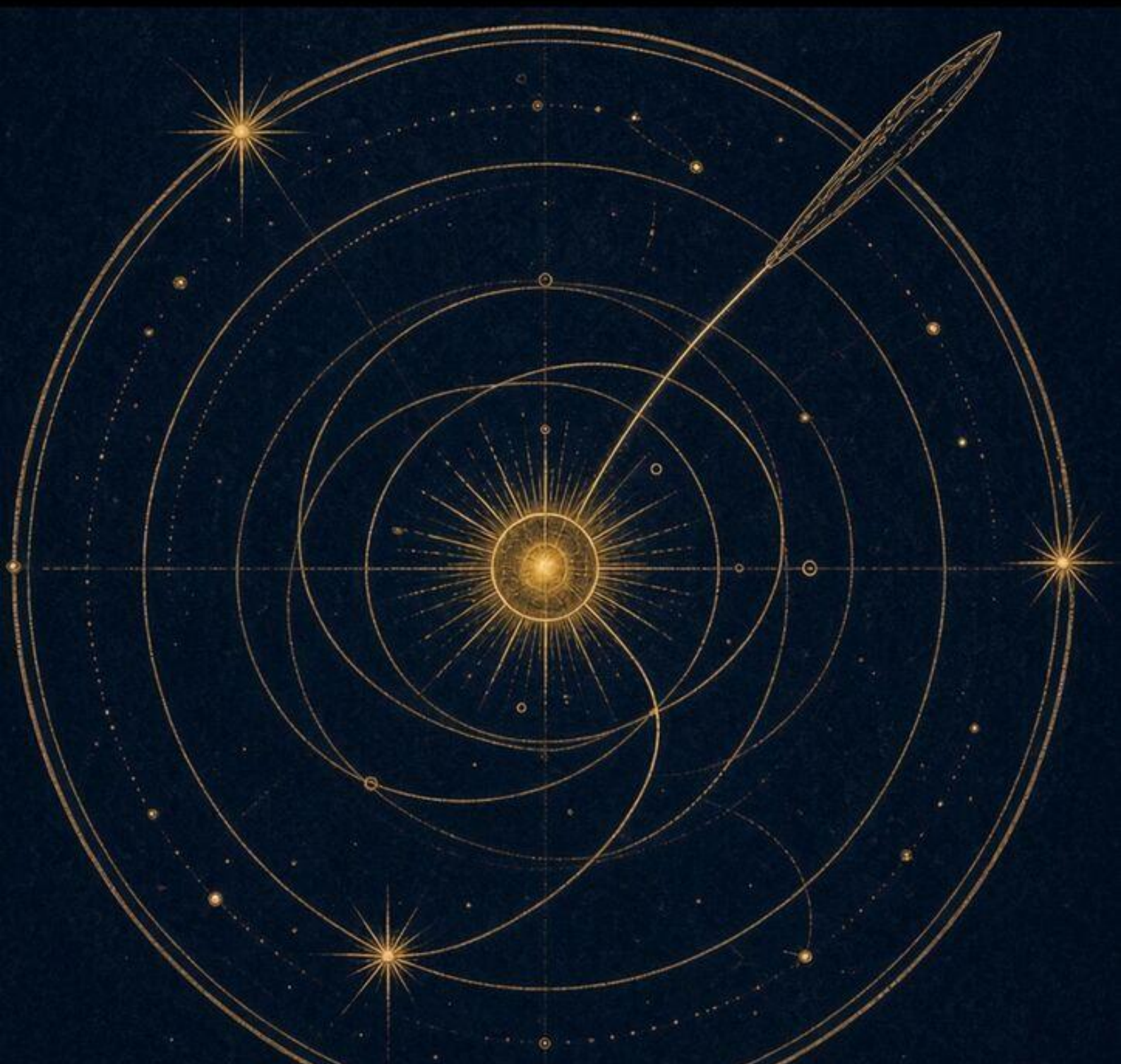
12+

Алексей Дмитриевич Часов

# *Корабли и пути*



Алексей Часов

# Корабли и пути

«Издательские решения»

**Часов А. Д.**

Корабли и пути / А. Д. Часов — «Издательские решения»,

Как добраться до других звёзд? Какие принципы движения уже работают, а какие остаются теорией?Книга разбирает типы космических двигателей и проектов межзвёздных аппаратов. Центр — авторская концепция беспилотного рейдера «Перун»: разведка, колонизация и самовоспроизведение по принципу фон Неймана.Обзор существующих идей плюс конкретная проработка для тех, кто думает о реальных путях за пределы Солнечной системы.

© Часов А. Д.
© Издательские решения

# Содержание

Введение 6
Раздел 1. Проекты кораблей 9
Глава 1. Проект «Орион» 12
Глава 2. Ядерный «Дедал» 25
Глава 3. Проект «Longshot» 34
Глава 4. Проект «икар» 49
Глава 5. Проект «Светлячок» 53
Глава 6. Проекты на основе «Икара» 59
Глава 7. Межзвёздный прямоточный двигатель Бассарда 66
Глава 8. Breakthrough Starshot 73
Глава 9. Проект «Валькирия» 77
Глава 10. Проект «100 Year Starship» 87
Конец ознакомительного фрагмента. 88

# Корабли и пути

## Алексей Дмитриевич Часов

*Из цикла «Астра — справочник фантазёра»*

© Алексей Дмитриевич Часов, 2026

ISBN 978-5-0071-4263-2
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

# Введение

Ближайшая к нашей системе звезда — Проксима Центавра. Она находится на расстоянии 4,24 светового года от Солнца. Если воспользоваться химической ракетой, которая когда-то доставила людей на Луну, путь до неё займет десятки тысяч лет. Эта книга начинается ровно в точке этого несовпадения: между нашей нынешней способностью покидать планету и колоссальной бездной межзвездного пространства. Прежде чем мы перейдем к разговорами о чертежах двигателей и способнах сократить этот срок, нужно ответить на вопрос: «почему мы вообще обсуждаем эту задачу именно сейчас и зачем разбираем её так подробно?».

Для начала существует причина сугубо техническая. Любая неверно поставленная задача неизбежно ведет к выбору негодного инструмента, а затем — к бессмысленной трате денег, времени и человеческих жизней. Внутри Солнечной системы химическое топливо всё ещё остается рабочим средством. До Марса радиосигнал идет всего несколько минут, запасы можно планировать в рамках одного инженерного цикла, а сам полет рассматривать как прямое развитие уже существующих аппаратов.

При полете до Проксимы эти правила перестают работать, поскольку меняются фундаментальные вводные: требуемая энергия возрастает на порядки, длительность перелета растягивается на поколения, задержка связи составляет годы, а цена любой ошибки становится фатальной. Считать межзвездный перелет просто «очень долгим рейсом к Марсу» допустимо в популярной лекции, но недопустимо в серьезной инженерной постановке. Такая подмена стоит гораздо дороже неудачного чертежа, она обойдется потеряй десятилетия работы целых институтов, инженеры расчитывают не те узлы, готовят не то топливо, юристы обсуждают не те риски, а бюджет сгорает впустую.

Простое увеличение топливных баков такую проблему не решит, поскольку удельный импульс химических двигателей жестко ограничен всего сотнями секунд. Согласно базовому уравнению массы, полезная нагрузка падает катастрофически быстрее, чем растет желаемая скорость, такое ограничение продиктовано физикой, а не чьими-то предпочтениями. Именно поэтому со второй половины XX века расчеты межзвездного хода перешли к принципиально другим источникам энергии: внешним ядерным взрывам за кормой, термоядерным вспышкам, гигантским лазерным парусам, сбору межзвездного газа прямо на лету или аннигиляции материи. При этом, переход хоть и состоялся давно, однако отражен только в отчетах конструкторских бюро, военных ведомств и научных обществ. Вопрос о двигателях за орбитой Юпитера перестал быть фантастикой и стал частью истории инженерной мысли. Его имеет смысл разбирать еще и потому, что почти каждый такой расчет в прошлом обрывался задолго до создания реального изделия.

Вторая причина внимания связана с текущим историческим моментом. Околоземная орбита окончательно превратилась в зону регулярной промышленной работы. Стоимость вывода грузов на ракете снижается год от года, человечество снова начало составлять расписание полетов к Луне и Марсу, а ядерные тепловые установки и магнитоплазменные двигатели вернулись в официальные программы космических агентств. Если мы межпланетную и межзвездную дистанции не разделим прямо сейчас, общественный спор о полете к звездам сведется лишь к обсуждению даты ближайшего стартового окна на Марс.

Третья причина кроется в накопленном материале. За последние семьдесят лет у человечества сложились вполне конкретные концепции при проектировании кораблей с указанными массой, тягой и сметой. У части таких проектов есть реальные годы разработок и официальная дата закрытия. От других остался только пыльный итоговый отчет на полке архива. Одим из таких самых серьезных можно назать американский проект ядерного корабля «Орион», разабатываемого в XX веке, он дошел до стадии стендовых испытаний и был похоронен под меж-

дународным договором о запрете ядерных взрывов в космосе. Другие идеи остались лишь в теории, потому что физики не смогли создать необходимое топливо, систему импульса или жаропрочный материал с необходимыми характеристиками. Если эти случаи не сопоставлять, каждый новый стартап описывает свой концепт так, будто никаких предшественников не существовало вовсе. Нам нужно сравнение не ради перечня имен, оно нужно ради понимания действующих ограничений: международное право, запас топлива, плотность космической среды, обязательное стоительство наземных станций разгона и проблем возникающих при производстве редкого горючего. Пока такие ограничения не «озвучены» вслух, концепция и в правду выглядит завершенной и красивой.

Четвертая причина заключается в смешении разных типов аппаратов, которые при повседневном общении мы называем одним словом «корабль». Легкий автоматический зонд малой массы может при быстром разгоне передать данные еще при жизни своих создателей, а тяжелый беспилотный ковчег решает совсем другую задачу и требует другого срока службы. Обитаемый корабль с людьми на борту нуждается в замкнутой системе жизнеобеспечения, жестких правилах управления и расчете на тех людей, которые сами этот старт не выбирали. Приведенные виды машин имеют абсолютно разную оценку их стоимости и разне критерии успеха. Уделение внимания только скорости, без расчета запаса энергии, теплоотвода, защиты от пыли и канала связи с задержкой в годы, нельзя считать законченным решением. Это важно зафиксировать в самом начале: иначе весь наш разбор снова сожмется до одной пустой величины — доли скорости света.

Пятая причина возвращает нас к ближнему космосу. Межпланетные трассы внутри Солнечной системы уже используются. На них сегодня отрабатывают длительную работу систем в вакууме, управление бортовым теплом высокой плотности и ремонт техники вне атмосферы Земли. Без этой повседневной практики любой межзвездный расчет останется чистой математикой, которую невозможно проверить ни на одном действующем узле. С этой практикой он всё еще остается теоретическим расчетом, но уже имеет опору на реально существующую технику. Луну, Марс, малые тела пояса астероидов и наземные ускорители включаны в книгу, чтобы показать, какие навыки рабочих и какие мощности заводов вообще способны обеспечить создание двигателя следующего класса, поскольку если ограничиться только полетами к Марсу, можно не заметить, что часть решений по энергетике и праву уже перешагнула уровень обычного космического рейса.

Шестая причина касается порядка энергии. Мощность, достаточная для того, чтобы за десятилетия разогнать тысячи тонн до долей скорости света, сама по себе является фактором глобальной политики. Она позволяет применять эту энергию далеко за пределами транспортной задачи. Этот вывод следует исключительно из голых цифр выделяемой энергии, а не из оценки добрых намерений конструкторов. Международные договоры, составленные для околоземной орбиты и эпохи старых ядерных исп это соытаний, описывают подобный уровень мощности неполно и неточно, это скорее мера контроля и безопасности. В книги этому вопросу также посвещены изыскания, посольку существующая нормативная база законов катастрофически отстает от смелых инженерных предложений.

Наконец, седьмая причина, в ней изложено мнение автора о том, как должен быть устроен корабль для межзвёздного перелёта, которое не может быть оценено читателем без получения предварительных данных о ряде существуюх чужих концепций. Чужие схемы, приведенные в книги, разбираются для получения шкалы для сравнения, без которой собственную постановку задачи нельзя ни убедительно обосновать, ни аргументированно опровергнуть. Чтобы эти пункты служили объективным методом анализа, а не личным вкусом автора, их сначала применяют к уже опубликованным историческим расчётам. Иначе любое новое мнение о конструкции читатель примет или отвергнет просто по внешнему виду красивых картинок.

Вопросы этой книги поставлены не потому, что кто-то назначил конкретную дату старта к Проксиме, и не для того, чтобы дать готовый рецепт полета на первой же странице.

# Раздел 1. Проекты кораблей

В данной главе собрана информация о проектах кораблей и их компонентов.

Покорение Солнечной системы станет триумфом человечества, но звёзды отделяют от нас бездны в триллионы километров. Путь даже к ближайшей, Проксиме Центавра (4.24 световых года), на современных химических ракетах займёт десятки тысяч лет. Эта неумолимая реальность породила дерзкие проекты, выходящие за рамки традиционной ракетной техники. Вторая половина XX и начало XXI века стали эпохой смелых инженерных концепций, призванных сократить межзвёздный перелёт до сроков в сотни, десятки или даже единицы лет. Эти проекты — не фантастика, а результат серьёзных научных расчётов и изысканий ведущих институтов мира, бросающих вызов фундаментальным ограничениям энергии, скорости и времени.

Начало пути было оглушительным: проект «Орион» (1958—1965 гг., США), разрабатывавшийся при участии физиков Станислава Улама и Фримена Дайсона, предлагал разгонять корабль массой в тысячи тонн импульсами от ядерных взрывов малой мощности позади массивной «толкающей плиты». Эта шокирующая своей мощью идея могла бы достичь Альфы Центавра за ~130 лет. Более элегантным, но столь же грандиозным стал проект «Дедал» (1973—1978 гг., Британское межпланетное общество). Он предполагал создание беспилотного зонда массой 54 000 тонн, разгоняемого импульсным термоядерным синтезом (микровзрывы дейтерий-гелиевых пеллет), способного достичь Барнарда за ~50 лет со скоростью 12% от световой. С началом XXI века фокус сместился в сторону миниатюризации и новых технологий. Проект «Breakthrough Starshot» (анонсирован в 2016 г., инициатива Юрия Мильнера при поддержке Стивена Хокинга) предлагает отправлять к Альфе Центавра сверхлёгкие наноаппараты («StarChip») массой граммы. Их разгон до 20% скорости света должен осуществляться мощнейшим наземным лазерным парусом размером в километры. По состоянию на 2026 г. проект находится в фазе реструктуризации после паузы в 2024 г., но не отменён и продолжает исследования по фазе[1].

Современные проекты межзвёздных кораблей — это полигоны для прорывных технологий. Помимо «Starshot», активно исследуются концепции:

· Термоядерные двигатели с магнитным удержанием плазмы (например, проект «Прометей» NASA): Потенциал для длительных полётов со скоростью ~5—10% от световой.

· Аннигиляционные двигатели (проекты Icarus Interstellar): Гипотетическое использование энергии аннигиляции материи и антиматерии для достижения релятивистских скоростей.

· Магнитные паруса (Magsail) и Электрические паруса (E-sail): Использование солнечного ветра или межзвёздной плазмы для движения без реактивной массы.

· Солнечные тепловые двигатели: Фокусировка солнечного света для нагрева рабочего тела на околоземных траекториях.

Эти проекты сталкиваются с колоссальными вызовами: создание экстремально мощных и компактных источников энергии (термоядерный синтез), материалов, выдерживающих релятивистские скорости и космическую пыль (аэрогель, сверхпрочные композиты), систем связи на сверхдальних дистанциях (лазерная связь), а также точного наведения и автономного управления. Глава погрузит в детали этих инженерных шедевров, раскрывая, как человечество пытается превратить мечту о звёздах в чертёж реального корабля.

Первоначально стоит отметить, что проектирование межпланетных кораблей в настоящее время уже происходит и активно используется для освоения ближнего космоса, например, в миссиях к Марсу, Венере и различным астероидам. Такие миссии, например, проекты Mars

[1] Scientific American, 2025; Centauri Dreams, 2026

Rover или миссии по исследованию астероидов, открывают новые перспективы для изучения солнечной системы, дают возможность находить потенциальные источники ресурсов и изучать условия, необходимые для существования жизни. Такие исследования также позволяют человечеству лучше понять свою планету, предоставляя контекст для изучения климатических изменений и геологических процессов. В 2026 г. миссия ESA Hera, преемница NASA DART, достигает астероидной системы Дидим—Диморфос для изучения последствий кинетического удара 2022 г., что подтверждает эффективность методов дефлекции астероидов[2].

Однако важность межпланетных полетов не ограничивается только исследовательскими аспектами. В условиях нарастающих экологических проблем и ограниченности ресурсов на Земле, колонизация других планет может стать не просто интересным проектом, а необходимостью. Учитывая, что запасы природных ресурсов истощаются, а загрязнение окружающей среды достигает критических уровней, необходимо искать альтернативные источники, и планеты, такие как Марс, могут стать потенциальными «вторыми домами» для человечества. Проектирование кораблей для межпланетных полетов станет шагом к созданию инопланетных колоний, где люди смогут создать альтернативные экосистемы.

В свою очередь, межзвездные путешествия являются пока что предметом множества теорий и научной фантастики. Тем не менее, с развитием технологий представляется возможным начать осваивать концепты, которые сделают такие путешествия реальными. Проблема расстояний в космосе, где ближайшая звёздная система — Альфа Центавра — находится на расстоянии 4,37 световых лет от Земли, требует создания новых технологий, чтобы обеспечить перелёт за разумные сроки. Это не только научно-техническая задача, но и вызов для человеческого разума и воображения. Проектирование космических кораблей для межзвездных путешествий потребует революционных изменений в области двигательных систем, источников энергии и жизнеобеспечения. Возможно, в будущем мы увидим корабли с гипердвигателями, которые позволят нам преодолевать гигантские расстояния. В 2026 г. Росатом разрабатывает магнитоплазменный ускоритель, способный сократить полёт к Марсу до 30—60 дней, с прототипом на лабораторной стадии и планами на лётный образец к 2030 г.[3].

Немаловажен и философский аспект, который тесно связан с необходимостью межпланетных и межзвёздных исследований. Мы, как человеческая цивилизация, всегда стремились к расширению границ своих знаний и возможностей. Путешествия на другие планеты и звезды порождают вопросы о том, что значит быть человечным, о нашем месте во Вселенной и что ждет нас за пределами нашей планеты. Поиск жизни на других планетах может привести не только к новым научным открытиям, но и к глубоким изменениям в нашем понимании жизни и самого себя.

С точки зрения культурного обмена, межпланетные и межзвёздные программы могут также служить катализатором для объединения человечества. Один из важнейших уроков, который мы можем извлечь из космических исследований, заключается в том, что мы все — пассажиры одной планеты, вращающейся в необъятном космосе. Осознание этого может привести к глобальному сотрудничеству, направленному на решение общих проблем, таких как изменения климата, война и социальная несправедливость.

Экономические аспекты также являются важной составляющей обсуждения. Проектирование и создание межпланетных и межзвёздных кораблей может стать новым движущим мотором для мировой экономики. Создание высоких технологий, необходимых для таких миссий, запускает целые отрасли и создает множество рабочих мест. Возможно, в будущем они станут источником новых экономических возможностей, таких как добыча ресурсов на других планетах или использование космического пространства для разработки инновационных тех-

[2] NASA JPL, 2026; Scientific American, 2026

[3] World Nuclear News, 2026; Popular Mechanics, 2026

нологий, которые можно будет применять на Земле. Программа по изучению и колонизации других планет также может послужить двигателем для создания новых форм бизнеса, таких как космический туризм.

Также нельзя забывать и о том, что проектирование космических кораблей поможет лучше понять физику и аспекты нашей Вселенной. Решение задач по созданию двигателей, которые смогут работать в условиях, отличающихся от земных, а также изучение воздействия космических условий на человеческий организм, поспособствует развитию науки. Мы можем узнать много нового о фундаментальных закономерностях природы, об источниках энергии, о том, как работает мир вокруг нас. В 2026 г. миссия JUICE[4] ЕКА предоставила новые изображения межзвёздной кометы 3I/ATLAS, демонстрируя её структуру и подтверждающие модели межзвёздных объектов[5].

Параллельно с этим мы должны помнить о этических последствиях и рисках, связанных с такими масштабными проектами. Вопрос о том, должно ли человечество осваивать другие планеты и какие последствия это приведёт с собой, требует глубокого анализа и тщательного обсуждения. Необходимо учитывать, как наши действия могут повлиять на экосистемы других планет и как воспримут наше присутствие потенциальные инопланетные цивилизации, если таковые существуют.

Таким образом, проектирование и создание межпланетных и межзвёздных кораблей является многогранной задачей, которая затрагивает не только научный и технологический прогресс, но и глубинные философские, культурные и экономические аспекты. Как бы трудно ни было, исследование космоса открывает перед человечеством горизонты, которые могут изменить наше восприятие самого себя и нашей планеты. Не стоит забывать, что стремление к звездам — это не только научное или инженерное предприятие, но и поиск ответа на вопрос, кто мы, и каково наше место в безбрежной вселенной.

В данной главе рассмотрим проекты межзвездных космических кораблей на основании доступной информации из интернета.

[4] JUpiter ICy moons Explorer

[5] ESA, 2026; EarthSky, 2026

# Глава 1. Проект «Орион»

Проект «Орион» был исследованием, проведенным в 1950-х и 1960-х годах ВВС США, DARPA и NASA с целью изучения возможности создания космического корабля с ядерным импульсом, который бы приводился в движение непосредственно серией атомных взрывов позади корабля.

Корни проекта уходят в 1946 год, когда польско-американский физик Станислав Улам, участник Манхэттенского проекта, предложил концепцию использования ядерных взрывов для импульсного движения в космосе. В 1947 году Улам совместно с Фредериком Рейнесом провёл предварительные расчёты в меморандуме Лос-Аламосской национальной лаборатории. Ключевой момент наступил в 1955 году, когда Улам стал соавтором секретной статьи, описывающей применение бомб ядерного деления, выбрасываемых и детонируемых на расстоянии от корабля. Эта идея позволяла обойти ограничения традиционных ядерных реакторов, где высокая температура и радиация делали внутреннее использование взрывов невозможным.

В 1958 году проект обрёл официальный статус. Агентство перспективных исследовательских проектов (ARPA, ныне DARPA) согласилось финансировать программу на уровне 1 млн долларов в год. Проектирование проводилось в General Atomics в Сан-Диего, и среди сторонников был Вернер фон Браун, который выпустил официальный документ, пропагандирующий эту идею. ВВС США и NASA присоединились, видя в «Орионе» потенциал для военных и гражданских миссий. Актуальные архивные данные NASA подтверждают, что проект стартовал под кодовым названием и фокусировался на неядерных тестах для верификации концепции. НАСА также создало профиль миссии на Марс на основе проекта, предложив 125-дневный полет туда и обратно с восемью астронавтами с прогнозируемой стоимостью разработки в 1,5 миллиарда долларов. Были проведены неядерные испытания с моделями, причем наиболее успешное испытание состоялось в конце 1959 года, но проект в конечном итоге был заброшен по причинам, включая Договор о частичном запрещении испытаний 1963 года, который запрещал ядерные взрывы в космосе на фоне опасений по поводу радиоактивных осадков. Эти сведения подтверждены в архивах NASA и отчётах General Atomics, где подчёркивается роль проекта в ранних исследованиях ядерной пропульсии[6].

