

В ходе программы «Знамя» были выполнены условия международного конкурса «Колумб 500», где победителем должен был стать тот, кто первым развернет в космосе солнечный парус. Однако, американская сторона – организатор конкурса, это достижение проигнорировала



Рис. 3. Космический аппарат "Прогресс М-15" с развернутым солнечным парусом, 1993 г.

Световой луч. Рост мощности и снижение стоимости лазеров в соответствии с законом Мура приведут к значительному прогрессу в технологии излучения света. А фазированные решетки лазеров (формирующие «световые лучи») потенциально могут увеличить уровень излучения до 100 гигавайт.

Аргументом в пользу реальности такого развития техники формирования и излучения сверхмощных лазерно-оптических систем могут служить результаты, достигнутые корпорацией IPG Photonics. Корпорация ведет свою историю с начала 1990 годов, когда коллектив сотрудников российской компании НТО «ИРЭ-Полус» разработал первые прототипы волоконных усилителей света с диодной накачкой, по мощности превышающие зарубежные аналоги. Позже основатель этой компании В.П. Гапонцев создал международную корпорацию IPG Photonics, которая в настоящее время контролирует значительную часть мирового рынка волоконных лазеров большой мощности. Эти лазеры можно рассматривать, в качестве достаточно продвинутых прототипов для лазерных излучателей массива лазерных излучателей системы разгона нанокрафтов.

Подробно проблема создания фазированных решеток лазеров требуемых масштабов рассмотрена в [15].

Проект Breakthrough Starshot стремится довести эффект масштаба до астрономических размеров.

Корабли StarChip могут производиться серийно по цене iPhone и отправляться на миссии в большом количестве для обеспечения избыточности и покрытия.

Принципиальным отличием проекта Starshot от предшествующих идей, связанных с межзвездными полетами, заключается в кардинальном изменении масштабов межзвездных кораблей: от сотен тонн до единиц грамм, т.е. примерно на 10 порядков. Соответствующим образом меняются и требования к системе, как по размерам, так и по энергозатратам.

5.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ

Ключ к системе заключается в способности создать фотонный ускоритель. Для релятивистского полета ($> 0.1 c$) также необходима разработка

зондов сверхмалой массы. Фотонный ускоритель представляет собой лазерную фазированную решетку, которая устраняет необходимость в разработке одного очень большого лазера и заменяет его большим количеством небольших (кВт класса) лазерных усилителей, которые по своей сути имеют фазовую синхронизацию, поскольку они питаются от обычного затравочного лазера. Этот подход также устраняет обычную оптику и заменяет ее фазированной решеткой из небольших оптических элементов, которые представляют собой тонкопленочные оптические элементы. Эта лазерная матрица была описана в статьях [11,12] и называется DE-STAR (Directed Energy System for Targeting of Asteroids and ExploRation – Система направленной энергии для наведения на астероиды и исследования). Рассматриваются системы DE-STAR квадратной формы и разных размеров DE-STAR – 1,2,3 и 4, со стороной квадрата, соответственно, 10, 100, 1000 и 10000 метров.

Полномасштабная DE-STAR 4 (50-70 ГВт) будет разгонять космический корабль массой несколько грамм с лазерным парусом масштаба 1 м примерно до 26% скорости света примерно за 10 минут, что позволит достичь Марса (1 а.е.) за 30 минут, пройти 1000 а.е. за 12 суток и достичь Альфы Центавра примерно за 20 лет. Тот же драйвер направленной энергии (DE-STAR 4) может также разогнать полезную нагрузку 100 кг до примерно 1% от скорости света и полезную нагрузку в 10 000 кг до скорости более 1000 км/с. Систему можно масштабировать до любого уровня мощности и размера массива, где требуется компромисс между желаемой массой и скоростью космического корабля.