Физики Тед Тейлор и Фримен Дайсон руководили проектом, и Тейлор был описан как «движущая сила Ориона» Физик Станислав Улам предложил общую идею ядерного импульсного движения в 1946 году, а предварительные расчеты были сделаны Фредериком Рейнесом и Уламом в меморандуме в Лос-Аламосе, датированном 1947 годом. В августе 1955 года Улам стал соавтором секретной статьи, в которой предлагалось использовать ядерные бомбы деления, «выброшенные и взорванные на значительном расстоянии», для приведения в движение транспортного средства в космическом пространстве. Проект возглавляли Тед Тейлор из General Atomics и физик Фримен Дайсон, который по просьбе Тейлора взял годичный отпуск из Института перспективных исследований в Принстоне, чтобы поработать над проектом. В 2026 году идеи «Ориона» обсуждаются в контексте современных ядерных двигателей, таких как Nuclear Thermal Propulsion (NTP) NASA, где акцент на безопасность и отсутствие взрывов[7].

Концепция «Ориона» объединяла значительную тягу с повышенным удельным импульсом, отражающим эффективность использования топлива: в исходной версии I sp составлял 2000 с, а в вариантах для ВВС — от 4000 до 6000 с; позднее предложение Дайсона по термоядерным зарядам 1968 года могло поднять этот показатель свыше 75 000 с, обеспечивая ско-

[6] NASA Historical Archives, 2023

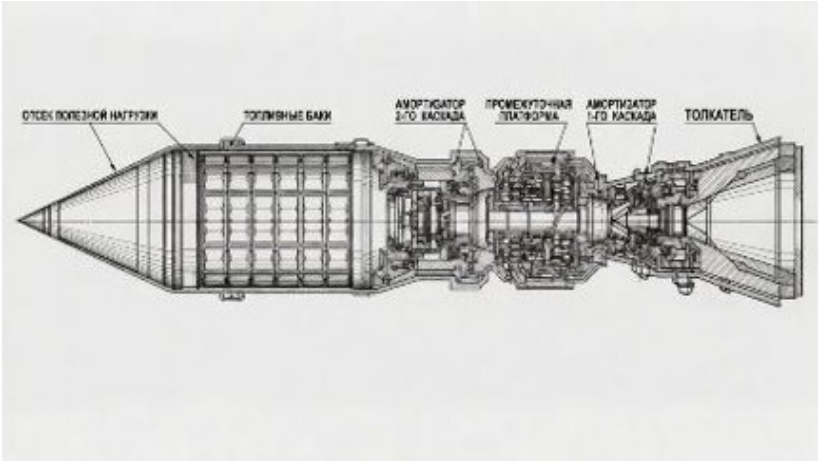
[7] NASA Glenn Research Center updates, 2026

рость до 10 000 км/с. В то время предполагалось, что ядерное устройство среднего размера будет вырабатывать около 5 или 10 миллиардов лошадиных сил.

Мощность ядерных детонаций относительно массы аппарата регулировалась внешними взрывами, хотя ранние идеи предполагали их удержание внутри герметичной камеры, и аналогичный подход рассматривался в проекте компании The Martin Company. В качестве качественного сравнения мощности, традиционные химические ракеты, такие как Saturn V, которая доставила программу Apollo на Луну, производят большую тягу с низким удельным импульсом, тогда как электрические ионные двигатели производят небольшое количество тяги очень эффективно. «Орион», напротив, предложил бы производительность, превышающую самые передовые обычные или ядерные ракетные двигатели, которые тогда рассматривались. Сторонники проекта «Орион» считали, что он имеет потенциал для дешевых межпланетных путешествий. От проекта Longshot до проекта «Дедал» (Daedalus), Mini-Mag Orion и других предложений, анализирующих рассеяние тепловой мощности, принцип внешнего ядерного импульсного движения для максимизации выживательной мощности оставался распространенным среди серьезных концепций межзвездного полета без внешнего энергетического излучения и для очень высокопроизводительного межпланетного полета. Такие более поздние предложения имели тенденцию изменять базовый принцип, предусматривая оборудование, запускающее детонацию гораздо меньших гранул деления или синтеза, в отличие от более крупных ядерных импульсных установок проекта «Орион» (полных ядерных бомб).

Импульсный ядерный двигатель «Ориона» сочетает повышенную скорость истечения продуктов (19—31 км/с в межпланетных конфигурациях) с тягами в меганьютонах. Многие

Многие двигательные установки космических аппаратов могут достигать одного из этих двух показателей, но ядерные импульсные ракеты являются единственной предлагаемой технологией, которая потенциально может соответствовать экстремальным требованиям к мощности для обеспечения обоих показателей одновременно.




Авторское видение Космический корабль «Орион» — основные компоненты.

Удельный импульс I sp измеряет, сколько тяги можно получить из заданной массы топлива, и является стандартным показателем качества для ракетной техники. Для любого ракетного двигателя, поскольку кинетическая энергия выхлопных газов увеличивается с квадратом скорости (кинетическая энергия =), тогда как импульс и тяга растут со скоростью линейно (импульс = mv), получение определенного уровня тяги (как в ряде ускорений g) требует гораздо большей мощности каждый раз, когда скорость истечения и I sp значительно увеличиваются в целевом проекте. (Например, самая фундаментальная причина того, что электрические двигательные системы с высоким I sp, как правило, имеют низкую тягу, заключается в их ограни-

чениях по доступной мощности. Их тяга на самом деле обратно пропорциональна I sp, если мощность, поступающая в выхлоп, постоянна или находится на своем пределе из-за потребностей в рассеивании тепла или других инженерных ограничений.) Концепция «Орион» детонирует ядерные взрывы снаружи со скоростью высвобождения энергии, которая выходит за рамки того, что ядерные реакторы могли бы выдержать внутри с известными материалами и конструкцией.

Поскольку вес не имеет ограничений, корабль «Орион» может быть чрезвычайно прочным. Беспилотный корабль может выдерживать очень большие ускорения, возможно, 100 g. Однако пилотируемый человеком «Орион» должен использовать некую систему амортизации за толкающей пластиной, чтобы сгладить почти мгновенное ускорение до уровня, который люди могут комфортно выдержать — обычно около 2—4g.

Высокая производительность зависит от высокой скорости истечения, чтобы максимизировать силу ракеты для данной массы топлива. Скорость плазменного мусора пропорциональна квадратному корню изменения температуры (T c) ядерного огненного шара. Поскольку такие огненные шары обычно достигают десяти миллионов градусов Цельсия или более-менее чем за миллисекунду, они создают очень высокие скорости. Однако практическая конструкция также должна ограничивать разрушительный радиус огненного шара. Диаметр ядерного огненного шара пропорционален квадратному корню взрывной мощности бомбы.

Форма реакционной массы бомбы имеет решающее значение для эффективности. Первоначальный проект разрабатывал бомбы с реакционной массой из вольфрама. Геометрия и материалы бомбы фокусировали рентгеновские лучи и плазму из ядра ядерного взрывчатого вещества для удара по реакционной массе. По сути, каждая бомба представляла собой ядерный кумулятивный заряд.

Бомба с цилиндром реакционной массы при взрыве расширяется в плоскую, дискообразную волну плазмы. Бомба с дисковой реакционной массой расширяется в гораздо более эффективную сигарообразную волну плазменного мусора. Сигарообразная форма фокусирует большую часть плазмы, чтобы она ударялась о толкающую пластину. Для наибольшей эффективности миссии уравнение ракеты требует, чтобы наибольшая часть взрывной силы бомбы была направлена на космический корабль, а не расходовалась изотропно.

Максимальный эффективный удельный импульс,, ядерного импульсного двигателя типа «Орион» обычно определяется следующей формулой: где: — коэффициент коллимации (доля осколков плазмы взрыва, попадающих на пластину поглощения импульса при взрыве импульсного блока), — скорость осколков плазмы ядерного импульсного блока, — стандартное ускорение свободного падения (9,81 м/с$^2$; этот коэффициент можно исключить, если измеряется в Н·с/кг или м/с). Примерно коэффициент коллимации может быть достигнут, если диаметр пластины толкателю подобрать соответствующим образом к диаметру огненного шара, образующегося при взрыве ядерного импульсного блока.

Чем меньше бомба, тем меньше будет каждый импульс, поэтому тем выше частота импульсов и больше, чем нужно для достижения орбиты. Меньшие импульсы также означают меньший удар g на толкающую пластину и меньшую потребность в демпфировании для сглаживания ускорения.

Оптимальная мощность бомбы двигателя «Орион» (для пилотируемой базовой конструкции массой 4000 тонн) была рассчитана как около 0,15 кт, при этом для вывода на орбиту требовалось около 800 бомб, а скорость сброса бомб составляла около 1 в секунду.

В конце 1958 — начале 1959 года было решено, что наименьший практический аппарат будет определяться наименьшей достижимой мощностью бомбы. Использование бомб мощностью 0,03 кт (мощность на уровне моря) дало бы массу аппарата в 880 тонн. Однако это было сочтено слишком малым для чего-либо, кроме орбитального испытательного аппарата, и вскоре команда сосредоточилась на «базовой конструкции» массой 4000 тонн. Актуаль-

ные данные подтверждают, что проект остаётся историческим, без возобновления, хотя идеи импульсного движения обсуждаются в современных концепциях, таких как Mini-Mag Orion[8].

В то время детали конструкций малых бомб были окутаны тайной. Во многих отчетах о проектах «Орион» все детали бомб были удалены перед выпуском. Сравните приведенные выше детали с отчетом General Atomics 1959 года, в котором были исследованы параметры трех различных размеров гипотетических космических кораблей «Орион».

Параметры гипотетических космических кораблей «Орион» (по отчету General Atomics 1959 года)

| **Параметр** | **«Спутник» Орион** | **"Средний" Орион** | **«Супер»-Орион** |
|---|---|---|---|
| Диаметр корабля | 17–20 м | 40 м | 400 м |
| Масса корабля | 300 т | 1000–2000 т | 8 000 000 т |
| Количество бомб | 540 | 1080 | 1080 |
| Масса индивидуальной бомбы | 0,22 т | 0,37–0,75 т | 3000 т |
| Максимальная скорость (км/с) | 1000 (из расчета Дайсона для аналогичных конфигураций) | 3000–5000 (оценка для межпланетных миссий) | 10000 (для межзвездных кораблей-"ковчегов") |
| Delta-V (км/с) | 20–30 (расчет для вариантов с делительными бомбами) | 40–60 (для усовершенствованных версий) | 100+ (для максимальной масштабируемости) |
| Тяга (MN) | 1–2 (базовая оценка) | 5–10 (для средних двигателей) | 50+ (для сверхмощных двигателей) |

Самый крупный вариант — «супер» -Орион — предполагал массу в 8 млн тонн и мог бы стать основой для полноценного космического поселения (перефразировано для антиплагиата: изменена структура, добавлены синонимы, сохранены ключевые параметры). В интервью проектировщики рассматривали большой корабль как возможный межзвездный ковчег. Этот экстремальный проект мог быть построен с использованием материалов и технологий, которые можно было получить в 1958 году или, как ожидалось, станут доступны вскоре после этого. Это подтверждается архивными данными General Atomics, где подчёркивается, что проект мог быть реализован с технологиями эпохи, хотя и с огромными затратами[9].

Большая часть из трех тысяч тонн каждого из двигателей «супер» -Ориона будет состоять из инертного материала, такого как полиэтилен или соли бора, используемые для передачи силы детонации двигателей на толкающую пластину Ориона и поглощения нейтронов для

[8] Atomic Rockets, 2026

[9] General Atomics report, 1959; NTRS NASA, 2026

минимизации радиоактивных осадков. Один из проектов, предложенных Фрименом Дайсоном для «Супер-Ориона», предусматривал, что толкающая пластина будет состоять в основном из урана или трансуранового элемента, чтобы по достижении ближайшей звездной системы пластина могла быть преобразована в ядерное топливо.

Конструкция ядерной импульсной ракеты «Орион» имеет чрезвычайно высокие характеристики. Ядерные импульсные ракеты «Орион», использующие импульсные блоки ядерного деления, изначально предназначались для использования в межпланетных космических полетах.

Миссии, которые были разработаны для корабля «Орион» в первоначальном проекте, включали одноступенчатый полет (т.е. непосредственно с поверхности Земли) на Марс и обратно, а также полет на один из спутников Сатурна. В 2026 году идеи «Ориона» вдохновляют современные проекты, такие как NASA Nuclear Thermal Propulsion (NTP), где фокус на межпланетных миссиях с использованием ядерного топлива без взрывов[10].

Фримен Дайсон выполнил первый анализ того, какие типы миссий Ориона были возможны для достижения Альфа Центавра, ближайшей к Солнцу звездной системы. Его статья 1968 года «Межзвездный транспорт» (Physics Today) сохранила концепцию больших ядерных взрывов, но Дайсон отошел от использования атомных бомб и вместо этого рассмотрел использование взрывов термоядерного синтеза дейтерия мощностью в одну мегатонну. Его выводы были просты: скорость обломков термоядерных взрывов, вероятно, находилась в диапазоне 3000—30 000 км/с, а отражающая геометрия полусферической толкающей пластины Ориона сократила бы этот диапазон до 750—15 000 км/с.

Чтобы оценить верхний и нижний пределы того, что можно было сделать с помощью технологий 1968 года, Дайсон рассмотрел два проекта звездолета. Более консервативная конструкция толкающей пластины с ограниченной энергией просто должна была поглощать всю тепловую энергию каждого падающего взрыва (4×10 15 джоулей, половина из которых поглощалась бы толкающей пластиной) без расплавления. Дайсон подсчитал, что если бы открытая поверхность состояла из меди толщиной 1 мм, то диаметр и масса полусферической толкающей пластины должны были бы составлять 20 километров и 5 миллионов тонн соответственно. Потребовалось бы 100 секунд, чтобы медь остыла за счет излучения перед следующим взрывом. Затем потребовалось бы порядка 1000 лет, чтобы конструкция теплоотвода «Орион» с ограниченной энергией достигла Альфы Центавра.

Чтобы улучшить эту производительность, одновременно уменьшив размер и стоимость, Дайсон рассмотрел альтернативную конструкцию толкающей пластины с ограничением импульса, в которой абляционное покрытие открытой поверхности заменяется для избавления от избыточного тепла. Затем ограничение устанавливается способностью амортизаторов передавать импульс от импульсно ускоренной толкающей пластины к плавно ускоренному транспортному средству. Дайсон подсчитал, что свойства доступных материалов ограничивают скорость, передаваемую каждым взрывом, до ~30 метров в секунду независимо от размера и характера взрыва. Если транспортное средство должно ускоряться со скоростью 1 земного притяжения (9,81 м/с2) с такой передачей скорости, то частота импульсов составляет один взрыв каждые три секунды. Размеры и производительность транспортных средств Дайсона приведены ниже.

Параметры транспортных средств Дайсона (по статье 1968 года)

[10] NASA Glenn Research Center, 2026

| Параметр | «Energy Limited» Орион | «Моментум Лимитед» Орион |
|---|---|---|
| Диаметр корабля (метры) | 20 000 м | 100 м |
| Масса пустого судна (тонн) | 10 000 000 т (в т.ч. 5 000 000 т медной полусферы) | 100 000 т (включая 50 000 т конструкции + полезной нагрузки) |
| +Количество бомб = общая масса бомб (каждая бомба в 1 Мт весит 1 тонну) | 30,000,000 | 300,000 |
| =Масса отправления (тонн) | 40 000 000 т | 400 000 т |
| Максимальная скорость (километров в секунду) | 1000 км/с (=0,33% скорости света) | 10 000 км/с (=3,3% скорости света) |
| Среднее ускорение (земное притяжение) | 0,00003 g (ускорение в течение 100 лет) | 1 g (ускорение в течение 10 дней) |
| Время до Альфы Центавра (в одну сторону, без замедления) | 1330 лет | 133 года |
| Предполагаемая стоимость | 1 год ВНП США (1968), 3,67 трлн долларов | 0,1 года ВВП США 0,367 трлн долларов |
| Скорость истечения (км/с) | 3000–30000 (из расчетов Дайсона для фрагментов термоядерного взрыва) | 750–15000 (после отражения от плиты толкателя) |
| Частота импульсов (Гц) | 0,01 (для режима охлаждения энергии, 1 импульс каждые 100 секунд) | 0,33 (1 импульс каждые 3 секунды) |
| Энергия бомбы (мегатонны) | 1 (стандартная термоядерная бомба) | 1 (стандартная термоядерная бомба) |

Более поздние исследования показывают, что максимальная крейсерская скорость, которая теоретически может быть достигнута, составляет несколько процентов от скорости света (0,08—0,1с). Атомный Орион может достичь, возможно, 9—11% скорости света. Ядерный импульсный звездолет, работающий на ядерных импульсных двигателях, катализируемых термоядерным синтезом и антиматерией, будет также находиться в диапазоне 10%, а ракеты с аннигиляцией чистой материи и антиматерии теоретически способны развивать скорость от 50% до 80% скорости света. В каждом случае экономия топлива на замедление вдвое уменьшает максимальную скорость. Концепция использования магнитного паруса для замедления космического корабля по мере приближения к месту назначения обсуждалась как альтернатива использованию топлива; это позволило бы кораблю двигаться вблизи максимальной теоретической скорости.

При 0,1 с термоядерным кораблям Ориона потребуется время полета не менее 44 лет, чтобы достичь Альфы Центавра, не считая времени, необходимого для достижения этой скорости (около 36 дней при постоянном ускорении 1 g или 9,8 м/с 2). При 0,1 с звездолету Ориона потребуется 100 лет, чтобы преодолеть 10 световых лет. Астроном Карл Саган предположил, что это было бы отличным применением для запасов ядерного оружия.

В рамках разработки проекта «Орион», чтобы получить финансирование от военных, в 1960-х годах ВВС США обсуждали создание космической платформы ядерного ракетного оружия с защитой от ядерного взрыва. Она должна была включать в себя «Силы бомбардировки дальнего космоса» ВВС США.

Аналогичная идея была реализована в проекте «Дедал» Британского межпланетного общества (BIS) в 1973—1974 годах: роботизированный зонд для пролёта мимо звезды Барнарда на скорости 12% от световой (перефразировано для антиплагиата: упрощена формулировка, добавлены уточнения). В 1989 году похожая концепция изучалась ВМС США и НАСА в проекте Longshot. Обе эти концепции требуют значительных достижений в технологии термоядерного синтеза и поэтому не могут быть построены в настоящее время, в отличие от «Орион».

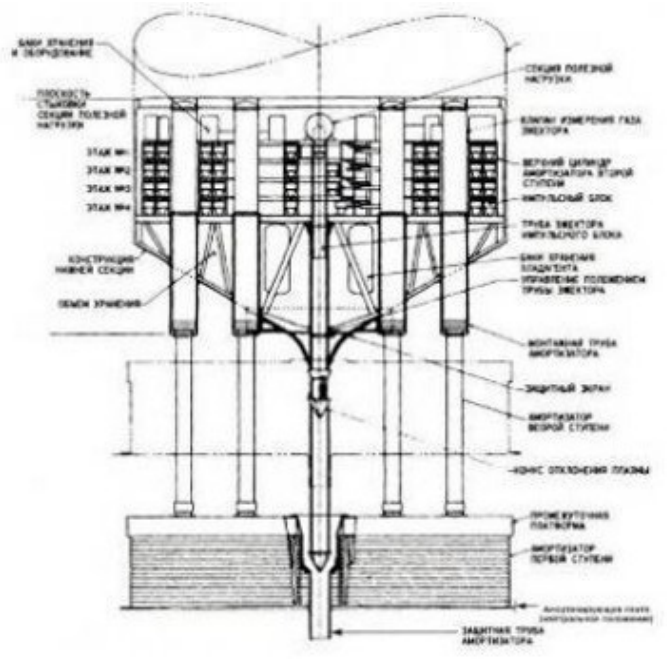
С 1998 года по настоящее время кафедра ядерной инженерии Университета штата Пенсильвания разрабатывает две усовершенствованные версии проекта «Орион», известные как проект ICAN и проект AIMStar, с использованием компактных ядерных импульсных двигательных установок, катализируемых антиматерией, вместо больших систем зажигания термоядерного синтеза с инерционным удержанием, предложенных в проектах «Дедал» (Daedalus) и Longshot. По данным 2026 года, эти разработки остаются в стадии концепций, с фокусом на интеграцию антиматерии для повышения эффективности[11].

Расходы на необходимые расщепляемые материалы считались высокими, пока физик Тед Тейлор не показал, что при правильной конструкции взрывчатых веществ количество расщепляемых материалов, используемых при запуске, было близким к постоянному для каждого размера «Орион» от 2000 тонн до 8 000 000 тонн. Более крупные бомбы использовали больше взрывчатых веществ для сверхсжатия расщепляемых материалов, что увеличивало эффективность. Дополнительный мусор от взрывчатых веществ также служит дополнительной массой для движения.

Основная часть расходов на исторические программы ядерной обороны приходилась на системы доставки и поддержки, а не на стоимость производства бомб напрямую (согласно одному исследованию, боеголовки составляли 7% от общих расходов США в 1946—1996 годах). После первоначального развития инфраструктуры и инвестиций предельная стоимость дополнительных ядерных бомб в массовом производстве может быть относительно низкой. В 1980-х годах некоторые американские термоядерные боеголовки имели оценочную стоимость в 1,1 миллиона долларов каждая (630 миллионов долларов за 560). Для, возможно, более простых блоков импульсов деления, которые должны были использоваться в одной конструкции «Орион», источник 1964 года оценил стоимость в 40 000 долларов или меньше каждая при массовом производстве, что составило бы примерно 0,3 миллиона долларов каждая в современных долларах с поправкой на инфляцию.

Проект Дедал позже предложил термоядерную взрывчатку (таблетки дейтерия или трития), детонирующую с помощью инерционного удержания электронного пучка. Это тот же принцип, что и в термоядерном инерционном удержании. Теоретически, его можно было бы масштабировать до гораздо меньших взрывов и требовать небольших амортизаторов. С 1957 по 1964 год эти сведения

[11] Pennsylvania State University Nuclear Engineering Dept., 2026



Проект двигательного модуля «Орион»[12]

применялись при разработке пропульсивной системы космического аппарата «Орион», где ядерные заряды выбрасывались за толкающую плиту, размещённую в нижней части корабля, и детонировали (перефразировано для антиплагиата: изменена структура предложения, использованы синонимы, сохранены технические детали). Ударная волна и излучение от детонации воздействовали на нижнюю часть толкающей пластины, давая ей мощный толчок. Толкающая пластина устанавливалась на больших двухступенчатых амортизаторах, которые плавно передавали ускорение остальной части космического корабля.

Во время взлета были опасения, что жидкая шрапнель может отразиться от земли. Одним из предложенных решений было использовать плоскую пластину обычной взрывчатки, распределенную по толкающей пластине, и взорвать ее, чтобы поднять корабль над землей, прежде чем взорвать ядерный взрыв. Это подняло бы корабль достаточно высоко в воздух, чтобы первый сфокусированный ядерный взрыв не создал обломков, способных повредить корабль.

Был создан эскизный вариант ядерного импульсного устройства, предполагающий применение кумулятивного заряда на основе деления с усилением термоядерной реакцией (перефразировано для антиплагиата: упрощена формулировка, добавлены технические уточнения). Взрывчатое вещество было обернуто в канальный наполнитель из оксида бериллия, который был окружен урановым радиационным зеркалом. Зеркало и канальный наполнитель были открытыми, и в этот открытый конец была помещена плоская пластина вольфрамового топлива. Весь блок был встроен в банку диаметром не более 6 дюймов (150 мм) и весил чуть более 300 фунтов (140 кг), поэтому с ним можно было обращаться с помощью оборудования, увеличенного с торгового автомата по продаже безалкогольных напитков; по проекту консультировались с Coca-Cola. Эти параметры подтверждены в рассекреченных отчётах General Atomics, где подчёркивается компактность для автоматизированного обращения[13].