Дорожная карта может начаться с НАМНОГО более скромных систем, включая наземные испытания, испытаний на спутниках масштаба CubeSat, возможно, испытаний на МКС и все более сложных системах. Полезное тестирование может начаться на уровне субкиловатт, поскольку система в основном «самоподобна», и все устройства являются масштабированными версиями других. Нет никакого внутреннего барьера для скорости, кроме скорости света, и, таким образом, в отличие от других технологий, здесь нет «тупика». Эта технология масштабируется в огромном

диапазоне масс. «Лазерный фотонный драйвер» может приводить в движение практически любую массовую систему с конечной скоростью, зависящей только от масштаба построенного драйвера. Поскольку система является модульной и масштабируемой, начальные затраты очень скромны, поскольку полезны даже небольшие системы.

Проект «Breakthrough StartShort» («BS», «Звездный выстрел») кардинально меняет подход к анализу возможностей межзвездных перелетов. Использование принципа внешней тяги и сверхмалых космических аппаратов делает вполне реальной перспективу полета к ближайшим звездам на историческом горизонте 20-30 лет.

Вместе с тем сами авторы отмечают, что рассматриваемое ими решение скорее гипотетическое и нуждается в серьезной разработке, в процессе которой первоначальная концепция может претерпеть радикальные изменения.

При этом вся система в целом выглядит как монстр, и по собственным размерам, и по расстояниям, на которых эта система должна действовать: размер разгонного участка 4.6 и 12.7 млн. км, для корабля массой 1 г и 10 г, соответственно. Кроме того, требуется гигантская мощность самого «светового луча» ~100 ГВт.

Последнее связано прежде всего с малым временем разгона (при гигантских ускорениях). Если бы время разгона было в тысячу раз больше, то требуемая мощности источников излучения снизилась бы на те же три порядка и составила 100 МВт, при времени разгона около 200 тыс. сек. для корабля массой 1 г (50 часов, двое суток), и 1 млн. сек. (250 часов, 10 суток) для корабля массой 10 г. Ускорения разгона при этом составят 24 g и 2.4 g, соответственно. А это с технической точки зрения куда более простые по достижимости цифры!

Это обстоятельство заставляет задуматься об альтернативном решении.

Альтернативное решение, может заключаться в использовании для разгона кораблей не прямолинейной, а кольцевой траектории диаметром D , на которой нано корабль ускоряется постоянно действующим лазерным излучением (при этом появляется возможность

«растянуть» во времени процесс разгона). Схема такой установки будет рассмотрена ниже.

6. СХЕМА С КОЛЬЦЕВЫМ РАЗГОННЫМ БЛОКОМ

Концепция схемы разгона аппарата, предлагаемая в проекте «Звездный выстрел», рассматривает ускорение нанокraftа в свободном космическом пространстве и ее можно условно отнести к «открытым» схемам. Другими вариантами ускорения объектов могут быть схемы с замкнутым пространством, в котором производится разгон аппаратов - «закрытые» схемы запуска.

Идея использования «закрытой» схемы запуска с использованием внешних источников энергии имеет очень длинную историю и буквально витает в воздухе с начала освоения космического пространства. Собственно говоря, за ее точку отсчета можно принять появление романа Жюль Верна «Из пушки на Луну» [16]. В данном случае в качестве источника внешней энергии использовался заряд пороха, в разгон происходил в «закрытом» пространстве ствола пушки. Разгон в закрытом пространстве имеет то преимущество, что практически вся энергия внешнего источника передается разгоняемому телу – отсутствуют потери, связанные с рассеиванием кинетической энергии взрыва в окружающее пространство. Идея использования «пушечного запуска» с применением взрывчатых веществ неоднократно рассматривалась и исследовалась, в том числе экспериментально, например в системе проекта HARP (High Altitude Research Project - Проект высотных исследований) [17], как альтернатива ракетным запускам. Обе схемы «пушечного запуска» и Жюль Верна и в система HARP осуществляют разгон объектов в «прямолинейных стволах».

Другим вариантом «закрытой» схемы запуска является ее реализация в качестве замкнутой в кольцо структуры. Такой вариант дает возможность существенно снизить требования к мощности источников энергии за счет использования относительно невысокого, но значительно более длительного по сравнению с временем «взрыва» в «прямолинейном стволе» ускорения. Ниже такой подход иллюстрируется на примере системы «космической пращи» с механическим разгоном [18].

Использование кольцевой схемы с нашей точки зрения заслуживает внимания и для запуска объектов с субсветовыми скоростями.

6.1. КОСМИЧЕСКАЯ ПРАЩА

Идея космической пращи реализуется компанией SpinLaunch, основанной в 2014 году Джонатаном Йени и вдохнувшей новую жизнь в давнюю идею использования гигантских механических пращей для запуска аппаратов на орбиту.

Космический предприниматель Йени, думая о том, как реализовать себя в космической отрасли, снова и снова возвращался к упомянутому выше проекту HARP, в котором США использовали гигантские пушки для того, чтобы выстреливать объекты в космос. В проекте HARP было доказано, что в космос можно выйти без ракеты, и Йени решил самостоятельно создать кинетическую систему запуска. Он собрал демонстрирующую работоспособность концепции установку, механическую пращу, способную разгонять объекты размером с пулю до сверхзвуковых скоростей.

Строительство первой серьезной центрифуги было закончено в 2016 году. Она имела диаметр 12 м, и была слишком мала для того, чтобы закинуть ракету в космос – но, по сути, её конструкция была такой же, как предполагает полномасштабная реализация. Длинный рычаг, или привязь, тянется от хорошо смазанного подшипника, который вращает мотор. Полезный груз крепится на конец привязи. Чтобы выдерживать чрезвычайные нагрузки, привязь должна быть сделана из чрезвычайно прочных материалов типа кевлара и углеволокна.

В проекте SpinLaunch ракета будет раскручена до пусковой скорости, а потом на долю секунды раскроется выходное отверстие, и ракета отправится в полёт. Согласно патенту [18], в этот же момент будет отцеплен противовес, вращавшийся напротив ракеты, чтобы центрифуга не разболталась и не сломалась. Ракета далее будет лететь порядка минуты, и на высоте около 61 км запустит двигатель. На такой высоте атмосфера уже практически не будет тормозить ракету. Поэтому для того, чтобы разогнать её до первой космической скорости в 28 476 км/ч, потребуется не больше минуты



Рис. 4. Кольцевая схема запуска Космическая Праща компании SpinLaunch, 2016 г.

работы двигателя. Ещё один 10-секундный запуск двигателя выведет ракету на орбиту вокруг Земли.

Диаметр следующего прототипа составляет 33 метра (**Рис. 4**), а окончательно планируется построить 100-метровую версию.

Компания SpinLaunch сообщила о результатах десятого успешного лётного испытания своей технологии без ракетного запуска космических аппаратов — системы Orbital Launch. 13 октября 2022 г.

В ходе испытания компания запустила полезную нагрузку NASA, после чего её удалось вернуть на Землю, чтобы проанализировать воздействие стрессовых нагрузок на компоненты. В ходе запуска груз поднялся на высоту в 9 км.

При запуске ускорение составило до 10 000 g, а сам «снаряд» разогнался до скорости в 8000 км/час. Как оказалось, элементы полезной нагрузки вполне могут пережить столь экстремальный запуск. Это потенциально позволяет запускать небольшие грузы на орбиту, причём намного дешевле, чем с помощью ракет.

Таким образом, закрытые кольцевые схемы рассматриваются, как реальный подход для эффективных схем запуска космических аппаратов. Но космическая «праща» оперирует пока со скоростями менее первой космической.

Ниже показывается, что идея кольцевой схемы разгона имеет право на существование и для разгона микро- и нано аппаратов до больших скоростей, включая субсветовые.

6.2. КОЛЬЦЕВАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО РАЗГОНА

В развитие проекта «Breakthrough StarShot» целесообразно рассматривать системы вывода, которые обладают достоинствами схемы «BS», но при этом более компактны и оперируют

меньшими значениями пиковой мощности, а именно:

- желательно радикально сократить пространственный масштаб зоны, в которой производится разгон аппарата;
- радикально уменьшить экстремальные требования к мощностным параметрам системы и концентрации мощности для разгона.

Для достижения этих целей предлагается заменить разгонную траекторию в виде линейного участка на разгонную траекторию в виде кольцевой структуры с канализацией лазерного излучения в специальном светонесущем «стволе» и многократным прохождением наноаппаратом разгонного кольца с ускорением в процессе разгона.