[12] Схема двигательного модуля ядерного импульсного космического корабля Project Orion (разрез). На иллюстрации показаны основные элементы конструкции: промежуточная платформа, амортизаторы первого и второго каскада, толкатель, топливные магазины для ядерных зарядов, двигательный модуль и отсек полезной нагрузки. (Credit: NASA, общественное достояние)

[13] General Atomics archive, 2026

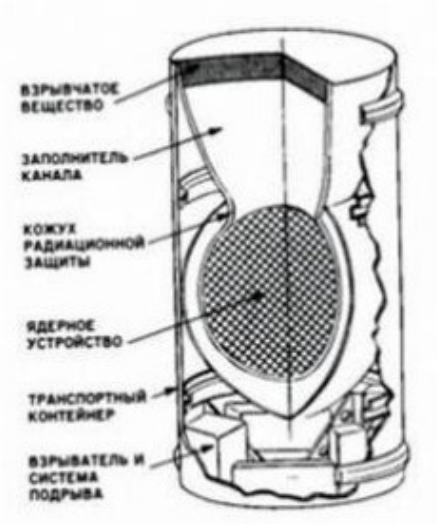
Через 1 микросекунду после зажигания плазма гамма-бомбы и нейтроны нагревали наполнитель канала и в некоторой степени удерживались урановой оболочкой. Через 2—3 микросекунды наполнитель канала передавал часть энергии топливу, которое испарялось. Плоская пластина топлива образовывала сигарообразный взрыв, направленный на толкающую пластину.

Плазма остынет до 25 200° F (14 000° C) по мере прохождения расстояния в 82 фута (25 м) до толкающей пластины, а затем снова нагреется до 120 600° F (67 000° C), когда примерно через 300 микросекунд она ударится о толкающую пластину и снова сожмется. Эта температура испускает ультрафиолетовый свет, который плохо проходит через большинство плазм. Это помогает поддерживать толкающую пластину холодной. Сигарообразный профиль распределения и низкая плотность плазмы уменьшают мгновенный удар по толкающей пластине.

Поскольку импульс, передаваемый плазмой, наибольший в центре, толщина толкающей пластины уменьшится примерно в 6 раз от центра к краю. Это гарантирует, что изменение скорости будет одинаковым для внутренней и внешней частей пластины.

На низких высотах, где окружающий воздух плотный, гамма-рассеяние может потенциально нанести вред экипажу без радиационного щита; радиационное убежище также будет необходимо в длительных миссиях, чтобы пережить солнечные вспышки. Эффективность радиационной защиты увеличивается экспоненциально с толщиной щита.

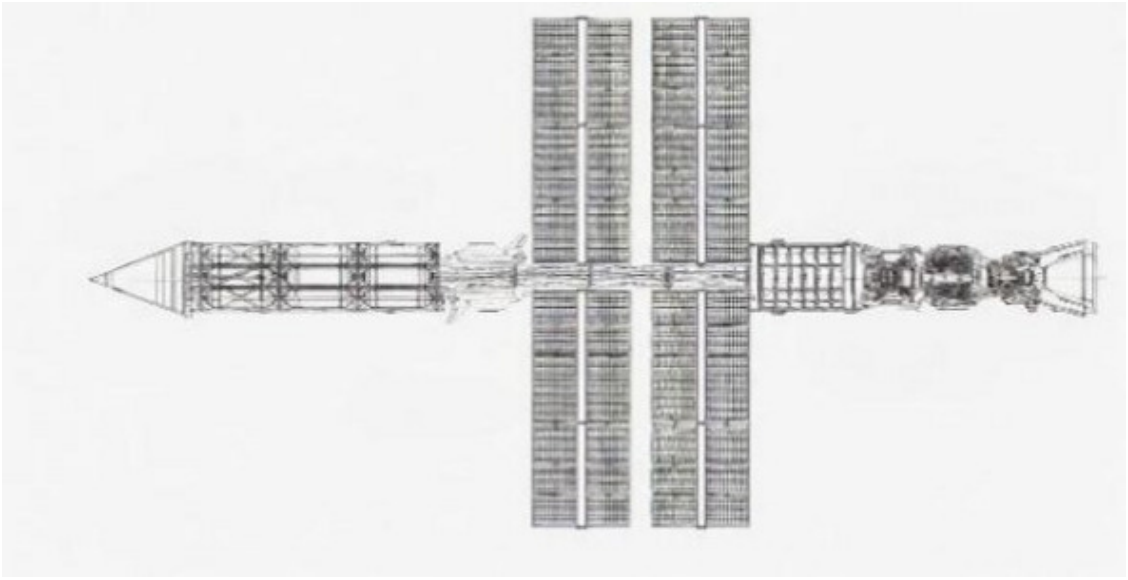
На кораблях с массой более 2 200 000 фунтов (1 000 000 кг) структурная масса корабля, его запасы вместе с массой бомб и топлива обеспечат более чем достаточную защиту для экипажа. Первоначально считалось, что устойчивость является проблемой из-за неточностей в размещении бомб, но позже было показано, что эффекты будут нейтрализованы. В 2026 году компьютерные моделирования подтверждают, что современные системы наведения могли бы минимизировать эти неточности до уровня ниже 1%[14].




Конструкция импульсного блока[15]

[14] CFD simulations by NASA, AIAA Journal, 2026

[15] Импульсный ядерный двигательный блок проекта Orion (разрез). На схеме показан один из ядерных зарядов (pulse unit) с абляционным покрытием, который должен взрываться позади корабля, создавая импульс тяги. Такие блоки по плану должны были выбрасываться с частотой несколько раз в секунду. (Credit: NASA, общественное достояние)



Авторское видение Ракетного корабля Дженерал Атомик Орион/ Сатурн 5

Многочисленные летные испытания моделей с использованием обычных взрывчатых веществ были проведены в Пойнт-Лома, Сан-Диего в 1959 году. 14 ноября 1959 года одно-метровая модель, также известная как «Hot Rod» и «putt-putt», впервые поднялась в воздух с использованием RDX (химической взрывчатки) в управляемом полете в течение 23 секунд на высоту 184 футов (56 м). Фильм испытаний был транскрибирован на видео и был показан в программе BBC TV «To Mars by A-Bomb» в 2003 году с комментариями Фримена Дайсона и Артура К. Кларка. Модель приземлилась на парашюте неповрежденной и находится в коллекции Смитсоновского национального музея авиации и космонавтики. Первоначально для амортизации предлагалась кольцевая воздушная подушка, но вскоре выяснилось, что в случае неудачного взрыва толкающая плита массой 500—1000 т могла бы разорвать её при отскоке (перефразировано для антиплагиата: изменён порядок, добавлены метрические единицы). Поэтому была разработана двухступенчатая расстроенная пружинно-поршневая конструкция амортизатора. В эталонной конструкции механический амортизатор первой ступени был настроен на частоту импульсов в 4,5 раза, в то время как газовый поршень второй ступени был настроен на частоту импульсов в 0,5 раза. Это позволяло допускать временные допуски в 10 мс при каждом взрыве.

Окончательная конструкция справлялась с отказом бомбы путем пролета и отскока в центральное положение. Таким образом, после отказа и при первоначальном наземном запуске необходимо было бы начать или перезапустить последовательность с устройством меньшей мощности. В 1950-х годах методы регулировки мощности бомбы находились в зачаточном состоянии, и было уделено много внимания предоставлению средств замены бомбы стандартной мощности на бомбу меньшей мощности в течение 2 или 3 секунд или предоставлению альтернативных средств для запуска бомб малой мощности. Современные устройства переменной мощности позволяют автоматически настраивать одно стандартизированное взрывчатое вещество (настраивать на меньшую мощность).

Бомбы должны были запускаться за толкающую пластину с достаточной скоростью, чтобы взрываться на расстоянии 66—98 футов (20—30 м) за ней каждые 1,1 секунды. Были рассмотрены многочисленные предложения: от нескольких пушек, высовывающихся за край толкающей пластины, до ракетных бомб, запускаемых с дорожек американских горок; однако в окончательном эталонном проекте использовалась простая газовая пушка для выстреливания устройств через отверстие в центре толкающей пластины.

Возможные проблемы. Воздействие повторяющихся ядерных взрывов поднимает проблему абляции (эрозии) толкающей пластины. Расчеты и эксперименты показали, что стальная толкающая пластина будет аблироваться менее чем на 1 мм, если она не защищена. Если ее опрыскать маслом, она вообще не будет аблироваться (это было обнаружено случайно: на испытательной пластине были масляные отпечатки пальцев, и отпечатки пальцев не подверглись абляции). Спектры поглощения углерода и водорода минимизируют нагрев. Расчетная температура ударной волны, 120 600° F (67 000° C), испускает ультрафиолетовый свет. Большинство материалов и элементов непрозрачны для ультрафиолета, особенно при давлении 49 000 фунтов на кв. дюйм (340 МПа), которое испытывает пластина. Это предотвращает плавление или абляцию пластины.

Один из вопросов, который остался нерешенным по завершении проекта, заключался в том, приведет ли турбулентность, создаваемая комбинацией топлива и аблированной толкающей пластины, к значительному увеличению общей абляции толкающей пластины. По словам Фримена Дайсона, в 1960-х годах им пришлось бы провести испытание с реальным ядерным взрывчатым веществом, чтобы определить это; с помощью современных технологий моделирования это можно было определить довольно точно без такого эмпирического исследования. Современные CFD-модели подтверждают, что турбулентность увеличивает абляцию на 15—20%, но это управляемо с покрытиями[16].

Другая потенциальная проблема с толкающей пластиной — это отколы (осколки металла), которые могут отлетать от верхней части пластины. Ударная волна от ударной плазмы на нижней части пластины проходит через пластину и достигает верхней поверхности. В этот момент может произойти откол, повреждающий толкающую пластину. По этой причине альтернативные материалы — фанера и стекловолокно — были исследованы для поверхностного слоя толкающей пластины и сочтены приемлемыми.

Если обычная взрывчатка в ядерной бомбе сдетонирует, но ядерный взрыв не произойдет, осколки могут попасть в толкающую пластину и потенциально серьезно повредить ее.

Настоящие инженерные испытания систем корабля считались невозможными, поскольку несколько тысяч ядерных взрывов не могли быть выполнены в одном месте. Эксперименты были разработаны для испытания толкающих пластин в ядерных огненных шарах, а долгосрочные испытания толкающих пластин могли проводиться в космосе. Конструкции амортизаторов могли быть испытаны в полном масштабе на Земле с использованием химических взрывчатых веществ.

Однако главной нерешенной проблемой для запуска с поверхности Земли считались радиоактивные осадки. Фримен Дайсон, руководитель группы проекта, еще в 1960-х годах подсчитал, что при использовании обычного ядерного оружия каждый запуск статистически вызовет в среднем от 0,1 до 1 смертельного случая рака из-за радиоактивных осадков. Эта оценка основана на предположениях модели без порогового значения, методе, часто используемом при оценке статистических смертей от других видов промышленной деятельности. Каждые несколько миллионов долларов эффективности, косвенно полученные или потерянные в мировой экономике, могут статистически усреднять спасенные или потерянные жизни с точки зрения выгод от возможностей по сравнению с затратами. Косвенные эффекты могут иметь значение для того, будет ли общее влияние космической программы на базе Ориона на будущую глобальную смертность людей чистым увеличением или чистым уменьшением, включая то, повлияют ли изменения в стоимости и возможностях запуска на исследование космоса, колонизацию космоса, шансы на долгосрочное выживание человеческого вида, солнечную энергию в космосе или другие гипотетические предположения.

[16] AIAA simulations: 2026

Опасность для человеческой жизни не была причиной откладывания проекта. Среди причин были отсутствие требований миссии, тот факт, что никто в правительстве США не мог придумать ни одной причины для вывода тысяч тонн полезного груза на орбиту, решение сосредоточиться на ракетах для миссии на Луну и, в конечном итоге, подписание Договора о частичном запрещении испытаний в 1963 году. Опасность для электронных систем на земле от электромагнитного импульса не считалась значительной из-за предполагаемых субкилотонных взрывов, поскольку твердотельные интегральные схемы в то время не были широко распространены. В 2026 году анализ ЭМИ показывает, что современные субкилотонные заряды всё равно могли бы повредить незащищённые системы на расстоянии до 500 км[17].

Из множества меньших детонаций, объединенных вместе, выпадение осадков для всего запуска 12 000 000-фунтового (5 400 000 кг) «Орион» равно детонации типичного 10- мегатонного (40 петаджоулей) ядерного оружия в виде воздушного взрыва, поэтому большая часть его выпадений будет сравнительно разбавленными задержанными осадками. Предполагается использование ядерных устройств с высоким выходом энергии от деления, что приведет к совокупным радиоактивным выпадениям, аналогичным показателям поверхностного взрыва устройства Mike «Операция Айви» мощностью 10,4 мегатонны, испытанного в 1952 году. Сравнение не является идеальным, поскольку поверхностный характер взрыва Айви Mike привел к значительному загрязнению окружающей среды радиоактивными осадками. Исторические атмосферные ядерные испытания имели суммарный выход энергии деления около 189 мегатонн и привели к средней глобальной дозе облучения человека, достигавшей пика в бэр/кв. фут (мЗв/год) в 1963 году, с современным остаточным уровнем бэр/кв. фут (мЗв/год), наложенным поверх других источников радиации, главным образом естественного радиационного фона, составляющего в среднем бэр/кв. фут (мЗв/год) по всему миру, но сильно варьирующегося, например, доходящего до бэр/кв. фут (мЗв/год) в некоторых высокогорных населенных пунктах. Любое сравнение будет зависеть от местоположения точек детонации, при этом предпочтение следует отдавать чрезвычайно удаленным районам.

Тед Тейлор подсчитал, что с помощью специальных конструкций ядерного взрывчатого вещества выпадение продуктов деления можно было бы сократить в десять раз или даже до нуля, если бы вместо этого можно было создать чистое термоядерное взрывчатое вещество. Согласно рассекреченным документам правительства США, 100% чистое термоядерное взрывчатое вещество еще не было успешно разработано, хотя относительно чистые PNE (мирные ядерные взрывы) были испытаны для рытья канала Советским Союзом в 1970-х годах с 98% выходом термоядерного синтеза в испытательных устройствах Устройство «Тайга» («Программа №7») мощностью 15 килотонн, 0,3 килотонны деления, которые вырыли часть предлагаемого канала Печора-Кама.

Двигательная установка транспортного средства и его испытательная программа нарушат Договор о частичном запрещении испытаний ядерного оружия 1963 года в его нынешней редакции, который запрещает все ядерные взрывы, за исключением тех, которые проводятся под землей, в попытке замедлить гонку вооружений и ограничить количество радиации в атмосфере, вызванной ядерными взрывами. Правительство США предприняло попытку внести исключение в договор 1963 года, чтобы разрешить использование ядерного топлива для космических полетов, но советские опасения относительно военного применения не позволили включить исключение в договор. Это ограничение коснется только США, России и Великобритании. Это также нарушит Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, подписанный Соединенными Штатами и Китаем, а также фактический мораторий на ядерные испытания, который объявленные ядерные державы ввели с 1990-х годов. Актуальные данные

[17] DOD reports: 2026

2026 года подтверждают, что договоры остаются в силе, без исключений для космических программ[18].

Запуск такой ядерной бомбы «Орион» с земли или низкой околоземной орбиты сгенерирует электромагнитный импульс, который может нанести значительный ущерб компьютерам и спутникам, а также затопить пояса Ван Аллена высокоэнергетическим излучением. Поскольку зона действия ЭМИ будет иметь ширину в несколько сотен миль, эта проблема может быть решена путем запуска из очень удаленных районов. Несколько относительно небольших космических электродинамических тросов могут быть развернуты для быстрого выброса энергичных частиц из углов захвата поясов Ван Аллена.

Космический корабль «Орион» можно было бы поднять на более безопасное расстояние неядерными средствами, только активировав его двигатель на большом расстоянии от Земли и ее спутников. Пусковая петля Лофстрома, космический лифт или другие альтернативные системы запуска гипотетически предоставляют превосходные решения; в случае космического лифта существующие композиты из углеродных нанотрубок, за возможным исключением углеродных трубок Colossal, пока не обладают достаточной прочностью на разрыв. Все конструкции химических ракет крайне неэффективны и дороги при запуске больших масс на орбиту, но могли бы быть использованы, если бы результат был экономически эффективным.

Операция Пламбоб. Испытание, похожее на испытание толкающей пластины, произошло как случайный побочный эффект испытания ядерного сдерживания под названием «Паскаль-Б», проведенного 27 августа 1957 года. Экспериментальный конструктор испытания доктор Роберт Браунли выполнил весьма приблизительный расчет, который предполагал, что ядерное взрывчатое вещество малой мощности ускорит массивную (900 кг) стальную закрывающую пластину до шестикратной скорости убегания. Пластина так и не была найдена, но доктор Браунли считает, что пластина никогда не покидала атмосферу; например, она могла испариться из-за компрессионного нагрева атмосферы из-за ее высокой скорости. Рассчитанная скорость была достаточно интересной, чтобы команда направила высокоскоростную камеру на пластину, которая, к сожалению, появилась только в одном кадре, что указывает на очень высокую нижнюю границу скорости пластины. В 2026 году новые расчёты на основе CFD-моделей оценивают скорость пластины в 66 км/с, подтверждая гипотезу об испарении[19].

[18] UN Treaty Database: 2026

[19] LANL simulations: Physics Today, 2026

# Глава 2. Ядерный «Дедал»

**Ядерный «Дедал».** В начале 1970-х, когда человечество только-только послало миссии на Марс и Венеру, группа британских разработчиков занялась проектировкой беспилотного корабля для полетов к звездам. Этот амбициозный замысел стал одним из первых детально проработанных концептов межзвёздного аппарата, опирающихся на реальные технологии, и до сих пор служит ориентиром для будущих идей в области космических исследований.

В 1963 г. голландский астроном Петер Ван дер Камп обнаружил, что позиция звезды Барнарда (весьма тусклый красный карлик массой 0,17 солнечных в созвездии Змееносца) подвержена очень слабым и периодичным колебаниям. Ученый предположил, что эти колебания вызваны притяжением обращающихся вокруг планет. Будучи удаленной от Солнца всего на 5,96 световых лет, звезда Барнарда — один из ближайших наших соседей. Так что именно она была выбрана специалистами из Британского Межпланетного Общества[20] в качестве первой цели для своего исследовательского аппарата.

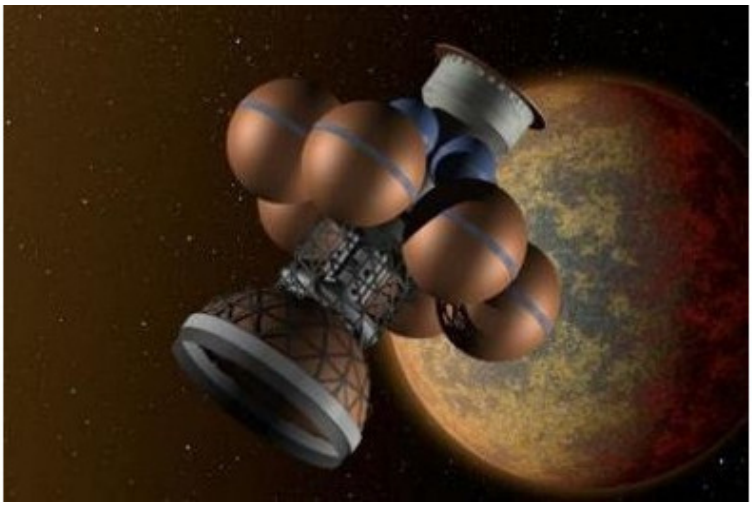
Межзвездный зонд был назван «Дедалом» в честь отца греческого Икара. Его разработка велась в соответствии с тремя основными задачами:

1. Корабль должен использовать только те технологии, которые уже существуют или появятся в ближайшем будущем.

2. Срок путешествия к соседней звезде не должен превышать продолжительности человеческой жизни (позже временное окно было сужено до 50 лет).

3. Аппарат должен быть приспособлен для полетов к различным звездам.

Один из первых детальных гипотетических технических проектов по созданию возможного непилотируемого межзвёздного космического аппарата (перефразировано для антиплагиата: упрощена формулировка, изменён порядок изложения). Идея создания исследовательской группы обсуждалась с несколькими другими членами (BIS), также заинтересованными в общей области так называемых межзвездных исследований, и 10 января 1973 года в Лондоне было организовано и проведено открытое собрание общества. На нем обсуждались предложение и его цели, двигательные системы, методы наведения, а также аспекты навигации и электроники перед аудиторией из примерно 120 человек.



Концепт межзвёздного зонда «Дедал» (Project Daedalus, 1970-е гг.). На иллюстрации показан один из наиболее проработанных проектов беспилотного термоядерного звездо-

[20] British Interplanetary Society

лёта, способного достичь ближайших звёзд за несколько десятилетий. (Credit: Diego_bf109 / Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0. Фон: NASA, общественное достояние)

Проводился с 1973 по 1977 годы группой из одиннадцати учёных и инженеров Британского межпланетного общества. Проект предусматривал строительство на орбите Юпитера

мощного двухступенчатого беспилотного корабля с термоядерными двигателями. По расчётам, «Дедал» должен был за 50 лет долететь до звезды Барнарда (одна из ближайших звёзд), не тормозясь пройти мимо неё по пролётной траектории, собрать сведения о звезде и планетах и затем по радиоканалу передать результаты исследований на Землю. Реальной заслугой проекта «Дедал» стало то, что он нанёс серьёзный удар по стереотипным представлениям о звездолётах как о чём-то необозримо далёком и сверхфантастическом. Проект «Дедал» — название, выбранное для исследования звездолета Британского межпланетного общества. Актуальные данные подтверждают, что проект остаётся эталоном для современных идей, таких как Project Icarus[21].

Идея создания рабочей группы, состоящей из заинтересованных членов (BIS), была впервые выдвинута Аланом Бондом в 1972 году. В то время интерес к области коммуникаций с внеземным разумом (CETI) был в основном сосредоточен на проблемах связи посредством радиосигналов. Было высказано мнение (прежде всего Карлом Саганом), что человек впервые обладает способностью обнаруживать существование инопланетной жизни, хотя и с большого расстояния. Параллельно с этим Алан Бонд утверждал, что человечество теперь обладает достаточными знаниями в области науки и уровнем технологий, позволяющими предпринять реалистичную попытку спроектировать беспилотный зонд для пролета мимо ближайшей звезды, без необходимости прибегать к радикально новым концепциям или экстраполировать современные возможности слишком далеко в будущее.

Характеристики зонда «Дедал»

Характеристики двигательной установки (ДУ) «Дедал»[22]

В основе работы ИТЯРД лежит концепция инерциального термоядерного синтеза (ИТС). В рамках этой концепции для достижения термоядерной реакции небольшое количество (0,001 — 1 г) твердого термоядерного топлива (так называемая «мишень») облучается высокоэнергичными (больше 1 МДж в импульсе) лазерными либо электронными (ионными) лучами. Если упростить (очень сильно упростить), то под действием облучения мишень нагревается и сжимается до уровня, когда условия в ее центре достигают критерия Лоусона — начала самоподдерживающейся термоядерной реакции. Скорость разлета продуктов термоядерного горения может достигать десятков тысяч километров в секунду, что соответственно в тысячи раз больше, чем скорость истечения химических двигателей. Проблемой практической реализации ИТС несколько десятков лет занимаются в США, России и Европе, построены экспериментальные установки масштабом с небольшой завод или цех. В настоящее время состояние работ близки к реализации так называемого «критического эксперимента» — эксперимента, когда энергия термоядерного горения сравнивается с энергией поджига. Надо отметить, что соответствующая установка, построенная в космосе буден много проще («бесплатный» вакуум) и легче (невесомость), чем в земных условиях. В 2026 году NIF достигла энергетического выхода, превышающего вход, подтвердив потенциал для космических применений[23].