В такой схеме можно регулировать ускорение во время разгона, время разгона и уровень мощности излучения, которая используется для разгона. Оценки показывают, что мощность излучения может быть снижена более чем на три порядка по отношению к мощности в проекте Звездный выстрел (~100 ГВт) и составит ~ 100 МВт, при этом время разгона увеличивается на те же три порядка и будет доходить до ~ 1-10 суток. Но это все происходит на контролируемой площади в несколько квадратных километров.

Потребляемая в разгонной кольцевой структуре с мощностью излучения ~100 МВт потребует мощности источников питания в несколько сотен мегаватт. Такая мощность примерно соответствует мощности электросети города с населением 200-500 тыс. человек и не требует гигантской концентрации мощностей в одном месте.

При этом в кольцевой разгонной схеме отсутствуют или резко упрощаются проблемы проекта «Звездный выстрел», связанные с гигантскими ускорениями, чрезвычайно высокой плотностью лазерного излучения на поверхности паруса и другие.

В кольцевой (циклической) схеме, разгон производится в полом световедущем канале (на **Рис. 5** сиреневый цвет), замкнутом в кольцо с радиусом R . В поперечнике разгонный световедущий канал может, например, иметь форму круга диаметром d . Внутренние стенки световедущего канала выполняют две

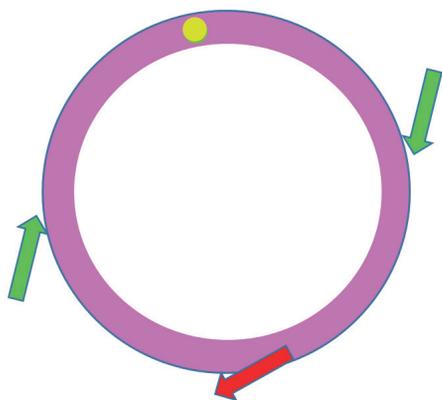


Рис. 5. Кольцевая схема лазерного разгона макробиъектов: 1 – разгонное кольцо; 2 – разгоняемый объект; 3 – лазерное излучение; 4 – вывод объекта из разгонного кольца

функции: направляющую для микро (нано) аппарата и отражающую для лазерного излучения. Поперечный размер световедущего канала (который можно рассматривать как специфический полый световод) многократно превышает длину волны лазерного излучения.

Разгоняемый аппарат имеет размеры, позволяющие ему свободно перемещаться внутри разгонного объема. Поэтому его поперечный размер близок к d .

Аппарат может иметь разную геометрическую форму: шар, цилиндр, скошенный цилиндр и т.д.

Конкретная форма и размеры аппарата определяются условиями его разгона. То же самое относится и к его структуре. В простейших случаях это может быть шар или цилиндр из однородного вещества. И в том, и в другом случае предполагается, что падающее на аппарат излучение отражается, в основном, назад, передавая свой импульс аппарату.

Скошенные плоскости у третьего варианта формы аппарата обеспечивают отражение излучения под некоторым углом к направлению движения и, действующая на наноаппарат, сила частично направлена вдоль кольца, а частично в поперечном направлении, к его центру, что может быть использовано для частичной компенсации возникающей при круговом движении центробежной силы.

Стенки волновода, как и поверхность аппарата, обращенная к падающему излучению, имеют коэффициент отражения близкий к 1.

Рассматривается два варианта реализации системы разгона: а) без рекуперации и б) с рекуперацией (повторным использованием отраженного излучения).

Ввод излучения в кольцо может осуществляться в нескольких точках, в пределе даже непрерывно по всей длине кольца.

Пусть λ – коэффициент рекуперации, т.е. эффективное число раз, которое «срабатывает» падающее излучение. Формально, при использовании рекуперации с коэффициентом λ , энергетическая эффективность системы разгона возрастает в λ .

Процесс разгона осуществляется путем многократного прохождения наноаппаратом кольца под воздействием давления лазерного излучения. Процесс разгона заканчивается отключением источника излучения и последующим выводом аппарата из разгонного кольца.

При этом расположение кольца, расположение узла вывода аппарата из кольца и момент вывода, согласуются таким образом, чтобы направить аппарат в заранее определенном направлении.

7. ВЫВОДЫ ДЛЯ РОССИИ

При всем уважении к Илону Маску, его идея, связанная с колонизацией Марса, не греет мне душу. Она грандиозна, затратна и, наверное, может стать важной вехой при взаимодействии человечества с КОСМОСОМ. Однако идеологически эта идея недалеко ушла от классических воззрений на космические полеты внутри Солнечной системы, которым уже больше века. Она постоянно обсуждается в научной и популярной литературе и стала слишком обыденной, чтобы возбудить эмоции землян до уровня осознания некоторой миссии человечества. Кроме того, даже такие грандиозные и дорогие программы как Марсианский проект И. Маска, с научной точки зрения дадут только точечное представление о Солнечной системе в целом. А для ее тотального исследования требуются совсем другие методы.

Проекты типа «Starshot» с этой точки зрения выглядят как яркие вспышки надежды. Надежды, связанной с возможностью в обозримом будущем пролечь в межзвездное пространство, и

достичь ближайших звезд в итоге этого прорыва. Создать технологии и технические средства, позволяющие изучать солнечную систему на всю глубину и существенно менее затратно, чем с помощью средств классической космонавтики, к тому же с значительно большими скоростями исследования.

Чтобы активировать концентрацию усилий, связанных с проектом StarShot, Ю. Мильнер подготовил и опубликовал воззвание, которое назвал «Манифестом ЭВРИКА» [19].

В этом документе он заявляет, что наша цивилизация нуждается в миссии. Эта миссия, по его мнению, заключается в исследовании и познании нашей Вселенной. Миссия нужна чтобы обеспечить наше выживание, резко улучшить нашу жизнь и построить галактическую цивилизацию. Далее Мильнер отмечает важность и значение настоящего момента и значение направленности искусственного интеллекта для миссии. Основными способами продвижения миссии он считает ускорение Научной революции и зарождение Нового Просвещения. Для реализации этих планов с его точки зрения нужно:

- инвестировать ресурсы в фундаментальные науки и космонавтику;
- позволить искусственному интеллекту способствовать научному прогрессу;
- прославлять ученых как героев;
- ориентировать образование на всеобщую историю и использовать силу искусства, чтобы объяснить ее.

Важно отметить, что проекты рассматриваемого типа, находящиеся на начальном этапе, требуют не гигантских материальных и финансовых затрат, а серьезной концентрации интеллектуальных усилий научно-технического и философско-идеологического сообщества. Относительно невысокие требуемые на первых этапах объемы средств не дают существенного преимущества при реализации такого проекта сверхбогатым экономикам, что позволяет эффективно участвовать в их реализации даже небогатым странам. Значительно более важно для успешной реализации, по меньшей мере, на начальных стадиях является наличие элементов космизма в идеологии общества, наличие исторических успехов в деле

освоения космического пространства, желание и воля постичь КОСМОС. С этим у России все в порядке. В международном плане Проект может быть поддержан соответствующим соглашением между странами БРИКС.

Проблема межзвездных коммуникаций из сферы далеких от воплощения фантастических образов на наших глазах переходит в стадию конкретного комплексного научно-технического проекта и его реализации. Проект глобальный, обладает высоким эмоциональным зарядом и гигантским технологическим, а следовательно, и экономическим потенциалом.

Это шанс для России вырваться из аутсайдера в лидеры научно-технического прогресса.

Вопрос в том, как организовать такой проект. Наверное, форма организации должна принципиально отличаться от тех форм, которые использовались в СССР и РФ при реализации глобальных научно-технических программ, таких как атомный проект или начальная стадия освоения космоса. Скорее, как высокая концентрация усилий государства, так и просто выделение значительных денежных средств, в надежде, что рыночные механизмы сделают свое дело, не сулят успеха. Мало чем может помочь и американский опыт при постановке и реализации космических программ: у нас просто другая технико-экономическая среда, которая определяющим образом формирует путь развития того или иного технологического направления.