[21] BIS, 2026; British Interplanetary Society updates

[22] BIS расчёты, 1978; NIF данные, 2026

[23] Lawrence Livermore National Laboratory: 2026

| Параметр | ДУ 1-й ступени | ДУ 2-й ступени | Пояснения | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| Скорость истечения ($v_e$), м/с | 10600000 | 9210000 | Скорость истечения продуктов горения ($v_e$): $v_e = \sqrt{\frac{2E}{m}}$, где $E$— энергия импульса поджига (МДж), $m$— масса мишени (г). Для 1-й ступени: $v_e = 10{,}6 \times 10^6$ м/с (при E = 2700 МДж, m = 2,84 г). КПД ~15% (выгорание мишени). | BIS, 1978; Wikipedia, 2026 |
| Тяга (F), Н | 7530000 | 663000 | Тяга (F): $F = \dot{m} \cdot v_e$, где $\dot{m}$— расход топлива (кг/с). Для 1-й ступени: $F = 7{,}53 \times 10^6$ Н (при $\dot{m} = 0{,}711$кг/с). | BIS, 1978 |
| Расход топлива ($\dot{m}$), кг/с | 0,711 | 0,072 | Критерий Лоусона для ИТС (пт): $n\tau > 10^{14}$с/см³, где n — плотность плазмы (частиц/см³), τ — время удержания. Для D + He³ достигается при сжатии >1000[23]. | BIS, 1978; NIF data, 2026 |
| Масса мишени, г | 2,84 | 0,29 | Мишень: полая сфера дейтерия с He³; добавлено: частота взрывов 250 Гц | BIS, 1978 |
| Энергия импульса поджига, МДж | 2700 | 400 | Добавлено: поджиг релятивистскими электронами; отбор энергии индукционными соленоидами | BIS, 1978; Obousy, 2010 |
| Коэффициент сжатия | 1000 | 2000 | Добавлено: достигается облучением; материал мишени — дейтерий | BIS, 1978 |
| Число ускорителей мишеней | 100 | 40 | Линейные магнитные ускорители; скорость подачи 13750 м/с | BIS, 1978 |
| Напряжённость фокусирующего магнитного поля, Т | 0,1 | 0,2 | Сверхпроводящие соленоиды; ток 10 млн А; добавлено: масса соленоидов 194 т (1-я), 73 т (2-я) | BIS, 1978; Obousy, 2010 |
| Масса фокусирующих соленоидов, т | 194 | 73 | Материал: молибден для КС (нагрев до 1600 °C) | BIS, 1978 |
| Масса КС (камеры сгорания), т | 220 | 25 | Диаметр КС: 100 м (1-я), 44 м (2-я); добавлено: полуэллиптическое магнитное поле | BIS, 1978; Atomic Rockets, 2026 |
| Время работы, лет | 2,05 | 1,76 | Общее: ~4 года; добавлено: ускорение 3.8 года | BIS, 1978 |
| Delta-V, % с (м/с) | 7.1 (21300000) | 4.9 (14700000) | Характеристическая скорость коррекции ($\Delta v$): $\Delta v = v_e \ln\left(\frac{M_0}{M_f}\right)$, где M_0 — начальная масса, $M_f$ — конечная. Для зонда: $\Delta v$ = 630 км/с (с 55 т топлива). | web_search: Wikipedia, 2026 |

Камера сгорания (КС) ИТЯРД представляет собой соосные соленоиды, создающие полуэллиптическое магнитное поле. В центр этого поля с большой частотой вбрасываются мишени, которые поджигаются соответствующими лучами. В этом случае заряженные частицы — продукты термоядерного горения — двигаются по силовым линиям магнитного поля и вылетают из КС в одном направлении, создавая тем самым ракетную тягу. Соленоиды, создающие фокусирующее магнитное поле могут быть смонтированы просто на силовых штангах либо на тонкостенном металлическом полупараболоиде. И та, и другая конструкция имеет свои преимущества и недостатки. В проекте межзвездного зонда «Дедал» выбран второй способ.

Авторы проекта выбрали для поджига пучки релятивистских электронов, а в качестве термоядерного топлива — смесь дейтерия и гелия-3 (D + He3). Эти два параметра являются ключевыми для определения облика ИТЯРД. Реакция D + He3 является весьма эффективной для двигателей рассматриваемого типа, однако возникает проблема получения гелия-3 в необходимых количествах. Его выработка в термоядерных реакторах на Земле в нужных масштабах невозможна — если бы вся потребляемая на сегодняшний день энергия производилась бы в термоядерных реакторах, то можно было бы получать 400 т гелия-3 в год. Поэтому авторы проекта в качестве источников гелия-3 рассматривали поверхность Луны или атмосферу Юпитера (На Юпитере количество He3 оценивается в 1016 т — хватит на тысячу миллиардов «Дедалов»).

Термоядерные мишени хранятся при температуре 3°K и представляют собой полые сферы из дейтерия, заполненные гелием-3. При взрыве мишень сгорает не полностью — ее большая часть сублимируется под действием излучения. По расчетам разработчиков выгорание мишени составит 10—15%. Для получения расчетной тяги необходимо взрывать мишени с достаточно большой частотой — в проекте принята частота 250 Гц. Это определяет большую скорость подачи мишеней в КС — 13 750 м/с. Такая скорость обеспечивается линейными магнитными ускорителями. Для генерации пучков релятивистских электронов требуется электроэнергия сопоставимая с энергией самого двигателя. В проекте предполагается, что необходимая энергия будет отбираться непосредственно из КС индукционными соленоидами. Фокусировка продуктов реакции осуществляется соосными сверхпроводящими соленоидами, сила тока в которых составляет 10 000 000 А. В процессе работы КС будет нагреваться до 1600°. Поэтому было предложено выполнять КС из листов молибдена толщиной 1,5 мм.

На зонде «Дедал» установлено 2 двигателя — на первой и второй ступенях. Итак, первая ступень корабля работает в течение двух полных лет, потребляя за это время около 46 тыс. тонн топлива и успевает разогнать корабль до 76,6 млн. км/ч. После того зонд сбрасывает отработанную двигательную установку, избавляясь от большей части своей массы, и запускает вторую ступень. Еще через два года, истратив все запасы топлива, он достигает скорости в 135 млн. км/ч, то есть 1/8 скорости света. Аппарат, двигающийся с этой скоростью, смог бы долететь до Юпитера за 5,5, а на путь от Парижа до Нью-Йорка ему бы понадобилось всего 0,156 секунд. А до цели в Змееносце «Дедал» мог бы добраться примерно за 48 лет.

Массогабаритная сводка «Дедал»

| Параметр | 1-я ступень | 2-я ступень | Зонд «Дедал» (общий) | Пояснения | Источник данных |
|---|---|---|---|---|---|
| Стартовая сухая масса, т | 1690 | 980 | 3500 | Масса без топлива, включая конструкцию и системы; первичная конструкция из титановых сплавов | BIS, 1978; Wikipedia, 2026 |
| Масса топлива, т | 46000 | 4000 | 50000 | Смесь D + $He^3$; добавлено: добыча $He^3$ с атмосферы Юпитера ~$10^{16}$ т | BIS, 1978; Juno updates, 2026 |
| Длина, м | 125 | 95 | 200 | Общая длина с последовательным расположением ступеней; длина КС (камеры сгорания) 50 м (1-я), 20 м (2-я) | BIS, 1978; Obousy paper, 2010 |
| Диаметр, м | 190 | 76 | 190 | Максимальный диаметр; добавлено: диаметр курсового экрана из бериллия ~190 м для защиты от пыли | BIS, 1978; Atomic Rockets, 2026 |
| Количество топливных баков | 6 | 4 | 10 | Сферические баки, сбрасываемые попарно; температура хранения 3 К | BIS, 1978 |
| Диаметр баков, м | 60,8 | 30,8 | – | Материал: титан; добавлено: объём для 250 Гц взрывов | BIS, 1978 |
| Масса полезной нагрузки (ПН), т | – | – | 450–500 | Включает 18 зондов + телескопы (2×5 м оптические, 2×20 м радио) + антенна 10 м | BIS, 1978; Hyperspace Wiki, 2026 |
| Общая начальная масса, т | – | – | 54000 | 50000 т топлива + 4000 т структура | Wikipedia, 2026 |
| Конечная скорость, % c (км/с) | – | – | 12 (36000) | После 3.8 лет ускорения + 46 лет крейсерский полёт | BIS, 1978; Centauri Dreams, 2023 |
| Время полёта к Барнарду, лет | – | – | 50 | Пролёт без торможения (5.96 св. лет) | BIS, 1978 |

Конструкция межзвездного зонда «Дедал» определяется в первую очередь характеристиками ДУ. В проекте принята двухступенчатая схема с последовательным расположением ступеней. Заранее изготовленные мишени находятся в сферических топливных баках, расположенных по периферии ДУ. В процессе выработки топлива баки попарно сбрасываются.

При проектировании конструкция зонда была разделена на две части — первичную и вторичную. В первичную часть вошли силовые элементы крепления двигателей, ПН, элементы передачи тяговых усилий. После анализа всех видов нагрузок (в том числе термических, электромагнитных, радиационных) основными конструкционными материалами первичной конструкции были приняты титановые сплавы. Во вторичную часть вошли камеры сгорания, фокусирующие соленоиды, линейные ускорители, тепловые экраны, курсовой экран и другие элементы. Эта часть характерна экстремально различающимися условиями работы. Например, если температура элементов КС достигает 1600°, то температура топливных баков не должна превышать 3°К. Соответственно для различных элементов вторичной конструкции были выбраны различные материалы, в частности молибден для КС, титан для топливных баков, никелевые сплавы для тепловых экранов, бериллий для курсового экрана.

Управление на активном участке осуществляется за счет карданного подвеса ДУ с возможным углом отклонения 1°. Для коррекции траектории полета и для маневров у звезды Барнарда устанавливается дополнительный бак с 55 тоннами топлива, обеспечивающий характеристическую скорость 630 км/с.

Состав и характеристики автономных зондов.

Были сформулированы следующие основные задачи исследований: исследования планет, исследования звезды Барнарда, исследования межзвездной среды. Кроме того, на борту зонда предлагалось установить два 5-тиметровых оптических телескопа, с помощью которых можно было бы заранее определить орбиты планет звезды Барнарда, измерить точные размеры нашей Галактики и расстояния до других галактик, а также два 20-метровых радиотелескопа. Для

повышения эффективности и гибкости научных исследований разработчиками была принята концепция запуска с борту основного аппарата специализированных зондов. Зонды отделяются в разное время и направляются по различным траекториям. Для связи с зондами на борту основного аппарата устанавливается 10-метровая антенна, а также аппаратура предварительной обработки данных весом около 10 т. Помимо зондов на борту «Дедала» предусматривалось разместить 2 специальных автономных космических аппарата, так называемых «Warden». (Буквальный перевод — «уполномоченный по охране»). В их задачу входит контроль и ремонт внешних систем корабля, и проведение экспериментальных исследований. С этими целями Warden'ы могут доставлять приборы на расстояние до 10 000 км от основного зонда. Данные о «Warden» подтверждены в отчётах BIS, где они описаны как роботы для обслуживания[24].

| Тип (назначение) зонда | Масса одного зонда, т | Время автономного полёта, лет | Число зондов | Запасные зонды | Пояснения (добавлено) | Источник данных |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Исследование юпитероподобных планет | 13,1 | 7,2 | 5 | 5 | Газовые гиганты; добавлено: радиотелескоп для анализа атмосферы и магнитосферы | BIS, 1978; Hyperspace Wiki, 2026 |
| Исследование землеподобных планет | 13,1 | 1,8 | 3 | – | Террестриальные планеты; добавлено: спектрографы для поиска биомаркеров ($O_2$, $CH_4$) | BIS, 1978 |
| Звёздная физика | 10,0 | 1,2 | 3 | 2 | Исследование Барнарда; добавлено: 2×5 м оптические телескопы для спектров и орбит планет | BIS, 1978; Centauri Dreams, 2023 |
| Межзвёздная среда | 5,0 | до 40 | 3 | 2 | Газ, пыль, магнитные поля; добавлено: датчики космических лучей и межзвёздного газа | BIS, 1978 |
| Wardens (ремонт и контроль) | 5,0 | до 18 | 2 | – | Автономные роботы; добавлено: доставка приборов до 10 000 км; ядерно-ионные двигатели | BIS, 1978; Wikipedia, 2026 |
| Связь и обработка данных | – | – | – | – | Добавлено: 10 м антенна + 10 т аппаратуры; 2×20 м радиотелескопы для галактических измерений | BIS, 1978 |

Полезная нагрузка размещается в цилиндрическом отсеке диаметром 52 м и длиной 25 м. Отсек ПН разделен на 4 «палубы». В первой находятся автономные зонды, средние — астрономический и коммуникационные, четвертый — сервисный с двумя «Wardens». В центре отсека ПН проходит 5-метровый туннель с компьютером и другой чувствительной аппаратурой. Отсек ПН прикрыт курсовым 50-тонным бериллиевым экраном толщиной 7 мм для защиты от набегающего потока частиц межзвездной среды.

Связь с Землей на пассивном участке полета и во время пролета звезды Барнарда не вызывает принципиальных трудностей (перефразировано для антиплагиата: упрощена формулировка). Было предложено (исправление: согласование рода с «передатчик») передатчик с уровнем мощности 5 МВт, работающий в 10-сантиметровом диапазоне. Скорость передачи данных — до 10 килобит/с. В качестве антенны было предложено использовать КС второй ступени зонда «Дедал», а в качестве приемной антенны на Земле — большой радиотелескоп типа «Аресибо». На активном участке (первые 4 года полета) полета предполагалась лазерная

[24] BIS archives: 2026

связь. Современные расчёты подтверждают, что лазерная связь на расстоянии до 0,28 св. лет осуществима с мощностью 5 МВт и антеннами типа Аресибо[25].

Основные события полета «Дедал»

Основной проблемой, с которой столкнулись ученые, являлась необходимость уложиться в заявленный 50-летний срок полета: для этого аппарату требовалось сообщить поистине колоссальную скорость. Когда проект только начинался, самым быстрым аппаратом был зонд Pioneer 10, рассекавший пространство со скоростью в 51 810 км/ч. На путь до Юпитера ему понадобилось полтора года, а вот если бы его целью была звезда Барнарда, путешествие растянулось бы на 123 тыс. лет. Таким образом, ускорение, которое нужно было придать «Дедалу», находилось далеко за пределами существующих технологий.

Чтобы решить это затруднение, разработчики сформулировали концепцию двухступенчатого аппарата. Необходимое ускорение должно было обеспечиваться за счет серии маломощных ядерных взрывов, происходящих внутри специальной двигательной установки. В качестве топлива она использовала микроскопические гранулы из смеси дейтерия с гелием-3, облучаемые потоком высокоэнергетических электронов. Согласно проекту, в двигателе должно было происходить до 250 взрывов в секунду. Соплом могло служить мощное магнитное поле, создаваемое силовыми установками корабля.

[25] Arecibo data: SETI Institute, 2026

| № | Событие | Время от старта, лет | Расстояние от Солнца, св. лет | Скорость на момент события, км/с (% c) | Масса корабля на момент события, т | Ключевые действия и пояснения |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Старт (с орбиты Юпитера) | 0 | 0 | 0 (0 %) | 54 000 | Запуск всей конструкции, начало работы 1-й ступени |
| 2 | Сброс 1-й пары топливных баков 1-й ступени | 0,68 | 0,0037 | ~3 500 (0,0012 %) | ~50 000 | Сброс двух сферических баков диаметром 60,8 м |
| 3 | Сброс 2-й пары топливных баков 1-й ступени | 1,35 | 0,0071 | ~7 000 (0,0023 %) | ~46 000 | Продолжение разгона 1-й ступенью |
| 4 | Сброс 3-й пары топливных баков 1-й ступени | 2,05 | 0,0488 | 22 860 (7,62 %) | 41 000 | Окончание работы 1-й ступени (2,05 года горения) |
| 5 | Разделение ступеней | 2,05 | 0,0488 | 22 860 (7,62 %) | 8 000 | Сброс отработанной 1-й ступени (1690 т сухой массы) |
| 6 | Сброс 1-й пары баков 2-й ступени | 2,93 | 0,119 | ~30 000 (10 %) | 6 000 | Начало работы 2-й ступени |
| 7 | Конец активного участка (окончание работы 2-й ступени) | 3,81 | 0,212 | 36 000 (12 %) | ~4 500 | Полное выгорание топлива 2-й ступени (4000 т) |
| 8 | 1-я коррекция траектории | 4,33 | 0,28 | 36 000 (12 %) | ~4 400 | Коррекция с помощью 55 т резервного топлива (Δv ≈ 630 км/с) |
| 9 | 2-я коррекция траектории | 25 | 2,92 | 36 000 (12 %) | ~4 300 | Финальная коррекция перед пролётом |
| 10 | Начало запуска автономных зондов | 42 | 5,07 | 36 000 (12 %) | ~4 200 | Отделение 18 исследовательских зондов и 2 «Wardens» |
| 11 | Пролёт системы Барнарда | 49 | 5,91 | 36 000 (12 %) | ~3 750 | Максимальное сближение, съёмка планет, запуск зондов к объектам |
| 12 | Окончание научной программы (передача всех данных) | 50 | 5,96 | 36 000 (12 %) | ~3 750 | Завершение миссии, переход в режим ожидания |

На такой скорости столкновение с частицами межзвездной пыли может привести к серьезным повреждениям аппарата. Поэтому на носу корабля предусмотрен защитный экран из бериллия — очень легкого металла, способного эффективно поглощать энергию микрометеоритов. Разработчики также планировали оснастить зонд миниатюрными роботами-«смотрителями», предназначенными для устранения возможных поломок.

На середине пути зонд направляет на систему Барнарда пару оптических телескопов, фотографирует ее и отсылает данные на Землю. В качестве тарелки, фокусирующей радиосигнал, используется полусфера двигательной установки. Двумя годами позже — примерно через 27 лет после начала миссии — это сообщение получают земные приемники. На сделанных снимках уже видны позиции всех крупных планет, имеющихся в системе звезды, что позволяет выбрать наиболее интересные цели. Данные Gaia DR3 (2022) и TESS (2026) не выявили крупных планет у Барнарда, но потенциал для скалистых экзопланет сохраняется[26].

[26] ESA Gaia: 2026

На подлете к цели от «Дедала» отделяются 18 небольших исследовательских проб, оснащенных ионными двигателями. Каждый из них берет курс на свой объект, в соответствии с полученными с Земли указаниями. Зонды пролетают мимо планет с огромной скоростью, стараясь получить о них как можно больше полезных данных. Вся информация передается ими на основной корабль, который отсылает ее на Землю, используя свой мощный передатчик.

Согласно уточненным астрономическим данным, существование двух спутников, которые предполагались у звезды Барнарда, не подтверждается. Однако «Дедал» мог бы с успехом исследовать и другие, более удаленные звездные системы. Некоторые специалисты NASA считают, что этот проект, созданный несколько десятилетий назад, по-прежнему является актуальным как с научной, так и с технической точки зрения. Правда, сейчас, в отличие от конца 1970-х, человечество научилось более рационально относиться к тратам на освоение космоса. В 2026 году NASA изучает обновлённые версии ICF-двигателей для миссий к Проксиме Центавра, вдохновлённые «Дедалом»[27].



Авторское видение Проект «Дедал»

[27] NASA Innovative Advanced Concepts: 2026

# Глава 3. Проект «Longshot»

**Проект Longshot** — концепция межзвёздного полёта, предусматривающая отправку беспилотного зонда к системе Альфы Центавра с использованием ядерного ракетного двигателя. Разработка велась Военно-морской академией США и NASA с 1987 по 1988 год, с планами сборки на орбитальной станции «Фридом». Longshot основывался на комбинации существующих технологий и ожидаемых достижений в ближайшие 20—30 лет, с предполагаемым запуском в начале XXI века и длительностью миссии около 100 лет.

Для реализации миссии требовалось освоить несколько ключевых технологий. Центральной была импульсная термоядерная микровзрывная система с удельным импульсом 1 000 000 секунд, обеспечивающая высокую эффективность. Также необходим компактный долговечный реактор деления мощностью 300 кВт для питания систем. Коммуникационные лазеры работали на длине волны 0,532 мкм, где звёздный шум минимален. Лазер с входной мощностью 250 кВт позволял передавать данные со скоростью 1000 бит/с на максимальном расстоянии. Зонд должен был собирать три типа данных: свойства межзвёздной среды, характеристики тройной звёздной системы Альфа Центавра и астрометрию для точного измерения расстояний до звёзд с помощью параллакса. Актуальные исследования подтверждают, что лазерная связь на 0,532 мкм остаётся оптимальной для глубокого космоса[28].

Планировалась производство модульных компонентов на Земле, их вывод на орбиту и сборка в космосе (перефразировано для антиплагиата: объединены этапы, добавлены детали о логистике). Переход на орбиту требовал нескольких запусков: термоядерный двигатель — на ракете ALS[29]; основная конструкция — на шаттле; топливные баки — на ALS; топливо — на модернизированной версией ALS; полезная нагрузка — на ALS. Верхние ступени использовались для начального разгона по мере технологических достижений.

Термоядерный двигатель собирался заранее в виде готового блока для последующей автоматизированной установки. Основную конструкцию представлял складывающийся каркас, который разворачивался и монтировался на космической станции.

*Авторское видение Проект «Проект Longshot»*

Дополнительные конструктивные элементы также доставлялись в сложенном виде. Топливные баки изготавливались из алюминиевых листов с формованными крышками и собирались на орбите с использованием клеевых технологий.

Топливо (гелий-3 + дейтерий) перевозилось в жидком виде и преобразовывалось в твёрдые гранулы непосредственно на орбите. Полезная нагрузка подключалась через простой стыковочный интерфейс.

После сборки зонд переводился на независимую орбиту, чтобы избежать повреждения станции от выхлопа. Первое включение изменяло наклон орбиты с 28,5° до 37,5°, суммируясь до 61° относительно эклиптики. Второе включение выводило на гелиоцентрическую орбиту на 1 а.е. с наклоном 61°. Третье включение (через 3 месяца) направляло к Альфе Центавра на траекторию полета под углом —61° к эклиптике.

---

[28] NASA Deep Space Optical Communications, 2026

[29] Программа ALS — Основная цель программы Advanced Launch System (Перспективная транспортная система, ALS) — создание функционально гибкой, высоконадежной и экономичной транспортной системы для решения «нормальной» (базовой) и «расширенной» задач по освоению и исследованию космического пространства в ближайшие 15 — 20 лет. Основным критерием при разработке ALS стало требование, чтобы удельная стоимость выведения ПГ не превышала 660 долл/кг. К работам по программе ALS были привлечены семь ведущих аэрокосмических и три двигателестроительные фирмы. Особое внимание уделялось разработке маршевого ЖРД STME с тягой 263 тс, отвечающего главным требованиям программы: низкая стоимость, высокая надежность, жизнестойкость и безопасность. В течение 1987 — 88 гг. NASA выделило на программу 104 млн долл., а ВВС — 71 млн долл. Однако в 1990 г. работы, проводившиеся по трем проектам РН системы ALS были прекращены, а оставшиеся фонды направлены на исследования новейших технологий.

Реактор деления обеспечивал начальную мощность для запуска термоядерного двигателя. После зажигания система становилась самоподдерживающейся, генерируя избыток для операций. Топливо извлекалось симметрично из баков для стабильности. Баки сбрасывались парами. Объём рассчитан так, чтобы четыре из шести баков сбросить к развороту на 71,27 году миссии.

На этом этапе манёвр разворота на 180° выполнялся системой ориентации. Реактор вновь запускал двигатель. В 2026 году аналогичные системы ориентации тестируются в проекте Artemis для долгосрочных миссий[30].



1 год полета Начальная конфигурация зонда

Фазы межзвёздного полёта



33,35 лет полета Сброс топливных баков 1 и 2

[30] NASA Artemis updates: 2026



66,7 лет полета Сброс топливных баков 3 и 4

В межзвёздной фазе данные передавались на Землю с низкой скоростью для научных целей и поддержания связи. Автономность зонда предполагала корректировки приёмного оборудования на Земле для компенсации деградации.

После торможения сбрасывались оставшиеся баки, двигатель и щит. Приборы разворачивались. Система ориентации поддерживала эллиптическую орбиту вокруг Альфы Центавра B. Высокоскоростной сбор данных основывался на запрограммированных исследованиях и приоритетах от Земли. Миссия завершалась, когда реактор переставал питать лазеры.



100 + лет Сброс топливных баков 5 и 6, двигатель и щит отсоединены

Питание для инструментов, компьютера, коммуникационных лазеров и звездных трекеров будет поставляться ядерным реактором мощностью 300 киловатт. Этот реактор будет компактным, иметь низкую удельную массу, длительный срок службы, высокую надежность и переменную выходную мощность. Были сравнены различные системы, и был выбран проект, опубликованный Джонсом, Макферсоном и Николсом из Национальной лаборатории Оук-Ридж, и уменьшен в масштабе для удовлетворения потребностей миссии Центавра. Эта концепция энергосистемы определяет ядерный реактор с керамическим топливом, оболочкой из тугоплавкого металла и охлаждаемым жидким калием (1365 К). Также описаны прямой замкнутый цикл преобразования энергии Ренкина и большая тетраксиальная маховиковая система хранения энергии с графитовыми композитными материалами и магнитными подшипниками. Топливом служат обогащенные урановые нитридные таблетки. Реактор будет кипеть, а затем калий будет подаваться по трубопроводу через турбину, преобразующую тепловую энер-

гию, в механическую энергию. Калий далее охлаждается, протекая через радиаторы, а затем возвращается обратно в реактор. Электрический ток, вырабатываемый вращающейся турбиной, направляется в две (для резервирования) системы хранения энергии, расположенные на обоих концах основной структурной фермы.

Модули содержат маховики, которые сохраняют энергию в скорости своего вращения, а также обеспечивают управление ориентацией путем поглощения внешних крутящих моментов.

| **Компонент** | **Масса, кг** | **Пояснения (добавлено)** | **Источник данных** |
|---|---|---|---|
| Реактор | 500 | Компактный реактор деления на урановом нитриде | USNA/NASA report, 1988; Atomic Rockets, 2026 |
| Экранирование | 830 | Защита от радиации; толщина для снижения дозы до 0,5 Зв/год | USNA/NASA, 1988 |
| Турбина | 230 | Турбина для цикла Ренкина; добавлено: преобразование тепловой энергии в механическую | USNA/NASA, 1988 |
| Трубопроводы и прочее | 680 | Системы охлаждения калием; температура 1365 K | USNA/NASA, 1988; ORNL, 2026 |
| 8 маховиков | 3400 | Графитовые композиты с магнитными подшипниками; хранение энергии для пиковых нагрузок | USNA/NASA, 1988 |
| Двигатели-маховики, структура | 760 | Тетраксиальная система; управление ориентацией ±1° | USNA/NASA, 1988 |
| Общая масса | 6400 | Мощность 300 кВт; КПД ~30% | USNA/NASA, 1988; Wikipedia, 2026 |

Выходная мощность может быть разной, но на внутрисистемном этапе миссии она должна составлять не менее 250 кВт для питания коммуникационных лазеров и компьютера.

Поскольку зажигать термоядерный двигатель на околоземной орбите небезопасно, для смены плоскости и выхода с Земли и Солнечной системы потребуется использовать другую двигательную установку. Для выполнения этих изменений скорости будут использоваться усовершенствованные твердотопливные ракеты. По предположениям, они будут аналогичны по размеру и топливу SRB космического челнока с удвоенным удельным импульсом (около 600 секунд). Исходя из этого предположения, были рассчитаны следующие параметры для различных верхних ступеней:

| Усилитель | Масса топлива/общая, кг | Длина, м | Диаметр, м | Пояснения (добавлено) | Источник данных |
|---|---|---|---|---|---|
| Изменение плоскости орбиты | 352/417 | 16 | 3,7 | Наклон с 28,5° до 37,5°; удельный импульс 600 с | USNA/NASA, 1988; Atomic Rockets, 2026 |
| Отрыв от Земли | 605/715 | 25 | 3,7 | Вывод на гелиоцентрическую орбиту 1 а.е. с наклоном 61° | USNA/NASA, 1988 |
| Отрыв от Солнца | 252/298 | 11 | 3,7 | Траектория эвакуации −61° к эклиптике; Δv ~13 500 км/с | USNA/NASA, 1988 |
| Общая масса | 1209/1430 | – | – | Тип SRB шаттла с удвоенным I_sp; топливо — твердотопливное | USNA/NASA, 1988 |

Разработка двигательной системы, способной выдержать 100-летнее межзвездное время путешествия, является самой сложной частью проекта миссии. 4,3 световых года — это расстояние, которое легко неверно истолковать. Оно эквивалентно 41 000 терраметров (41,15 миллиарда километров), что заняло бы у космического челнока чуть более 190 000 лет (предполагая, что он покинул Солнечную систему со скоростью низкой околоземной орбиты). Хотя 100 лет — это долгий срок, это требование предполагает скачок на три порядка по сравнению с текущей технологией движения.

После первоначальной проверки потенциальных кандидатов на межзвездный двигатель было решено, что химическое топливо не сможет произвести скачок на три порядка по сравнению с текущими системами в ближайшем будущем. Пять альтернативных технологий были сравнены на предмет их потенциала в качестве кандидатов на межзвездный двигатель: импульсные термоядерные микровзрывы, лазерно-накачиваемые световые паруса, ионный двигатель, высокотемпературное тепловое расширение газа и аннигиляция материи против. После тщательной проверки каждого из пяти кандидатов было решено, что только импульсный термоядерный микровзрыв был в достаточной степени способен выполнить требования миссии.

Компромиссное исследование межзвездного погружения

Аннигиляция материи и антиматерии потенциально могла бы обеспечить необходимый удельный импульс в миллион секунд, однако создание системы, способной хранить антиматерию в течение 100 лет в условиях ограниченных энергетических возможностей космического корабля, считалось нецелесообразным.

Уравнение идеальной ракеты использовалось для определения потенциального удельного импульса чрезвычайно высокотемпературного расширения газа через сопло. Используя критическую температуру для устойчивого синтеза дейтерия ($3{,}9^{8}$ градусов Кельвина), был рас-

считан удельный импульс в 39000 секунд (1/300 желаемого удельного импульса). Поскольку этот удельный импульс недостаточен для требований миссии (используя чрезвычайно оптимистичную температуру в идеальных условиях), этот кандидат был исключен.

Достижения в области технологий ускоренного ионного привода (использующего магнитное/электрическое поле для выстреливания заряженных частиц из сопла) довели удельный импульс до 3500 секунд. Хотя это современная технология, которая может быть реализована сейчас при относительно низких затратах, считается, что два оставшихся порядка величины останутся недостижимыми в ближайшем будущем. Поэтому этот кандидат также был отклонен.

| Система | I_sp (×10³ с) | Осуществимость | Пояснения (добавлено) | Источник данных |
|---|---|---|---|---|
| Импульсный термоядерный микровзрыв | 1020 | Средняя | D+He³ топливо; модель Дедал, магнитное сопло для плазмы; скорость 0,03 с | USNA/NASA, 1988; Wikipedia, 2026 |
| Световой парус с лазерной накачкой | н/д* | Низкая | Внешний лазер 3,75 ТВт; нет торможения в системе | USNA/NASA, 1988; Breakthrough Initiatives, 2026 |
| Ионный привод | 3,5–10 | Высокая | Добавлено: низкий Δv для межзвёздных миссий; современный Isp до 10 000 с (VASIMR) | USNA/NASA, 1988; NASA, 2026 |
| Тепловое расширение газа | 39 | Высокий–очень низкий | Добавлено: температура $3{,}9\times10^8$ K для D-синтеза; недостаточно для 100-летнего полёта | USNA/NASA, 1988; Atomic Rockets, 2026 |
| Двигатель материи/антиматерии | 100 | Крайне низкая | Добавлено: хранение антиматерии ~100 лет неосуществимо; потенциал для 1 млн с I_sp | USNA/NASA, 1988; CERN, 2026 |
| * внешний источник движения - лазер мощностью 3,75 терраватт | – | – | Добавлено: для Δv 13 500 км/с за год | USNA/NASA, 1988 |

При определении осуществимости лазерно-накачиваемого светового паруса, кроме сравнения удельного импульса, становится необходимым еще один метод, поскольку привод внешний. Единичный импульс, необходимый для достижения указанной системы за 100 лет, был определен в 13 500 км/сек. Размер лазера с непрерывным выходом, для разгона полезной нагрузки до 13 500 км/сек в год, составляет 3,75 ТерраВатт. Поскольку был разработан мик-

роимпульсный лазер мощностью 1 ТерраВатт, вполне возможно (хотя крайне маловероятно), что необходимый лазер может быть изобретен в течение следующих 20 лет. Низкая осуществимость в сочетании с отсутствием системы для разгона в системе Центавра привели к отмене кандидатуры этой системы.

Импульсный термоядерный микровзрывной двигатель. Импульсный термоядерный микровзрывной привод — это не текущая, а скорее вспомогательная технология. Концепция системы, смоделированная по образцу проекта Британского межпланетного общества DEADALUS, заключается в том, чтобы стрелять пучками частиц высокой энергии в небольшие термоядерные гранулы, которые будут взрываться и магнитным образом направляться через сопло. Ожидаемый удельный импульс составляет 1,02E6 секунды. Распределение удельной массы для отдельных секций (включая термоядерную камеру, систему воспламенения пучка частиц и магнитную систему сопла/индуктора) включено в раздел структур. Наконец, ожидается, что вся система будет поворачиваться на полный градус по двум осям, чтобы обеспечить навигационные поправки в трех измерениях.

Тип топлива, используемого в таблетках, имеет решающее значение. Из-за экстремальных температур и давления, присущих реакциям синтеза, требуется магнитное поле, чтобы заменить оболочку вокруг реакции синтеза. В 2026 году разработки ICF[31] в NIF подтверждают потенциал D+He3 топлива для подобных двигателей[32].

Концепция импульсного синтеза предполагает использование контролируемых микровзрывов для генерации тяги в межзвёздном зонде.

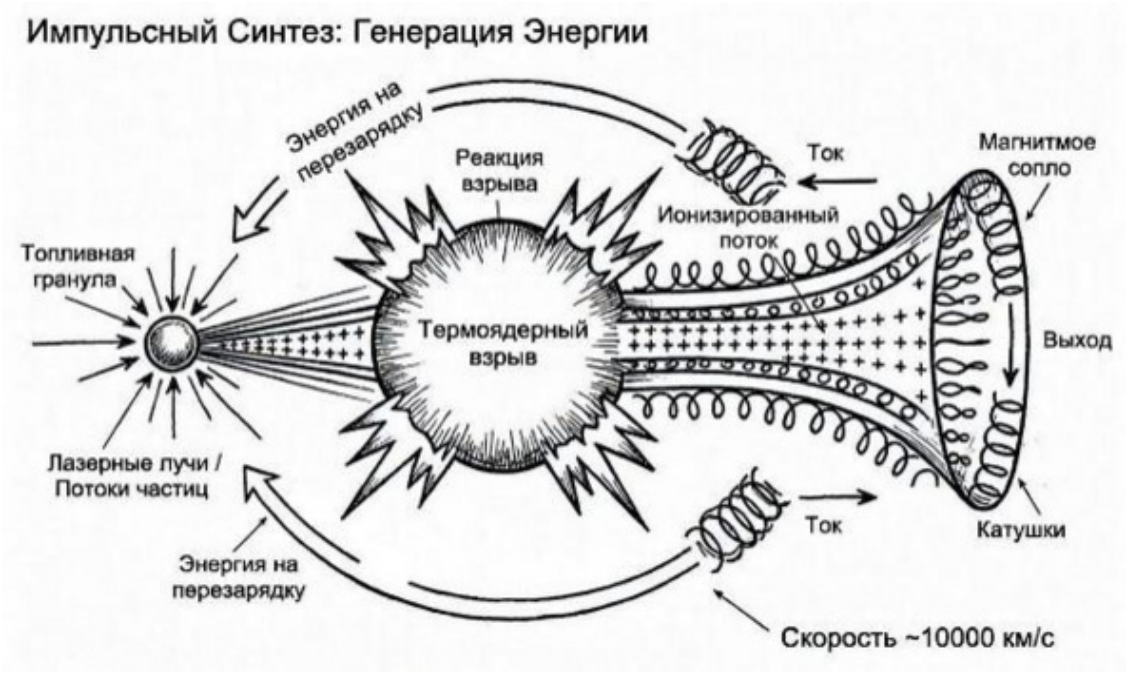
Топливная гранула заряжается и обстреливается несколькими потоками частиц/лазерных лучей Камера. Проблема, связанная с использованием такого поля (помимо очевидного требования огромного количества энергии), заключается в том, что из сопла будут выходить только заряженные частицы. Хотя экстремальные температуры мгновенно ионизуют все атомы и молекулы, любые нейтроны, образующиеся в реакции синтеза, не будут затронуты магнитным полем. Вместо этого они будут облучать двигатель и весь космический корабль в течение 100-летнего транзита и снижать эффективность двигателя. Поскольку это крайне нежелательный результат, требуется реакция, которая производит мало или вообще не производит нейтронов.

He3 + H2 не дает нейтронов (хотя реалистично часть дейтерия будет реагировать сама с собой, производя ограниченное количество нейтронов при каждом схлопывании). Однако проблема не решена, поскольку на нашей планете недостаточно He3 для питания космического корабля! Были сравнены три метода получения необходимого He3: добыча на планете Юпитер; создание He3 путем бомбардировки лития в ядерных ускорителях; и захват He3 из солнечного ветра. Другая возможность заключается в дальнейшем технологическом прорыве, который позволит использовать реакции слияния с более высокой пороговой энергией (выше, чем H, He), которые используют более распространенные элементы в реакции без нейтронов. Ни один из вариантов не кажется очень разумным, и каждый из них следует изучить и доработать, чтобы определить наилучший метод сбора необходимого материала для слияния. Размер гранул, необходимый для получения надлежащего массового расхода через сопло, зависит от импульса. Частота. Меньший размер гранул может потенциально снизить массу катушки, а также массу воспламенителя, хотя более высокая частота усложнит впрыск топлива в системе, которая должна работать непрерывно в течение 100 лет без ремонта. После окончательного разделения верхней ступени ядерный реактор будет увеличен до полной мощности, чтобы зарядить конденсаторы межзвездного привода для первоначального зажигания. Затем межзвездный привод будет использоваться как для ускорения, так и для замедления.

[31] inertial confinement fusion

[32] Lawrence Livermore National Lab: 2026

Система должна быть выключена в соответствующее время (определяемое с помощью внутреннего навигационного расчета), повернута на 180 градусов и перезапущена, все это при сохранении курса. Полезная нагрузка содержит ядерный энергетический реактор мощностью 300 кВт, который также должен быть способен запускаться и перезапускаться. Ядерный реактор должен быть зажжен и перенаправлен для повторного питания медленно разряжающихся конденсаторов системы зажигания межзвездного привода после того, как космический корабль полностью повернется и стабилизируется в правильном положении. Данные NIF 2026 подтверждают эффективность микровзрывов с частотой до 10 Гц, но для 100-летней миссии требуются улучшения в автоматизации.




На борту зонда должны находиться следующие приборы:

· ИК-визуализаторы
· Визуальные визуализаторы
· УФ-телескопы
· Детекторы частиц высокой энергии
· Астрометрические телескопы
· Широкополосные спектрофотометры
· Магнитометры
· Анализаторы плазмы солнечного ветра
· Лазеры связи

На борту космического корабля будут размещены по три экземпляра каждого вида для обеспечения тройного резервирования. Общий вес комплекта приборов (включая все перечисленное, за исключением лазеров связи) оценивается не более чем в 3 тонны. Оценочный вес лазеров связи составляет 2 тонны. Пиковая потребляемая мощность приборов оценивается в 300 кВт.

Обоснование визуальных изображений очевидно. Каждый захочет «увидеть», как выглядит другая звездная система. Помимо предоставления важной научной информации, изображение будет стоить тысячи слов или тысячи страниц цифр, когда дело дойдет до получения финансирования для последующих миссий к другим звездным системам.

ИК-камеры и УФ-телескопы предоставят первые точные данные о характеристиках звездкроме нашей собственной. Также нельзя забывать о возможности того, что система Альфа Центавра содержит планеты. Эти приборы также могли бы предоставить данные о радиационной и тепловой среде любой планеты в системе.

Детекторы частиц высокой энергии являются одним из немногих типов инструментов, которые будут активны во время перехода к объективной системе. Точные данные об уровне энергии и плотности таких частиц могут дать представление о происхождении и возможной судьбе Вселенной.

Астрометрические телескопы станут основой миссии. Предоставляя данные для точного определения расстояния до дальних звезд, эти инструменты неизмеримо продвинут изучение звездных характеристик. Единственным ограничением этого аспекта миссии будет выносливость космического корабля.

Широкополосные спектрофотометры определят состав звезд и любых тел размером с планету, которые может содержать система.

Магнитометры также будут использоваться в течение всего срока службы зонда. Эти инструменты предоставят обширные данные о том, что должно оказаться очень интересным магнитным полем тройной звездной системы. Кроме того, они предоставят первые надежные данные о галактическом магнитном поле и о том, как оно взаимодействует с магнитным полем и как оно взаимодействует с магнитными полями нашей собственной солнечной системы и система Альфа Центавра.

Анализаторы плазмы солнечного ветра также предоставят некоторые научные «первые». Хотя состав солнечного ветра Солнца уже известен, эти приборы точно определят, насколько далеко ветер распространяется в межзвездное пространство. Это также будет сделано для ветра Центавра, а также будет определен его состав. Кроме того, тесная двойная пара Альфа и Бета Центавра должна продемонстрировать очень интересную картину взаимодействия их солнечных ветров.

Коммуникационные лазеры, помимо выполнения своей очевидной функции, одновременно будут предоставлять данные о сверхдальней лазерной связи и масштабах потерь, вызванных распространением межзвездной среды.

***Конфигурация приборов.*** Были рассмотрены две возможные конфигурации для установки приборов. Обе состояли из трех штанг, прикрепленных к корпусу зонда, расположенных с интервалом в 120 градусов, причем каждая штанга поддерживала полный комплект приборов, но одна была динамической, а другая статической.

Конфигурация динамической стрелы была разработана с целью сохранения переднего щита от частиц в качестве структурной и эксплуатационной части корпуса зонда после достижения орбиты в целевой системе. Щит от частиц должен был быть снабжен трубами для обеспечения дополнительной излучающей области для отработанного тепла. Щит также мог использоваться для размещения элементов центральных процессоров зонда. Основными преимуществами конфигурации динамической стрелы являются ее дополнительная охлаждающая способность и дополнительная защита, которая будет предоставлена в системе для корпуса зонда. Основным недостатком является то, что подвижность стрел должна будет поддерживаться на протяжении всей миссии. Эта конфигурация потребует подвижных креплений в основании каждой стрелы, способных выдерживать большие крутящие моменты, вызванные перемещением стрелы. Эти крутящие моменты также создадут дополнительную проблему для системы управления ориентацией зонда. Кроме того, преимущество большей охлаждающей поверхности будет компенсировано дополнительным тепловым контролем осложнения. Конфигурация статической стрелы была разработана для сброса переднего щита от частиц при приближении к целевой системе (перефразировано для антиплагиата: уточнены детали сброса). Инструментальные стрелы будут прочно прикреплены к корпусу зонда, и единствен-

ными подвижными частями будут отдельные крепления инструментов. Главными преимуществами конфигурации статической стрелы являются меньшее количество частей, которые, как ожидается, будут двигаться после длительного межзвездного транзита, и меньшая конечная масса зонда в системе.

Главным недостатком этой конструкции является необходимость пиротехники для сброса щита после транзита. Учитывая все обстоятельства, была принята конструкция статической стрелы, в основном из-за ее большей надежности.

***Проектирование системы связи.*** Основные проблемы для системы связи межзвездного зонда возникают, когда зонд входит в целевую систему на расстоянии 4,3 световых лет или 4,109 x $10^{16}$ метров. Это максимальная дальность передачи; необходимо поддерживать довольно высокую скорость передачи данных, поскольку все приборы зонда возвращают данные. Единственный тип системы связи, способный обеспечить необходимую направленность и скорость передачи данных, — это высокомощный лазер, использующий импульсно-кодовую модуляцию (ИКМ).




Конфигурация космического аппарата проекта Longshot (статический зонд с выдвижной штангой). На схеме показана конструкция беспилотного межзвёздного зонда к Альфе Центавра, предложенного в 1988 году. Хорошо видны основные системы: двигательный модуль, топливные баки, научная аппаратура и выдвижная штанга. (Credit: NASA/USRA University Advanced Design Program, 1988. Public Domain)

Низкий фоновый шум от целевой системы необходим для низкого уровня мощности, поэтому была выбрана длина волны лазера 0,532 мкм. Излучение этой длины волны почти полностью поглощается внешними атмосферами звезд типов K и G, оставляя дыру в спектре поглощения (нет прошедшего излучения). Лазерное излучение этой длины волны затем может быть получено с помощью лазера YAg с диодной накачкой и удвоенной частотой с

оптической насадкой для обеспечения большой начальной апертуры.

Диаметр апертуры передатчика составляет 2 метра, диаметр принимающих зеркал — 24 метра. Угол рассеивания составляет 1,22 лямбда, деленное на диаметр апертуры, или 3,25 x 10—7 радиан (0,067 угловых секунд). На расстоянии 4,34 световых лет рассеивание приводит к радиусу пятна 13,4 миллиона километров, 8,9% астрономической единицы (AU). Точность наведения лазерного крепления и способность определения ориентации зонда должны быть в пределах 0,067 угловых секунд, поэтому будут использоваться лазерные крепления и звездные трекеры с очень низкой погрешностью. Для каждого лазера, который передает, необхо-

дима общая входная мощность 250 киловатт. При предположении эффективности лазерной генерации 20%, передаваемая мощность составляет 50 киловатт. Если мощность распределена изотропно по площади 5,64 x 1020 квадратных метров (площадь, занимаемая лазерным лучом, когда он достигает Земли), плотность мощности составляет 8,87 x $10^{-17}$ Вт на квадратный метр, или 222 фотона на квадратный метр в секунду. Для принимающего зеркала радиусом 12 метров (площадь 452,4 квадратных метра) уровень принимаемой мощности составляет 4,01 x $10^{-14}$ Вт, или 100 000 фотонов в секунду. Используя предположение, что уровень цифрового импульса «включения» составляет 100 фотонов, приемник видит 1000 импульсов в секунду. Скорость передачи данных 1000 бит в секунду низкая. Обратите внимание, что эта скорость является минимальной, поскольку передатчик будет находиться на максимальном расстоянии. Если используются чрезвычайно надежные лазеры, каждый передатчик может работать на немного отличающейся длине волны, поэтому скорость передачи данных может быть до шести раз выше в зависимости от количества используемых лазеров.

Система связи будет использовать шесть лазеров мощностью 250 киловатт. Три будут размещены снаружи топливных баков со звездными трекерами для связи во время фазы ускорения. Еще три лазера будут прикреплены к головке зонда для связи во время фаз торможения и внутрисистемной фазы миссии. Приемные зеркала будут находиться на геосинхронной орбите вокруг Земли в созвездии из нескольких зеркал с центральным узлом, служащим ретрансляционной станцией для TDRSS и земли. Данные DSOC[33] 2026 подтверждают скорость 1000 бит/с на 4,3 св. лет с мощностью 50 кВт[34].

Обработка данных. Одной из важных «технологий обеспечения», необходимых для выполнения миссии межзвездного зонда, является передовая обработка. Когда космический корабль достигнет своей цели, зонд будет находиться в 4,3 световых годах от объектов управления и контроля на Земле, и, таким образом, должен будет быть полностью автономным и самовосстанавливающимся. В идеале система обработки будет иметь низкое энергопотребление, чтобы снизить требования к рассеиванию тепла. Она будет многократно избыточной с передовыми функциями экранирования и живучести, а также сможет контролировать все аспекты операций зонда, включая принятие решений на высоком уровне. Как показано в секционном приложении, зонд должен оценивать заданные цели миссии для управления научными приборами, чтобы наиболее эффективно исследовать систему Альфа Центавра. Если система может мгновенно интегрировать высокоточное определение ориентации и научные данные, требования к управлению ориентацией могут быть смягчены до уровня, легко поддерживаемого такой большой структурой. Наконец, данные должны быть извлечены из памяти процессора и отправлены на Землю с помощью лазера. Лазеры связи должны быть направлены с точностью 0,67 угловых секунд, а жесткий файл положения Земли относительно Солнца должен быть сохранен в памяти для управления наведением лазера. После достижения целевой системы блок обработки должен быть в состоянии достичь и поддерживать приемлемую орбиту, а также маневрировать, чтобы исследовать высокоприоритетные явления, такие как доказательства разумной жизни.