Конечно, поддержка и внимание государства нужны, частная инициатива тоже не помешает, но обязательно помноженные на массовость движения и подлинный энтузиазм общества. На старте проекта и его начальной стадии важно создать общественную площадку, на которой можно было бы организовать периодический обмен идеями и результатами в области межзвездных коммуникаций, как между индивидуальными лицами, так и между заинтересованными научно-техническими группами.

В истории нашей страны есть по меньшей мере два примера общественных объединений, которые при поддержке государства, сыграли выдающуюся роль в развитии и освоении

новейших для своего времени направлениях техники. Это Комитет содействия воздушному флоту России, на средства которого в 1909 году были заложены основы военно-воздушного флота, и Осоавиахим, заслуги которого в пропаганде, развитии и продвижении новейшей техники в Советском Союзе трудно переоценить. Их опыт, безусловно будет полезен и может быть использован при организации работ по Проекту.

Звезды зовут. Дорогу осилит идущий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цандер ФА. Перелеты на другие планеты. *Техника и жизнь*, 1924, (13):15-16.
2. Корнеев Л. Разведчик космических дорог. К 75-летию со дня рождения Ф.А. Цандера. *Авиация и космонавтика*, 1962, (8):26-31.
3. Ефремов ИА. *Туманность Андромеды*. М., Молодая гвардия, 1958, 368 с.
4. Бурдаков ВП., Данилов ЮИ. *Ракеты будущего*. М., Атомиздат, 1980, 155 с.
5. Дмитриев АС., Кошелев ВА. *Космические двигатели будущего*. М., Знание, Сер. «Космонавтика, Астрономия», 1982, 3, 64 с.
6. Marx G. Interstellar Vehicle Propelled by Terrestrial Laser Beam. *Nature*, 1966, 211:22-23.
7. Салахутдинов ГМ. *Фридрих Артурович Цандер*. М., Знание, Сер. «Космонавтика, астрономия», 1987, 3, 64 с.
8. Перельман ЯИ. *Занимательный космос. Межпланетные путешествия*. АСТ, 2008, 360 с.
9. Forward R. Roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails. *J. of Spacecraft and Rockets*, 1984, 21:187-195.
10. Breakthrough Initiatives, “Breakthrough Starshot,” 2020, <https://breakthroughinitiatives.org/initiative/3>. Y. Milner. *Breakthrough Starshot*.
11. Finkbeiner A. Near-Light-Speed Mission to Alpha Centauri. A billionaire-funded plan aims to send a probe to another star. But can it be done? *Scientific American*, 2017, 316(3):30-37.
12. Lubin P. A Roadmap to Interstellar Flight. *JBIS*, 2016, 69:40-72.
13. Hughes G, Lubin P, Bible J, Bublitz J, Arriola J, Motta C, Suen J, Johansson I, Riley J, Sarvian N, Wu J, Milich A, Oleson M, Pryor M. DE-STAR: Phased-array laser technology for planetary defense and other scientific purposes. [SPIEDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie](https://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie).
14. Семенов ЮП., Бранец ВН, Григорьев ЮИ, Зеленщиков НИ, Кошелев ВА, Мельников ВМ, Платонов ВН, Севастьянов НН, Сыромятников ВС. Космический эксперимент по развёртыванию плёночного бескаркасного отражателя D = 20 м («Знамя-2»). *Космические исследования*, 1994, 32(4-5):186-193.
15. Bandutunga CP, Sibley PG, Ireland MJ, Ward RL. Photonic solution to phase sensing and control for light-based interstellar propulsion. *J. of the Optical Society of America B*, 2021, 38(5):1477-1486.
16. Верн Ж. *Из пушки на Луну. Вокруг луны*. Эксмо, 2014, 576 с.
17. Murphy CH, Bull GV. A Review of Project HARP. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Wiley Online Library, 1966, 337-357.
18. Yaney J. Circular mass accelerator. *Patent US 10,202,210B2*. Date of Patent: 12 Feb 2019.
19. Milner Yu. *EUREKA MANIFESTO. The Mission for Our Civilization*, 2021, 100 p.

Дмитриев Александр Сергеевич

д.ф.-м.н., проф.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Москва 125009, Россия

E-mail: chaos@cplire.ru.