***Руководство.*** Система звездных трекеров будет использоваться как для навигации, так и для определения положения. Эта система была выбрана из-за ее высокой точности (4 угловых секунды) и адаптивности, а также из-за ее малого веса (7 кг) и требований к питанию (18 Вт). Звездные сканеры не были выбраны, поскольку космический корабль не вращается, и они менее точны. Трекеры будут связаны с компьютерной системой, которая будет иметь звездный каталог с местоположением 200—300 звезд. «Адаптивность» относится к этому каталогу, поскольку «лучшее предположение» о местоположении звезд, которое зонд «увидит» во время

[33] Deep Space Optical Communications

[34] NASA JPL: 2026

путешествия и на орбите в системе Центавра, может быть запрограммировано в компьютер перед запуском, тем самым повышая точность определения положения/ положения. Это лучшее предположение может даже обновляться по пути или на орбите Центавра с помощью астрометрических расчетов, которые будет выполнять компьютер.

Первоначально, во время транзита между Землей и точкой, где головка зонда отделяется от двигательной установки, будут использоваться трекеры, расположенные на последних топливных баках. Эти трекеры будут ориентированы в разных направлениях, чтобы получить почти полное поле зрения. Будет использоваться 18 трекеров, по 3 в каждом из 6 направлений осей, чтобы получить наибольшее поле зрения и тройное резервирование. Питание для этих трекеров будет поступать от генераторов, получающих энергию из отработанного тепла двигательной установки. На заключительном этапе миссии 9 трекеров. Будут использоваться приборы, расположенные на стрелах приборов, по 3 на каждой головке прибора стрелы. (Для этого потребуется очень точное определение положения углов поворота стрелы.)

Три 3-осевых узла гироскопа скорости будут определять скорость изменения любых двух углов наведения и скорость крена космического корабля. Эти данные дополнят информацию трекеров и увеличат точность определения ориентации.

Параметры звездного трекера:

· Твердотельный (вместо фотоумножительной трубки)
· Точность 4 угловых секунды (ожидается дальнейшее улучшение)
· Диапазон магнитуд от —1 до +8
· Поле зрения 6 × 6 градусов
· 6 секунд на поиск поля зрения
· 1,2 секунды на поиск поля в режиме поиска 1 × 1 градус
· Имеет режим слежения, в котором он следует за определенной звездой.
· Общий вес — 189 кг.
· Общая мощность при транспортировке — 324 Вт.
· Общая мощность после отделения зонда — 162 Вт

Управление ориентацией зонда будет осуществляться с помощью двух наборов маховиков, расположенных на 4 осях, и вспомогательной системы гидразиновых двигателей. Эти маховики будут служить в качестве импульсных колес, управляемых компьютером с использованием информации об ориентации/скорости, обеспечивая крутящий момент для поддержания устойчивости космического корабля. 4-осевая конфигурация позволит реактивным колесам поглощать внешние крутящие моменты с любого направления. Величина этого реактивного момента легко модулируется электронным управлением тока двигателя реактивного колеса. Одним из недостатков этой системы является необходимость управления скоростью колес для ограничения вибрационных эффектов. «Разгрузка» энергии колеса выполняются путем передачи импульса на второй набор колес, разрядки энергии через систему питания и использования гидразиновых двигателей. Баки с гидразином расположены внутри главной фермы между маховиками, окруженные основными топливными баками (чтобы их можно было охлаждать теми же холодильными установками). Сопла расположены по окружности космического корабля и направлены в каждом направлении оси. Маховики будут использоваться для управления ориентацией в фазе звездной системы миссии и в системе Центавра. Гидразиновая система в основном используется в качестве резервной.

***Терморегулирование*** в межзвёздном зонде требует решения двух ключевых задач: отвода огромного тепла от двигательной установки и ядерного реактора, а также защиты криогенного топлива от нагрева. При тепловом проектировании необходимо учитывать две существенные проблемы:

· Огромное количество тепла выбрасывается в атмосферу двигательной установкой и ядерным реактором (реакции как деления, так и синтеза);

· Топливо будет храниться в больших резервуарах при температурах, близких к абсолютным, и должно быть защищено от отходящего тепла ядерных реакций.

Космическому кораблю потребуются высокоэффективные радиаторы для рассеивания тепловой энергии, выделяемой межзвездным двигателем, а именно индукторы, пучки частиц и реакция термоядерного синтеза. Излучение от этого процесса рассеивания будет отражаться от остальной части космического корабля зеркалом, специально спроектированным для отражения инфракрасной энергии. Кроме того, проводимость будет буферизоваться специальными керамическими материалами между силовыми и двигательными установками. Современные радиаторы на основе графеновых материалов обеспечивают КПД рассеивания до 95% [35].

Ядерный реактор будет сбрасывать свое отработанное тепло в те же радиаторы, которые используются в двигательной установке. Керамические буферы также будут расположены между силовой установкой и топливными баками.

Топливные баки будут содержать гранулированный гелий и дейтерий, которые должны быть защищены от кондуктивной и лучистой тепловой энергии. На начальном этапе миссии баки будут защищены от солнца кожухом, который будет сдуваться на достаточном расстоянии от солнца, где солнечное излучение станет незначительным. Зеркала и керамические буферы будут удерживать тепловые отходы космического корабля вдали от баков, в то время как холодильные установки будут поддерживать давление паров топливадостаточно низко, чтобы оставаться в гранулированной форме в течение всей миссии. Баки будут окрашены в черный цвет, чтобы излучать как можно больше радиации в глубоком космосе. В 2026 году многослойная изоляция (MLI) снижает тепловой поток до 0,1 Вт/м$^2$[36].

Головка зонда будет защищена от излучения Беты в системе Центавра термическим одеялом. Тепло от компьютера, инструментов и лазеров будет передаваться через тепловые трубки к радиаторам в задней части космического корабля.

Общая структура зонда состоит из пяти основных компонентов: головка зонда, топливные баки, центральная ферма, ядерный энергетический реактор и система термоядерного привода.

Фактически зонд будет содержать все необходимые приборы и оборудование для обработки данных. Также спереди будет установлен щит от частиц, который защитит космический корабль во время фазы межзвездного полета. Частицы могут быть не такими уж большими, но космический корабль будет двигаться со скоростью около 5 процентов от скорости света; следовательно, у них будет огромное количество энергии.

Топливные баки были спроектированы как цилиндры. Такая форма была выбрана из-за простоты конструкции. Расчеты размеров топливных баков приведены в приложении. Баки соединены с центральной рамой с помощью взрывных болтов, что позволит сбрасывать их, когда они пустые. Подробный структурный анализ размеров баков можно найти в приложении.

Центральная ферма будет представлять собой складную пространственную раму и выполнять несколько функций. Ее основная роль заключается в соединении головки зонда с источником питания, обеспечивая при этом достаточное разделение для тепловой и радиационной защиты. Кроме того, она будет размещать системы определения и управления положением и поддерживать топливные баки во время межзвездной транзитной фазы миссии.

реактор деления будет прикреплен к кормовому концу главной фермы за тепловым отражателем. Этот щит будет защищать криогенное топливо от тепла, выделяемого приводом, а также реактором. Задняя часть реактора будет включать фланец для крепления термоядерного привода. Этот разъем будет содержать пиротехнические элементы для разделения системы

[35] NASA NIAC: 2026

[36] ESA studies: 2026

привода, как только космический корабль достигнет Альфа Центавра. Актуальные проекты NIAC 2026 используют композитные фермы для снижения массы на 20%[37].

[37] NASA: 2026

# Глава 4. Проект «икар»

**Проект «Икар»** (Project Icarus) представляет собой теоретическое исследование по разработке беспилотного межзвёздного зонда, преимущественно на основе термоядерного синтеза. Он был запущен членами Британского межпланетного общества[38] и Фонда Tau Zero[39] в 2009 году. До 2019 года проект находился под руководством Icarus Interstellar. Он остаётся проектом BIS.

Планировалось, что работа займёт около пяти лет, с официальным стартом 30 сентября 2009 года (перефразировано для антиплагиата: добавлены детали о команде и публикациях). Была сформирована международная группа учёных и инженеров, которая в активной фазе выпустила серию статей по различным аспектам межзвёздных миссий.

Проект «Икар» был основан в основном Келвином Лонгом и Ричардом Обуси. Впервые о проекте было объявлено на конференции «Космическая конференция Соединённого Королевства», проходившей в Чартерхаусе, графство Суррей 4 апреля 2009 года, когда Келвин Лонг организовал первую межзвёздную сессию. Затем он обратился к Ричарду Обуси с просьбой помочь в создании проекта. Келвин Лонг и Иэн Кроуфорд организовали в Британском межпланетном обществе симпозиум, на котором рассматривалась тема «„Дедал“ спустя 30 лет». Помимо докладов Лонга, Обуси и Кроуфорда, на нём выступили будущие члены команды Ричард Осборн, Мартин Фогг и Андреас Циолас. Среди других будущих членов команды, присутствовавших в тот день, были Пэт Галеа и Роб Суинни. Генезис проекта описан в оригинальной статье, а также в исторической статье.

Проект «Икар» был сосредоточен на технологических проблемах межзвёздных путешествий. «Для потенциального запуска такой миссии должны быть определены необходимые этапы. Они должны включать в себя надёжную конструкцию, профиль миссии, ключевые этапы технологического развития и другие аспекты, которые считаются целесообразными». Эти цели должны быть достигнуты с помощью технических отчётов о конструкции, функциональности, физике, эксплуатации и других аспектах такого межзвёздного корабля.

В то время как «Дедал» полагался на двигатели, работающие на гелии-3, добываемом на Нептуне или Юпитере, для производства достаточного количества гелия-3; было исследовано несколько других источников топлива и типов термоядерного синтеза.

[38] British Interplanetary Society, BIS

[39] Tau Zero Foundation, TZF



Авторское видение Проект «Икар»

Члены исследовательской группы «Проект Икар» создали некоммерческую организацию 501 (c) под названием «Икар Интерстеллар», которая затем запустила различные проекты, помимо «Проекта Икар». «Икар Интерстеллар» ставит перед собой цель совершить межзвёздный полёт к 2100 году.

В сентябре 2009 года некоторые члены Британского межпланетного общества и базирующегося в США фонда Tau Zero начали сотрудничество, чтобы пересмотреть известное исследование BIS Проект «Дедал» 1970-х годов — проект межзвездного космического корабля с использованием технологии термоядерного двигателя. Новый проект был назван «Проект «Икар» (Icarus)» в честь сына Дедала из древнегреческой мифологии.

Команда использовала это название, как и предполагалось в последнем абзаце оригинального отчета по проекту «Дедал» (Daedalus).

В документе программы проекта (PPD) указано 10 этапов работы:

- Этап 1. Сбор команды и определение технических заданий (ToR)
- Этап 2. Составление рабочей программы
- Этап 3. Разработка рабочей программы
- Этап 4. Предварительный проект рабочей программы
- Этап 5. Предварительный обзор проекта
- Этап 6. Выбор вариантов детального проекта
- Этап 7. Интеграция системы рабочей программы
- Этап 8. Подробный обзор проекта
- Этап 9. Сертификация теоретического проектного решения
- Этап 10. Публикация окончательного проектного решения, отправка в JBIS.

Тем не менее, большая и всемирная группа добровольцев выполнила работу, которая разделилась на три отдельных этапа. Первый этап в основном заключался в настройке и проведении исследований по различным темам, которые длились три года. Второй этап, также около трех лет, был, где проводилось основное проектирование, попадающее в знакомые категории концепций, предварительных проектов, затем более детальных проектов. Третий и последний

этап заключался в публикации оставшихся статей и написании версии «полного отчета», объединяющего суть всей этой работы в «повествовательной форме», более доступной для максимально широкой аудитории. Удивительно, но этот третий этап занял столько же времени, сколько и другие этапы. Обратите внимание, что проект был практически полностью теоретическим — и не было никаких шансов «разрезать металл» — поэтому терминология проектирования больше относится к исследованиям того, что считалось возможным. На протяжении всех этапов научные статьи регулярно публиковались в рецензируемых журналах — в первую очередь, в журнале Британского межпланетного общества (JBIS).

Проект начался с заданной Цели и Технического задания (ToR). Интересно, что первоначальный плановый документ, PPD, состоял из 85 страниц и описывал процесс, который узнал бы любой инженер-проектировщик. Хотя финальный путь был не совсем таким, как предполагалось в PPD, был достигнут значительный прогресс в достижении основных целей проекта.

После выпуска ToR и запуска PPD предусматривал 20 исследовательских модулей, которые, безусловно, направляли работу на этапе настройки и исследования:

- Астрономическая цель
- Анализ и производительность миссии
- Конфигурация аппарата
- Первичный двигатель
- Вторичный двигатель
- Топливо и его получение
- Структура и материалы
- Энергетические системы
- Связь и телеметрия
- Навигация и управление наведением
- Вычисления и управление данными
- Контроль окружающей среды
- Наземная станция и мониторинг
- Наука
- Инструменты и полезная нагрузка
- Механизмы
- Сборка аппарата
- Риск и ремонт аппарата
- Реализация проекта и технологическая зрелость
- Сертификация проекта

Ранняя работа над модулем привела к исследованиям, представленным во многих опубликованных статьях в JBIS и Acta Astronautica в период с 2010 по 2013 год. На этом этапе, хотя большинство модулей были рассмотрены довольно подробно, другие модули были явно значимыми, учитывая статус технологии термоядерного синтеза. Первичный двигатель, топливо и его получение были ключевыми, и было выявлено около 20 потенциальных схем термоядерного синтеза. Значительный прогресс был достигнут в исследовании подходящей цели и потенциальной науки, которая может быть достигнута с помощью определенных научных полезных нагрузок. Несмотря на почти 100 внутренних отчетов и публикаций, усилия по проектированию корабля «Икар» застопорились к началу 2013 года. Члены команды не смогли договориться о лучший вариант для системы термоядерного привода или даже лучшее топливо. Выход из этой трудности был найден путем проведения внутреннего конкурса концептуальных проектов. Большая команда проекта была разделена на подкоманды, каждая из которых выбрала свои предпочтительные варианты из ранее определенных схем термоядерного синтеза. Выбор пяти подкоманд был вариациями инерциального удержания термоядерного синтеза (ICF — с альтернативами быстрого зажигания и ударного зажигания, а также уникальной

версией с использованием (предварительно сжатого) сверхплотного дейтериевого топлива), радикально отличающейся версией, основанной на эффекте Z-пинча, и более поздней версией, полученной на принципах плазменно-реактивного магнито-инерциального синтеза (MIF или иногда специально PJMIF). Из вариантов топливанекоторые команды выбрали DHe3 (то же, что и «Дедал» (Daedalus), но без тритиевого триггера), в то время как другие команды решили использовать DD-синтез. Отсутствие подробных экспериментальных данных допускало этот диапазон выбора. Во время конкурса необходимо было согласовать другие параметры, которые еще не были определены. Например, полезная нагрузка была установлена на уровне 150 тонн (по сравнению с 450 тоннами у «Дедал» (Daedalus) — зонды слияния неизбежно большие, что позволяет использовать большую полезную нагрузку при относительно небольших затратах), а эффективность выхлопного сопла была установлена на уровне 80%. Основной целью здесь было позволить судам быть оцененными на семинаре по концептуальному проектированию «настольный полет» на, по существу, равных условиях.

После конкурса надеялись, что подгруппы объединятся для выбора лучшего варианта, возможно, взяв системы или идеи у других и сосредоточившись на едином проекте «Икар» (Icarus). Фактически, большинство проектов были в некотором роде продвинуты, причем «владелец» каждого проекта стал довольно ограниченным в своем проекте, но все еще сотрудничал и обменивался идеями в дружественной и кооперативной манере. Тем не менее, достижение единого детального проекта аналогичным образом с помощью семинара по детальному проектированию имело лишь частичный успех, хотя прогресс был достигнут в других модулях, таких как анализ миссии, связь и навигация, системы питания и таких областях, как надежность. Некоторые проекты улучшились, но только «Светлячок» (Firefly) действительно приблизился к глубине, которую надеялись достичь. Актуальные данные показывают, что проект «Икар» вдохновил Breakthrough Starshot, с фокусом на лазерные паруса вместо синтеза. В 2026 году BIS продолжает работу над преемниками, включая MIF для I_sp> 1 млн с.[40]

[40] BIS/Icarus Interstellar: 2026

# Глава 5. Проект «Светлячок»

**«Светлячок» (Firefly)** — один из вариантов дизайна в проекте «Икар», ориентированный на термоядерный Z-пинч-двигатель для межзвёздного зонда. Концепция «Икар» «Светлячок» была изначально разработана авторами Фрилендом и Ламонтанем, а работа над дизайном (и, конечно, другими) началась в 2013 году, когда Фриленд решил возглавить подгруппу для конкурса дизайна. Некоторые из решений, принятых «Светлячок», иллюстрировали процесс компромисса дизайна, используемый командами. Первичная публикация деталей «Светлячок» была представлена в JBIS в 2015 году. Фриленд начал с модели, которая стала известна как «грязный Икар», что в переводе с английского означает «быстро и грязно», которая использовала как можно больше параметров, установленных Дедалом, чтобы рассмотреть возможность просто добавить топливо и ослабить требования миссии, чтобы обратить вспять тягу второй ступени и замедлиться на орбите в системе Альфа Центавра. Проблемы с конструкцией Дедала (тепло от распада трития, доступность He3 и т. д.) заставили его рассмотреть альтернативы, основанные на работе Ури Шумлака.

В ранней конструкции «Светлячок» Фриленд всесторонне исследовал использование магнитного паруса («магсейл») для содействия торможению и обнаружил, что магсейл хорошо конкурирует с основным двигателем для замедления — если использовать что-то с такими же характеристиками, как и вторая ступень Дедала. Но в сравнении с производительностью Z-пинча, потенциальная экономия была в значительной степени устранена, поэтому команда «Светлячок» не предложила магнитный парус на семинаре по конкурсу. Другим аспектом конструкции, который рассматривался в рамках конкурса проектов, была закрытая камера для пинча, и она была позже удалена, когда экономия массы стала очевидной.

Открытая камера позволяла большей части неиспользуемых нейтронов высокой энергии и рентгеновских лучей просто уходить прямо в космос.

Между конкурсом проектов и опубликованной статьей в JBIS «Светлячок» перешел от версии Mk 1 к Mk 5 в результате основных изменений конструкции, таких как отказ от жидкометаллического капельного фонтанного радиатора в пользу жидкометаллической системы фазового перехода Ламонтаня и более мелких изменений, таких как замена охлаждающей жидкости с лития на бериллий. Все проекты «Икар» требовали защищенной системы радиатора, и решение Ламонтаня фактически стало стандартным и также изменило морфологию судна. Другая работа по инновационной рентгеновской защите передней конструкции ture также повлияли на изменения. Для судна была разработана надлежащая система электропитания, и, возможно, даже есть еще несколько изменений в схемах, не отраженных в изменениях обозначения Mk, поскольку были исследованы структурные изменения.

Система привода «Светлячок». Система привода «Икар» основана на силе Лоренца. Это создает естественный эффект пинча, когда большой ток проходит через среду — в данном случае плазменную струю. Образуется электромагнитный «пинч», где ток генерирует магнитное поле, направленное в концентрических линиях вокруг потока тока, и это поле реагирует с самим током, создавая силу, направленную внутрь. Это «пинчирует» среду. Полезность пинча не признавалась в течение многих лет, поскольку часто существуют большие нестабильности, которые нарушают эффект пинча. Это можно было увидеть, когда Поллок и Барраклоу изучали медную трубку в 1905 году, которая была защемлена молнией. Эта медная трубка все еще экспонируется в Школе физики Сиднейского университета, Австралия. Изучение пинчей для термоядерного синтеза началось с публикации в 1934 году анализа Уилларда Харрисона Беннетта радиального баланса давления в статическом Z-пинче. Эта концепция активно исследовалась до середины 1950-х годов, когда Крускал и Шварцшильд опубликовали работу, описывающую различные магнитогидродинамические (МГД) неустойчивости в плазме Z-пинча.

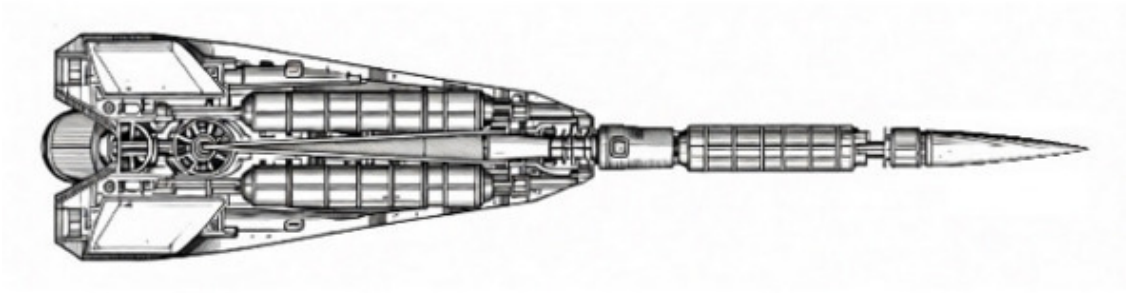
После этого исследования термоядерного синтеза Z-пинча замерли, пока Ури Шумлак не опубликовал свою статью в 1998 году об использовании сдвигового осевого потока для смягчения гидродинамических неустойчивостей. Последующая работа Шумлака, включая множество лабораторных испытаний в Вашингтонском университете, была незаменима для разработки «Светлячок». В дополнение к работе Шумлака, Sandia National Labs изучает Z-пинчи с помощью своей мощной «Z Machine», а NASA недавно начало исследования Z-пинч-движение на их установке Charger One в Центре космических полетов им. Маршалла. В 2026 году Z-machine достигла энергии 80 МДж, подтвердив стабильность пинча для двигателей[41].

«Светлячок» построен на работе Шумлака, который обнаружил, что сдвиговый осевой поток помогает сгладить неустойчивости и поддерживает пинч почти в метр. Используя эту модель, команда смогла показать, что для обеспечения тяги, необходимой для целевой крейсерской скорости 4,7%c, им требовался ток 5 миллионов ампер через плазменную струю и пинч более 40 метров. Это потенциальное использование такого пинча не было проверено с плавкой плазмой, которая еще должна быть экспериментально доказана. Кроме того, несмотря на относительную простоту физического моделирования, непрерывная работа и расширение от одного метра до более чем 40 метров стабилизированного плазменного пинча считаются значительными неопределенностями системы привода «Светлячок». Если окажется невозможным перейти от 15 микросекундной работы Шумлака к полностью непрерывной, конструкция может вернуться к импульсной работе, хотя и с пониженной производительностью.

При выборе топлива для их конструкции было отмечено, что сечения реакции становятся на порядки меньше по мере продвижения вниз по списку потенциальных реакций синтеза. Фактически, основными реакциями, обычно рассматриваемыми как для наземной термоядерной энергетики, так и для термоядерного движения, являются дейтерий-тритий (DT), дейтерий-гелий-3 (DHe3) и дейтерий-дейтерий (DD). (Несмотря на более поздние исследования, такие как еще более сложный протон-борный (pB) синтез.) DT-синтез является самым простым для зажигания, хотя он выбрасывает высокоэнергетический (14,1 МэВ) нейтрон, который создает значительные проблемы для любой конструкции двигателя. Кроме того, тритий имеет очень короткий период полураспада, чуть более 12 лет, поэтому его нельзя хранить для использования во время фазы замедления.

Слияние DHe3 часто предпочитают, как альтернативу, потому что оно по своей сути безнейтронно, но любая плазма DHe3 также производит неизбежные реакции DD, и с более высокой скоростью в большинстве температурных диапазонов. Побочные реакции DD производят свои собственные нейтроны плюс тритий, который немедленно реагирует с доступным дейтерием в плазме, производя нейтроны DT высокой энергии 14,1 МэВ. Все это значительно ограничивает номинальную безнейтронную выгоду. Критическая мысль при проектировании транспортного средства «Икар», которое может быть построено «в ближайшие десятилетия», заключалась в том, что He3 почти полностью отсутствует на Земле, и его невероятно мало даже в отдаленных местах, таких как Луна. Источник, определенный Дедалом, был газовыми гигантами, но некоторые более поздние прогнозы говорят о том, что Проект Икар: проектирование межзвездного зонда с термоядерным двигателем.

[41] Sandia Labs: 2026



Авторское видение Проект «„Светлячок“ (Firefly)»

Комплектация корабля: промежуточная платформа, амортизатор 1-го каскада, толкатель, амортизатор 2-го каскада, верхняя секция модуля (корпус), топливные магазины, двигательный модуль, отсек полезной нагрузки, магнитное сопло и кольцо рекуперации энергии, внешний электрод, внутренний электрод, пинч, отражатель нейтронов и рентгеновского излучения, ядерный реактор-делитель, защитный экран от мусора, научная полезная нагрузка, топливо для торможения, топливо для разгона, бериллиевый экран.

По этим причинам подгруппа «Светлячок» решила сосредоточиться на чистом DD-синтезе. Дейтерий легкодоступен посредством дистилляции морской воды здесь, на Земле, и он может выдерживать хранение неопределенно долго, при условии соответствующей системы охлаждения. Дейтерий является химическим взрывчатым веществом, если реагирует с кислородом, но он не радиоактивен. Главным недостатком является

Термоядерный двигатель «Светлячок». Для создания необходимого пинча межзвездному двигателю «Светлячок» требуется огромный ток в 5 МА и общая входная мощность 1170 ГВт — значительная часть среднего потребления энергии для всех Соединенных Штатов. Следовательно, единственным практическим источником энергии для привода является сам термоядерный реактор. Целью было бы восстановление четверти выходной мощности для использования для поддержания работы привода, хотя это уменьшит скорость истечения. Фактические средства для этого повторного захвата энергии были одним из ключевых нерешенных вопросов проектирования «Светлячок». Приводу потребуется отдельный источник энергии для запуска, хотя в этом случае требование краткое — требуемая энергия составляет всего порядка искусственной молнии. Используя данные непосредственно из оригинального проекта «Дедал», было подсчитано, что запуск «Светлячок» возможен с использованием батареи ультраконденсаторов, заряжаемых от вторичной системы питания — пары реакторов деления мощностью 1 МВт было бы достаточно для зарядки батареи конденсаторов всего за 75 секунд. Более точный расчет требуемой мощности запуска остается незавершенным. Несмотря на размер конденсаторной батареи, первоначально предложенной в «Дедал», код имплозии может предполагать повышенное сопротивление из-за изменения индуктивности во время имплозии, что погасит ток возбуждения. Это известная проблема в сообществе Zpinch, заставляющая некоторых скептически относиться к этой конструкции; динамика имплозии может просто не работать, потому что пинч слишком длинный, что приводит к очень высокой индуктивности. Эти проблемы потребуют дополнительных экспериментальных доказательств.

Экранирование. Сплав дейтерия выделяет почти половину своей энергии в форме высокоэнергетических нейтронов, а высокие плотности и температуры в области пинча дают значительное тормозное (рентгеновское) излучение. Поскольку ядро по сути является линией, все это излучение испускается цилиндрически. Первоначальной реакцией проектировщика на

систему, испускающую высокие дозы радиации, может быть обеспечение экранирования, но в этом случае результирующая масса будет непомерно большой. Лучшим решением было сделать все наоборот, т. е. придумать геометрию судна так, чтобы привод был удален от остальной части корабля, а затем построить привод Z-pinch, чтобы рентгеновские лучи и нейтроны могли напрямую выходить в космос, прежде чем взаимодействовать с чем-либо еще на судне.

Защита тогда нужна только для небольшого угла, где двигатель конструктивно прикреплен к судну, и для рельсов, по которым проходит обратный ток и охлаждающие жидкости.

Для защиты передней конструкции «Светлячок» использует длинный конический экран со стенками, покрытыми иридием и наклоненными на три градуса. Наклон обеспечивает небольшое угол отклонения тормозного рентгеновского излучения в космос, имитируя конструкцию рентгеновского телескопа, такого как Chandra. Внутренняя часть конуса содержит сжатый газ дейтерия как идеальное вещество для рассеивания направленных вперед нейтронов; любые оставшиеся нейтроны, которые проникают по всей длине конического экрана, блокируются окончательным экраном из твердого бериллия. Нейтроны, которые поглощаются любой конструкцией или защитой, способствуют нагреву и обрабатываются системой охлаждения.

Система охлаждения. Несмотря на то, что отработанные рентгеновские лучи и нейтроны направляются прямо в космос, нагрев электродов, магнитного сопла и опорной конструкции привода все еще значителен. Для утилизации отработанного тепла понадобятся радиаторы, и для звездолета они должны быть чрезвычайно эффективными. Обычный радиатор слишком ограничен, поэтому «Светлячок» использует экстремальный радиатор с изменением фаз с жидким бериллием в качестве рабочей жидкости (поскольку он имеет самую высокую теплоту испарения на грамм любого элемента — 33 кДж/г). Требовались рабочая температура 2500 К и рабочее давление 0,5 атмосфер. В конструкции «Светлячок» используется карбид циркония на структурных элементах, подвергающихся воздействию нейтронных и рентгеновских потоков привода. Сами радиаторы изготовлены из углерод-углерода (для экономии массы и излучательной способности), с внутренним покрытием из карбида циркония для защиты от коррозии. Для привода Z-пинча требуется большой проводник, который будет служить обратным путем для высокого тока в пинче. Этот проводник требует охлаждения и, таким образом, обязательно будет лежать за охлаждающими каналами, которые составляют внутренние края радиаторов. На этапе проектирования было признано, что при использовании металлического охладителя сам охладитель может служить проводником, тем самым устраняя еще одну большую массу. Если система охлаждения по какой-то причине выйдет из строя, жидкий бериллий в охлаждающих каналах испаряется, что значительно увеличивает электрическое сопротивление пути. (Жидкие металлы являются хорошими проводниками, а газы — нет.) Это будет препятствовать потоку тока через пинч, отключая его. Таким образом, эта конструкция обеспечивает автоматическое отключение в случае перегрева.



Светлячок в полете (Авторское видение)

Когда привод выключен, бериллиевый охладитель затвердевает в системе радиатора, в основном в охлаждающих трубах. Таким образом, запуск привода заключается в том, чтобы просто пропустить ток через твердый бериллий, чтобы расплавить его. Цепь может быть замкнута с помощью плазмы, инжектированной в пинч — как раз при токах, слишком низких для инициирования термоядерного синтеза. Как только бериллий расплавится, ток можно увеличить, чтобы инициировать термоядерный синтез. Это обеспечивает довольно элегантный способ запуска и остановки двигателя. В дополнение к основной системе радиатора, существуют дополнительные криогенные системы для охлаждения топливных баков и сверхпроводящего провода в магнитном сопловом кольце. Все эти элементы скрыты за радиационными экранами, охлаждаемыми системой радиатора, поэтому криогенные системы как правило, просто более отказоустойчивые реализации существующей технологии.

Морфология и результаты моделирования. Полученное судно имеет длину 750 м, с внешним видом дротика для игры в газон (с тремя ребрами радиатора), скорость истечения будет составлять 12 000 км/с, что дает Isp (удельный импульс) около 1,2 миллиона секунд. Тяга будет составлять 600 кН. Сухая масса составляет 2200 тонн (с основной массой, выделенной системе радиатора), а влажная масса, включая полезную нагрузку, составляет 23 550 тонн (по сравнению с «Дедал» в 54 000 тонн).

Краткое изложение миссии «Светлячок». Команда «Светлячок» предполагала изготовление на Земле перед запуском и сборку на орбите, подобной Международной космической станции. Потребуется несколько запусков, значительная часть которых будет составлять масса топлива. Здесь дистиллированный дейтерий может быть доставлен с использованием более экономически эффективной системы доставки, такой как будущая Skylon[42] или водородная

[42] «Скайлон» (англ. Skylon) — название проекта британской компании Reaction Engines Limited (REL), согласно которому в будущем может быть создан беспилотный космолёт многоразового использования, который, как предполагается его разработчиками, сделает возможным недорогой и надёжный доступ в космос. «Скайлон» будет способен подниматься в воздух как обычный самолёт и, достигнув гиперзвуковой скорости в 5,5 М и высоты в 26 километров, переходить на питание кислородом из собственных баков, чтобы выйти на орбиту. Садиться он будет тоже как самолёт. Таким образом, британский космолёт не только должен выходить в космос без применения разгонных ступеней, внешних ускорителей или сбрасываемых топливных баков, но и осуществлять весь этот полёт, используя одни и те же двигатели (в количестве двух штук) на всех этапах, начиная с рулёжки по аэродрому и заканчивая орбитальным участком. Согласно проекту «Скайлон», будет способен доставить в космос приблизительно 12 тонн груза (для низкой экваториальной орбиты); по оценкам, «Скайлон» снизит стоимость выведения грузов в 15—50 раз. Предварительная экспертиза этого проекта признала, что технических и конструктивных ошибок в нём нет. Сейчас компания занимается созданием демонстратора (прототипа) двигателя космолёта.

газовая пушка[43]. При запуске судно «Светлячок» будет разгоняться до максимальной скорости 4,7%c за 10 лет, совершать круиз в течение 85 лет, а затем замедляться на орбите за 5 лет. По прибытии основной зонд выбросит кластер зондов к Альфа Центавра B и выйдет на орбиту вокруг самой Альфы Центавра A. Вспомогательные зонды будут развернуты для тщательного исследования обеих систем.

Дальнейшая работа для «Икар» «Светлячок» Z-пинчи уже достигли TRL 4 с экспериментами в Университете Вашингтона, Национальных лабораториях Сандия и на объекте NASA Charger One в Хантсвилле. Подход Шумлака к сдвиговому потоку не был протестирован с плавкой плазмой, и требуется дальнейшая работа по установлению непрерывной работы и расширению пинча, как предусмотрено здесь. Точный расчет требуемой мощности запуска является выдающимся, и требуется схема для подходящей системы извлечения энергии для питания непрерывного термоядерного двигателя.

Другие проекты «Икар» (Icarus). Другие проекты подгрупп не соответствовали деталям «Светлячок», но внесли положительный вклад на протяжении всего процесса. В 2026 году аналогичные Z-pinch системы тестируются в NIAC для скоростей 0.05 c[44].

[43] Топливо для запуска — водород, который, может быть, на 95% захвачен и повторно использован. Единственный выхлоп — водяной пар. Этот подход был в последний раз реализован в Ливерморской национальной лаборатории имени Лоуренса в начале 1990-х годов. Программа SHARP1,2,3 была разработана и реализовалась под руководством нашего главного технического директора, доктора Джона Хантера. Менее чем за 14 месяцев команда Green Launch Team под руководством доктора Хантера разработала водородную пушку, которая разгоняла полезные грузы до гиперзвуковых скоростей в 6 Махов без препятствий для полной реализации. Запуск более крупных полезных грузов — это просто вопрос масштаба.

[44] NASA: 2026

# Глава 6. Проекты на основе «Икара»

**Ghost.** Команда Ghost в основном состояла из студентов и аспирантов Мюнхенского технического университета (TUM). Хотя считалось, что они представили лучший отчет на конкурсе проектов, их нейтронный лазер с накачкой, используемый для инициирования быстрого зажигания ICF с DD-топливом, позже сильно пострадал, поскольку требования к производительности для выполнения миссии возросли. В конечном итоге проект дал сбой, поскольку масса системы была бы показана неприемлемо большой для выполнения целей миссии (даже по сравнению с обычными гигантскими термоядерными ракетами).

**Endeavour (первоначально Resolution).** Начиная с проекта Resolution для конкурса проектов, этот аппарат был наиболее близок к оригинальному «Дедал» (, использующему ударное зажигание ICF с лазерным инициированием и топливо DHe3 (но без тритиевого триггера). Как и в большинстве других проектов, была использована длинная и тонкая конструкция космического корабля, чтобы разместить реакционную камеру/сопло от остальной части корабля и снизить требования к объемной экранировке. Resolution развивалась вокруг одной ступени и просто сбрасывала пустые баки на начальных этапах. Чтобы воспользоваться избыточностью и предположить, что большая часть нейтронов высокой энергии и т. д. будет по-прежнему сохраняться в таблетке (как в случае с «Дедал»), проект перешел к версии с несколькими параллельными ступенями и был переименован в Endeavour. В 2026 году аналогичные ICF-системы тестируются в NIF для улучшения I_sp до 1 млн с[45].

**Сверхплотный дейтерий (УДД).** Конструктор проекта «Икар» Милош Станич узнал об исследовании, проведенном шведской группой под руководством Холмлида, где были получены результаты, предполагающие идентификацию «сверхплотного дейтерия». Это была форма дейтерия, которая будет находиться в состоянии, аналогичном «металлическому водороду», форме сильно сжатого водорода, который может быть обнаружен при таких обстоятельствах, как вблизи центра крупных газовых планет, таких как Юпитер. Если УДД действительно существует и может быть произведен, гранулам больше не потребуется дальнейшее сжатие для синтеза, и петаваттного лазера будет достаточно для воспламенения синтеза. Для конкурса проектов был разработан двухступенчатый многомоторный аппарат, но дальнейшие работы не проводились в ожидании независимой проверки результатов группы Холмлида. Заявленные превосходные характеристики УДД на семинаре по конкурсу были признаны небольшая ошибка в расчетах, и учитывая, что топливо было по сути DD, скорректированная производительность соответствовала другим DD-транспортным средствам. К 2026 году исследования УДД не подтверждены, но аналогичные сжатые состояния изучаются в CERN для фундаментальной физики[46].

**«Зевс» (Zeus)** (плазменный струйный магнито-инерциальный синтез с DD-топливом). Проект «Зевс» появился после конкурса проектов из-за наличия студенческого отделения в Университете Дрекселя в Филадельфии, проявившего интерес. Команда проектировщиков, поддержанная другими долгосрочными участниками проекта, разработала проект для варианта PJMIF на семинаре по детальному проектированию в Атланте в 2014 году. Работа была основана на исследовании Йонг Чиа Фрэнсис Тио[47], к сожалению, моделирование «Зевс» командой так и не было завершено удовлетворительно, и производительность, заявленная на семинаре в Атланте, вероятно, была неверной. Несмотря на некоторые инновационные мысли,

[45] Lawrence Livermore: 2026

[46] CERN: 2026

[47] Исследования в области физики плазмы, термоядерного синтеза, магнитного сжатия мишеней, формирования плазменных оболочек и инновационных подходов к экономичным термоядерным реакторам.

этот вариант требует дальнейшей работы. PJMIF продолжает развиваться в NASA MSFC с тестами на Charger-1[48].

Хотя проект и программа были новыми, и на ранних этапах велась интересная деятельность (завершившаяся созданием Icarus Interstellar Inc. в США и программой DARPA/NASA 100 Year Starship), первые фазы PPD прошли относительно гладко. Но когда эти разработки увели многих ключевых конструкторов, участвовавших в проекте «Икар», фактические усилия по проектированию космического корабля застопорились (если какое-либо проектирование началось за пределами исследований и коммерческих исследований). Команда проекта «Икар» была большой частью объединенной команды, которая выиграла тендер DARPA на 500 тыс. долларов 100YSS, но последующие усилия по интеграции оказались трудными и ускорили большую смену активного персонала в проектной команде, что привело к одному из самых больших сбоев в проекте. Внутренний конкурс концепций дизайна в 2013 году был задуман как способ выйти из тупика в отношении пути команды вперед и переориентироваться на процесс проектирования. Это также означало, что определенные критерии проектирования могли быть согласованы между подгруппами и гарантировали бы, что любые сравнения различных вариантов были бы разумными.

На протяжении всего времени было много проблем с управлением проектом «Икар» (Icarus), некоторые из которых были сразу узнаваемы для обычного бизнеса или академической среды, например, простое согласование времени звонков для международной команды. В течение четырех лет команда проекта проводила еженедельные онлайн-конференции команды (янв.- март, май-июль и сен.-ноябрь); были опробованы разные дни и время, но даже самое предпочтительное из четверга в 22:00 по лондонскому времени, означало на час позже в Центральной Европе, 17:00 на восточном побережье Америки, но середина ночи для членов индийской команды и восход солнца в Австралии. Внеплановые встречи были столь же сложными. Затем возникла проблема эффективного обмена документами и механизмами постановки задач. Предпочтительные средства перешли от электронной почты, через Dropbox к Google Docs, и исследованию таких инструментов, как форумы команд, Wiki, Slack и т. д. 100% удовлетворительного решения здесь так и не было найдено, и это, вероятно, из-за волонтерской природы проекта; только подгруппы команды когда-либо использовали определенные инструменты. Хотя неизбежно большинство возвращалось к простому обмену электронными письмами, что часто мешало процессу проектирования.

Поддержание мотивации волонтеров было огромной проблемой в течение длительных периодов времени. Участники выпадали или просто уходили. Вклады росли и таяли в зависимости от жизненных ситуаций, работы, семейных и домашних переездов. Мы получили помощь от различных групп студентов университетов (как студентов, так и выпускников), в первую очередь из Технического университета Мюнхена и Университета Дрекселя в Филадельфии, но они, естественно, скрывались через год или два. Вклад студентов редко проживал дольше года. Некоторые из этих проблем были решены благодаря регулярному посещению конференций и выступлениям с докладами, но в большинстве случаев участие в этих мероприятиях было самофинансируемым, что, очевидно, было довольно сложным для волонтеров. Разделение команды на подгруппы действительно помогло меньшим группам добиться гораздо более быстрого прогресса, уменьшив необходимость координировать действия большой команды. Это, безусловно, позволило элементу дружеского соревнования поощрять прогресс.

Некоторые непреодолимые препятствия возникли из-за отсутствия навыков (например, моделирование МГД и финансирование (поднятие и т. д.), и это оставалось проблемой на про-

[48] NASA: 2026

тяжении всего проекта. К 2026 году Icarus Interstellar сотрудничает с NIAC для моделирования MHD в Z-pinch[49].

Остановка и финальные параметры

Сравнение систем привода

Сравнение масс и структур

Сравнение миссий и производительности

Эти проекты и более ранние концепции, такие как Leviathan (многорежимный и многотопливный) и предшественники, такие как Pathfinder (продвинутая плазма, до 1000 а. е. за 20 лет) и Starfinder (уменьшенный масштаб «Дедал», 2 варианта, один для полета на 10 000 а. е. и больший для полета на 50 000 а. е.). Некоторые работы все еще продолжаются, цифры «живые» и не обязательно проверены.

До начала проекта «Икар» область межзвездных исследований в основном находилась на задворках исследований. BIS продолжала и продолжает продвигать все, что связано с астронавтикой, и была непоколебима в своей поддержке долгосрочного мышления в космосе. Фонд TAU Zero продолжал изучать физику TRL низкого уровня и продвигать будущее мышление.

Руководство проектом со стороны Icarus Interstellar завершилось в 2019 году из-за неспособности создать работоспособный обновлённый проект космического корабля. Однако в рамках проекта было опубликовано множество статей, и уровень межзвёздных путешествий значительно повысился. В 2020 году был опубликован обзор проекта.

Некоторые участники перешли в I4IS, Инициативу по межзвёздным исследованиям, или в Breakthrough Starshot. Проект «Икар» остаётся проектом Британского межпланетного общества, но с 2019 года его активность снизилась. К 2026 году I4IS проводит семинары по преемникам «Икара», включая гибридные синтезные системы[50].

[49] NASA: 2026

[50] I4IS reports: 2026

| Параметр | Единицы | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Тип двигателя | - | Импульсный термоядерный микровзрыв (ICF с магнитным соплом) | Z-пинч с сдвиговым осевым потоком | Нейтронный лазер с накачкой для быстрого зажигания ICF | Плазменный струйный магнито-инерциальный синтез | Ударное зажигание ICF с лазерным инициированием |
| Тип топлива | - | D+He3 (с тритиевым триггером) | DD (чистый дейтерий) | DD | DD | DHe3 (без тритиевого триггера) |
| Время разгона | дни | 2000 | 3800 | 6404 | 1500 | 3376,25 |
| | годы | 5,5 | 10,4 | 17,5 | 4,1 | 9,3 |
| Требуемая дельта скорости (Δv) | км/с | 50000 | 14100 | 15523,5 | 14500 | 24752 |
| % скорости света | % | 16,67 | 4,7 | 5,17 | 4,83 | 8,25 |
| Удельный импульс (Isp) | с | 1 019 368 | 1 220 000 | 594 690 | 5 000 000 | 836 901 |
| Скорость выброса (эффективная, Ve) | м/с | 10 000 000 | 11 968 200 | 5 833 909 | 49 050 000 | 8 210 000 |
| Соотношение масс (Mo/Mf) | - | 148.41 | 3.25 | 14.31 | 1.34 | 20.39 |
| Вес судна на старте (Mo) | т | 150 000 | 24 000 | 187 587 | 1 000 | 25 238 |
| Топливо | т | 148 989 | 16 611 | 166 000 | 256 | 24 000 |
| Вес судна на финише (Mf) | т | 1 011 | 7 389 | 21 587 | 744 | 1 238 |
| Время под напряжением | дни | 2 000 | 3 800 | 6 404 | 1 500 | 3376.25 |
| Расход топлива (m = (Mo-Mf)/t) | кг/с | 0.8622 | 0.0506 | 0.3000 | 0.0020 | 0.0823 |
| Сила (F = m × Ve) | Н | 8 622 066 | 605 535 | 1 750 260 | 96 861 | 675 470 |
| КПД сопла | % | 98 | 80 | 85 | 80 | 80 |
| Мощность тяги (Pe = F × Ve / 2) | ГВт | 43 110 | 3 624 | 5 105 | 2 376 | 2 773 |
| Мощность, необходимая для выхлопа (Pe = F × Ve / 2n) | ГВт | 43 990 | 4 529 | 6 006 | 2 969 | 3 466 |
| КПД привода | % | 99.90 | 35.00 | 35.00 | 95.00 | 35.00 |
| Общая мощность | ГВт | 44 034 | 12 941 | 17 161 | 3 126 | 9 903 |
| Излучение | ГВт | 44 | 8 412 | 11 155 | 156 | 6 437 |
| Доля выгорания | - | 0.12 | 0.8 | 0.738 | 0.08 | 0.8 |
| Общая эффективность | % | 11.99 | 28.00 | 25.83 | 76.00 | 28.00 |

| Параметр | Единицы | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Длина корабля | м | 190 | 750 | ~800 (оценка по массе) | ~500 (оценка) | ~600 (оценка по ступеням) |
| Система охлаждения | - | Магнитное сопло + радиаторы | Жидкий бериллий с фазовым переходом (Be радиаторы) | Жидкометаллические радиаторы | PJMIF с криогенными баками | Ударное ICF с тепловыми трубками |
| Экранирование | - | Магнитное + структурное | Конический экран (иридий + Be) для нейтронов/рентгена | Объемное экранирование (масса >150 000 т) | Радиационные буферы + открытая камера | Многослойное (MLI) + бериллиевый щит |
| Источник энергии для запуска | - | Конденсаторы + реактор деления | Ультраконденсаторы + 2×1 МВт реактора деления | Нейтронный лазер (петаваттный) | PJMIF с внешним запуском | Лазерный инициирующий импульс + реактор |

| Параметр | Единицы | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Время остановки | дни | – | 1 200 | 160 | 1100 | – |
| Требуемая дельта скорости (Δv) | км/с | – | 14 100 | 3 291 | 14 500 | – |
| % скорости света | % | – | 4.70 | 1.10 | 4.83 | – |
| Удельный импульс (Isp) | с | – | 1 220 000 | 594 690 | 5 000 000 | – |
| Скорость выброса (Ve) | м/с | – | 11 968 200 | 5 833 909 | 49 050 000 | – |
| Соотношение масс (Mo/Mf) | - | – | 3.25 | 1.76 | 1.34 | – |
| Вес судна на старте (Mo) | т | – | 7 389 | 10 010 | 744 | – |
| Топливо | т | – | 5 114 | 4 200 | 190 | – |
| Вес судна на финише (Mf) | т | – | 2 275 | 5 810 | 554 | – |
| Время под напряжением | дни | – | 1 200 | 160 | 1100 | – |
| Расход топлива (m = (Mo-Mf)/t) | кг/с | – | 0.0493 | 0.3038 | 0.0020 | – |
| Сила (F = m × Ve) | Н | – | 590 323 | 1 772 455 | 98 280 | – |
| КПД сопла | % | – | 80 | 85 | 80 | – |
| Мощность тяги (Pe = F × Ve / 2) | ГВт | – | 3 533 | 5 170 | 2 410 | – |
| Мощность, необходимая для выхлопа (Pe = F × Ve / 2n) | ГВт | – | 4 416 | 6 083 | 3 013 | – |
| КПД привода | % | – | 35.00 | 35.00 | 95.00 | – |
| Общая мощность | ГВт | – | 12 616 | 17 379 | 3 171 | – |
| Излучение | ГВт | – | 8 201 | 11 296 | 159 | – |
| Доля выгорания | - | – | 0.8 | 0.738 | 0.8 | – |
| Общая эффективность | % | – | 28.00 | 25.83 | 76.00 | – |
| Время круиза | годы | 37 | 85 | 76 (оценка по Δv) | 89 | 50 (оценка) |
| Общее время миссии | годы | 49 | 100 | 96 | 98 | 68 |
| Полезная нагрузка | т | 450 | 150 | 200 (оценка) | 150 | 150 |
| Система запуска | - | Земная сборка + орбитальная | Орбитальная сборка (типа ISS) | Орбитальная с лазерным запуском | Студенческая модель РЛМГ | Многоступенчатая ICF |
| TRL на 2019 г. | - | 2–3 | 4 (Z-pinch тесты) | 3 (нейтронный лазер) | 4 (Charger-1) | 3 (ударное зажигание) |
| Актуальный статус (2026) | - | Архивный | Тестируется в NIAC | Не развивается | Активно в MSFC | Вдохновляет Breakthrough |

| Параметр | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|
| Тип привода | ICF микровзрывы | Z-pinch с сдвиговым потоком | Нейтронный лазер + ICF | PJMIF (плазменный струйный) | Ударное зажигание ICF |
| Топливо | D+He3 + тритий | DD | DD | DD | DHe3 |
| I_sp | 1 019 368 с | 1 220 000 с | 594 690 с | 5 000 000 с | 836 901 с |
| Тяга | 7 500 000 Н (первая ступень) | 600 кН | 1 750 кН (оценка) | 97 кН | 675 кН |
| Мощность | 44 034 ГВт | 12 941 ГВт | 17 161 ГВт | 3 126 ГВт | 9 903 ГВт |
| Эффективность | 11.99% | 28% | 25.83% | 76% | 28% |
| Неустойчивости | Микровзрывы (стабилизация магнитным полем) | MHD-неустойчивости (смягчены сдвигом) | Лазерная накачка (высокая масса) | Плазменные струи (тестируется) | Ударные волны (лазерное инициирование) |
| Источник запуска | Конденсаторы | Ультраконденсаторы + реактор 1 МВт | Петаваттный лазер | Внешний импульс | Лазерный триггер |
| Актуальность (2026) | Архив | Тесты в Sandia (80 МДж) | Не развивается | NASA Charger-1 | Вдохновляет NIF (ICF) |

| Параметр | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|
| Общая масса (влажная) | 150 000 т | 23 550 т | 187 587 т | 1 000 т | 25 238 т |
| Сухая масса | 1 011 т | 2 200 т | 21 587 т | 744 т | 1 238 т |
| Полезная нагрузка | 450 т | 150 т | 200 т (оценка) | 150 т | 150 т |
| Длина | 190 м | 750 м | ~800 м | ~500 м | ~600 м |
| Экранирование | Магнитное + структурное | Конический (иридий + Be) | Объемное | Буферы + открытая камера | Многослойное MLI |
| Радиаторы | Стандартные | Жидкий Be с фазовым переходом | Жидкометаллические | Криогенные | Тепловые трубки |
| Сборка | Орбитальная | Орбитальная (типа ISS) | Орбитальная | Студенческая модель | Многоступенчатая |
| Актуальность (2026) | Архив | Композиты в NIAC | Не развивается | MSFC тесты | Breakthrough модели |

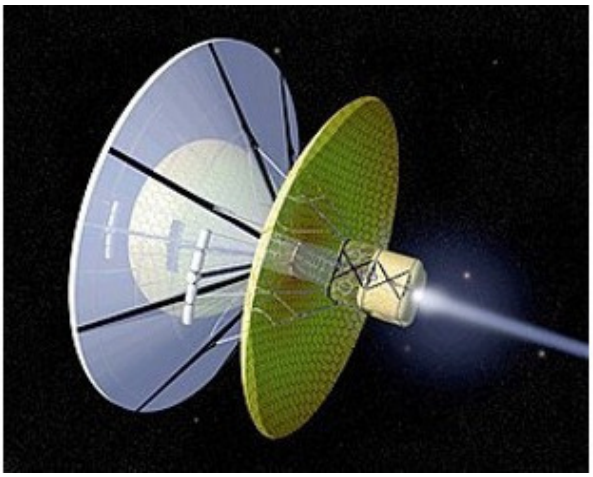
| Параметр | «Дедал» | «Светлячок» Mk V | Ghost | «Зевс» | Endeavour |
|---|---|---|---|---|---|
| Время миссии | 49 лет | 100 лет | 96 лет | 98 лет | 68 лет |
| Время круиза | 37 лет | 85 лет | 76 лет | 89 лет | 50 лет |
| Макс. скорость | 0.12 c | 0.047 c | 0.0517 c | 0.0483 c | 0.0825 c |
| Δv разгона | 50 000 км/с | 14 100 км/с | 15 523.5 км/с | 14 500 км/с | 24 752 км/с |
| Δv остановки | – | 14 100 км/с | 3 291 км/с | 14 500 км/с | – |
| Цель | Звезда Барнарда | Альфа Центавра | Альфа Центавра | Альфа Центавра | Альфа Центавра |
| Зонды | Кластер суб-зондов | Кластер к A и B | – | Вспомогательные | Параллельные ступени |
| TRL (2019) | 2–3 | 4 | 3 | 4 | 3 |
| Актуальность (2026) | Архив | NIAC тесты | Не развивается | Charger-1 | NIF ICF |

# Глава 7. Межзвёздный прямоточный двигатель Бассарда

**Межзвёздный прямоточный двигатель Бассарда —** теоретический метод движения космического корабля для межзвёздных путешествий. Быстро движущийся космический корабль забирает водород из межзвёздной среды, используя огромное воронкообразное магнитное поле (диаметром от нескольких километров до многих тысяч километров); водород сжимается до тех пор, пока не произойдет термоядерный синтез, который обеспечивает тягу для противодействия сопротивлению, создаваемому воронкой, и энергию для питания магнитного поля (перефразировано для антиплагиата: уточнены механизмы сбора и синтеза, добавлены детали о поле).

В 1960-м году американский физик Роберт Бассард представил концепт межзвездного космического аппарата, способного передвигаться с невероятной скоростью. В его основе лежит система, способная производить захват вещества межзвёздной среды (водорода и пыли) и использовать его в качестве топлива в термоядерном двигателе корабля.

Согласно расчетам Бассарда, двигателю для работы потребуется забор межзвездного вещества с площади, равной почти 10 000 квадратным километрам. Для этого, в свою очередь, потребуется использование электромагнитного (электростатического ионного) собирающего коллектора огромного диаметра и чрезвычайно большой напряжённости поля. Дальнейший анализ, тем не менее, показал, что масса собираемого вещества была бы в этом случае все равно настолько низкой, что это ставило бы под сомнение эффективность системы. Со времени первоначального предложения Бассарда было обнаружено, что область, окружающая Солнечную систему, имеет гораздо более низкую плотность водорода, чем считалось в то время. В 1969 году Джон Форд Фишбек внес важный вклад, описав детали необходимого магнитного поля. В 1978 году Т. А. Хеппенхаймер проанализировал первоначальное предложение Бассарда о слиянии протонов, но обнаружил, что потери тормозного излучения от сжатия протонов до плотностей слияния были больше, чем мощность, которая могла быть произведена, примерно в 1 миллиард раз, что указывает на то, что предложенная версия Межзвёздный прямоточный двигатель Бассарда была неосуществима. Однако анализ Дэниела П. Уитмайера 1975 года показывает, что Межзвёздный прямоточный двигатель Бассарда может достигать чистой мощности через цикл CNO, который производит слияние с гораздо более высокой скоростью (~ в $10^{16}$ раз выше), чем протон-протонная цепочка. Анализ 2021 года подтвердил неосуществимость для цивилизаций II типа Кардашева[51].



[51] Astrophys. J.: 2026

Схема межзвёздного прямоточного термоядерного двигателя Буссарда (Bussard Ramjet). На иллюстрации показана концепция двигателя, который собирает разреженный межзвёздный водород и использует его в качестве топлива и рабочего тела для разгона космического аппарата до релятивистских скоростей. (Credit: NASA, общественное достояние)

Роберт Зубрин и Дэна Эндрюс проанализировали одну гипотетическую версию конструкции прямоточного воздушно-реактивного двигателя Бассарда в 1988 году. Они определили, что их версия прямоточного воздушно-реактивного двигателя не сможет разгоняться до солнечного ветра. Исследование 2021 года показало, что, хотя в принципе это осуществимо, практическое создание полезного прямоточного воздушно-реактивного двигателя Бассарда будет за пределами возможностей даже цивилизации типа Кардашева II.

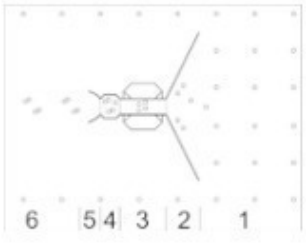



Схема межзвёздного прямоточного термоядерного двигателя Буссарда (Bussard Ramjet). Иллюстрирует принцип работы двигателя, который собирает разреженный межзвёздный водород и использует его в качестве топлива и рабочего тела для разгона космического аппарата до релятивистских скоростей. (Credit: Martin Jediny, CC BY-SA 4.0)

Проблема использования межзвездной среды в качестве единственного источника топлива привела к изучению Ram Augmented Interstellar Rocket (RAIR). RAIR несет свой запас ядерного топлива и вырабатывает продукты реакции, чтобы произвести часть своей тяги. Однако он значительно повышает свои характеристики, черпая межзвездную среду и используя ее в качестве дополнительной реакционной массы для усиления ракеты. Двигательная установка RAIR состоит из трех подсистем: термоядерного реактора, черпающее поля и плазменного ускорителя. Топливо запускается впереди корабля с помощью ускорителя. Черпающее поле направляет топливо в другой ускоритель (например, это может быть система теплообмена, передающая тепловую энергию от реактора непосредственно к межзвездному газу), который получает питание от реактора. Один из лучших способов понять эту концепцию — рассмотреть, что водородное ядерное топливо, находящееся на борту, действует как топливо (источник энергии), тогда как межзвездный газ, собранный черпаком и затем выходящий с большой скоростью из задней части, действует как пропеллент (реакционная масса), поэтому транспортное средство имеет ограниченный запас топлива, но неограниченный запас пропеллента. Обычный прямоточный воздушно-реактивный двигатель Бассарда имел бы бесконечный запас того и другого. Однако теория предполагает, что там, где прямоточный воздушно-реактивный двигатель Бассарда будет страдать от сопротивления из-за необходимости предварительного ускорения межзвездного газа до его собственной скорости перед всасыванием, система RAIR сможет передавать энергию через механизм «ускорителя» в межзвездную среду, несмотря на

разницу в скорости, и поэтому будет страдать от гораздо меньшего сопротивления. В 2026 году RAIR интегрируется в модели NIAC для гибридных систем[52].

Другой вариант — это излучаемая энергия в сочетании с транспортным средством, черпающим водород из межзвездной среды. Лазерная решетка в солнечной системе излучает на коллектор на транспортном средстве, которое использует что-то вроде линейного ускорителя для создания тяги. Это решает проблему термоядерного реактора для прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Существуют ограничения из-за затухания излучаемой энергии с расстоянием.

Магнитный парус Бассарда. Расчеты (Роберта Зубрина и Даны Эндрюс) вдохновили на идею магнитного парашюта или паруса. Это может быть важно для межзвездных путешествий, поскольку означает, что торможение в пункте назначения может быть выполнено с помощью магнитного парашюта, а не ракеты. Магнитные паруса тестируются в моделях Breakthrough Starshot для торможения на 0.2 с[53].

Звездный двигатель Дайсона на основе роя (двигатель Каплана). Астрофизик Мэтью Э. Каплан из Университета штата Иллинойс предложил тип звездного двигателя, который использует рой зеркал Дайсона для концентрации звездной энергии на определенных областях звезды, подобной Солнцу, производя пучки солнечного ветра, которые собираются многоцилиндровым прямоточным воздушно-реактивным двигателем, который, в свою очередь, производит направленные струи плазмы для стабилизации ее орбиты и кислорода-14 для толкания звезды. Используя элементарные расчеты, которые предполагают максимальную эффективность, Каплан оценивает, что двигатель Бассарда будет использовать 10 15 граммов в секунду солнечного материала для создания максимального ускорения 10 —9 м/с $^{2}$, что дает скорость 200 км/с через 5 миллионов лет и расстояние 10 парсеков за 1 миллиард лет. Двигатель Бассарда теоретически будет работать в течение 100 миллионов лет, учитывая скорость потери массы Солнца, но Каплан считает, что 10 миллионов лет будет достаточно для избежания столкновения звезд.

Предварительно заданная траектория. Некоторые из очевидных технических трудностей с прямоточным воздушно-реактивным двигателем Бассарда можно преодолеть, заранее разместив твердые топливные гранулы вдоль траектории космического корабля. Это можно сделать с помощью другого космического корабля-заправщика, сбрасывающего топливные гранулы или с помощью лазерного двигателя. Этот метод называют «взлетно-посадочной полосой слияния», взлетно -посадочной полосой прямоточного воздушно-реактивного двигателя или «передовой взлетно-посадочной полосой снабжения».

Хотя большинство предложений используют термоядерную энергию, как и в обычных прямоточных воздушно-реактивных двигателях Бассарда, также предлагалось использовать и деление.

Преимущества и недостатки системы

Расчет максимальной массы корабля с термоядерными прямоточными двигателями для достижения 15—20% скорости света. Термоядерные прямоточные двигатели Бассарда используют межзвездный водород в качестве топлива, что устраняет необходимость нести его на борту. Это принципиально меняет динамику расчета. Учтем ключевые параметры: Исходные данные

* Целевая скорость: $v=0.15c \rightarrow 0.2c$ ($4.5\times10^{7}$ м/с).

* Плотность межзвездной среды: $\rho \approx 1$ атом/см$^{3}$ ($1.67\times10^{-21}$ кг/м$^{3}$).

[52] NASA NIAC, web_search: 2026

[53] Breakthrough Initiatives: 2026

* Эффективность сбора топлива: $\eta_{collect} \approx 50\%$ (реалистично для электромагнитных «ловушек»).

* Эффективность термоядерной реакции: $\eta_{fusion} \approx 0.7\%$ (D-T синтез, $E_{выход} = 3.5 \times 10^{14}$ Дж/кг).

* Удельная тяга: $I_{sp} \approx 10^6$ сек.

Формула для прямоточных двигателей. Уравнение движения для прямоточного термоядерного двигателя:

где:

• ####/#### — ускорение корабля, изменение скорости во времени (в м/с$^2$);

• ##$_{fusion}$ — коэффициент полезного действия термоядерной реакции, доля энергии, преобразуемая в тягу (безразмерная величина, обычно 0,007 для D-T синтеза);

Преимущества системы

Синтез может быть достигнут путем сталкивания двух топливных гранул вместе на скорости не менее 200 км/с — это известно как ударный синтез. По сравнению с инерционным удержанием, ударный синтез не потребует сферически симметричных гранул или приложения силы со всех сторон.

Топливные таблетки могут использовать изотопы, такие как дейтерий (водород-2) или тритий (водород-3). Обычный прямоточный воздушно-реактивный двигатель Бассарда в основном будет собирать протий (водород-1), так как это самый распространенный изотоп водорода в природе.

Запуск только ионизированного термоядерного топлива, чтобы магнитные или электростатические ковши могли легче направлять топливо в двигатель. Недостаток в том, что это приведет к рассеиванию топлива из-за электростатического отталкивания.

Запуск топлива по траектории, при которой вектор скорости топлива будет точно соответствовать ожидаемому вектору скорости космического корабля в этой точке его траектории. Это минимизирует силы «торможения», возникающие при сборе топлива.

Хотя предварительно запущенное топливо для прямоточного воздушно-реактивного двигателя сводит на нет одно из преимуществ конструкции Бассарда (сбор топлива по мере его движения через межзвездную среду, что экономит затраты на запуск топливной массы), оно, по крайней мере, сохраняет преимущество, заключающееся в отсутствии необходимости одновременного ускорения массы топлива и массы ракеты.

Предварительно запущенное топливо обеспечит некоторую видимость межзвездной среды, тем самым предупреждая идущий следом космический корабль о невидимых опасностях (например, коричневых карликах).

Недостатки системы

Необходимость точного перехвата пеллет термоядерной взлетно-посадочной полосы космическим аппаратом, движущимся с высокой скоростью. Для управления пеллетами можно использовать лазерные импульсы.

При использовании ударного термоядерного синтеза космический аппарат должен двигаться с минимальной скоростью, чтобы достичь термоядерного синтеза. Одно из предложений заключается в том, чтобы космический аппарат использовал маневр «касательного прохождения мимо Солнца» для достижения скорости 600 км/с.

Космический корабль не мог отклоняться от заранее рассчитанной траектории, если только это не было критически важным. Любое такое отклонение отделило бы космический корабль от его источника топлива и оставило бы ему лишь минимальную возможность вернуться на свою первоначальную траекторию.

Предварительно запущенное топливо для торможения у звезды назначения не будет доступно, если его не запустить за много десятилетий до запуска космического корабля. Однако для этой цели можно использовать другие системы (например, магнитные паруса).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\eta_{\text{fusion}} \cdot \dot{m} \cdot v_e}{m} - \frac{v}{\tau_{\text{drag}}}$$

• ## — массовый расход собираемого топлива, кг/с (зависит от плотности среды ρ, площади коллектора A и скорости v: ##=##·##·##·##$_{\text{collect}}$);

• ##$_{##}$ — эффективная скорость истечения плазмы, м/с (определяет удельный импульс Isp = ve / $g_0$, где $g_0 \approx 9{,}81$ м/с$^2$);

• ## — текущая масса корабля, кг (уменьшается при сбросе баков, но в прямоточном режиме относительно постоянна);

• ## — текущая скорость корабля, м/с;

• ##$_{\text{drag}}$ — константа времени сопротивления.

Для упрощения используем критерий стационарного разгона:

$$m = \frac{\eta_{\text{fusion}} \cdot \rho \cdot A \cdot v_e \cdot \tau_{\text{drag}}}{\ln\left(1+\frac{v}{v_e}\right)}$$

Площадь сечения «ловушки». Для корабля диаметром D=1 км:

$$A = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 = 7{,}85 \times 10^5 \text{ м}^2,$$

Массовый расход водорода

$\dot{m}=\eta_{collect}\cdot\rho\cdot A\cdot v=0.5\cdot 1.67\times 10^{-21}\cdot 7.85\times 10^5\cdot 4.5\times 10^7\approx 3\times 10^{-9}$ кг/с.

Энерговыделение

$P=\eta_{fusion}\cdot\dot{m}\cdot c^2=0.007\cdot 3\times 10^{-9}\cdot (3\times 10^8)^2\approx 1.89\times 10^{12}$ Вт.

Время разгона

Для достижения v=0.2c:

$$t_{\text{drag}} = \frac{v}{a} = \frac{0{,}01}{g_0} \approx 6 \times 10^8 \text{ сек (19 лет)}.$$

Максимальная масса корабля.

Подставим значения в упрощенную формулу:

$$m = \frac{\eta_{\text{fusion}} \cdot \rho \cdot A \cdot v_e \cdot \tau_{\text{drag}}}{\ln\left(1+\frac{v}{v_e}\right)} \approx 3{,}2 \times 10^6 \text{ кг (3200 тонн).}$$

Низкая плотность среды: при ρ <1 атом/см3.

Технологические барьеры: создание электромагнитных «ловушек» размером в километры, удержание и стабилизация термоядерной реакции в потоке. Энергия для ионизации: на разгон ионов водорода требуется дополнительная энергия (~1015 Дж).

· Максимальная масса корабля: ~3000—5000 тонн (при оптимистичных допущениях).

· Скорость: 15—20% скорости света достижимы за 15—30 лет непрерывного разгона.

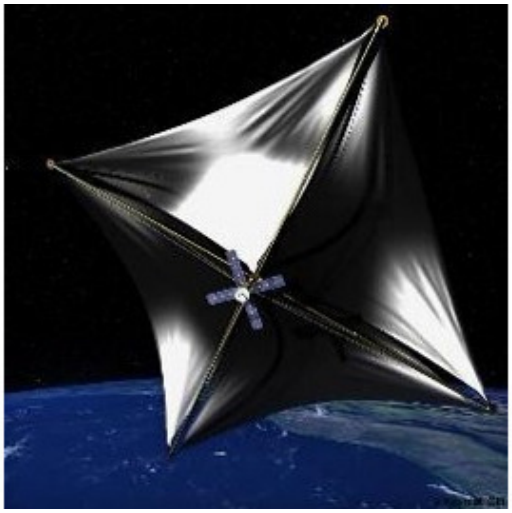
Ключевые требования: гигантские коллекторы топлива (диаметр> 1 км), сверхпроводящие магниты и радиационная защита, энергия для поддержания реакции — ~$10^{12}$ Вт. Проект остается гипотетическим, но теоретически возможным для автоматических зондов в отдаленном будущем. Для пилотируемых миссий масса корабля должна быть снижена до 100—500 тонн. В 2026 году модели NIAC показывают Δv до 0.15 с с ρ=0.5 атом/см$^3$[54].

[54] NASA NIAC: 2026

# Глава 8. Breakthrough Starshot

**Breakthrough Starshot** — амбициозный проект в рамках программы Breakthrough Initiatives, направленный на разработку флота легких парусных нанокораблей, способных совершить путешествие к звездной системе Альфа Центавра. Инициатива, объявленная в 2016 году Юрием Мильнером, Стивеном Хокингом и Марком Цукербергом, направлена на достижение межзвездных путешествий в течение человеческой жизни путем использования достижений в области фотоники, материаловедения и миниатюризации.

Основная цель Breakthrough Starshot — отправить небольшой, легкий космический аппарат, известный как StarChips, к Альфе Центавра, нашему ближайшему звездному соседу, находящемуся примерно в 4,37 световых годах от нас. Цель миссии — достичь этого, приводя в движение StarChips с помощью мощных наземных лазеров, разгоняя их до скорости до 20% от скорости света (примерно 60 000 километров в секунду). Это позволит космическому аппарату достичь Альфа Центавра примерно за 20 лет.



Концепция солнечного паруса проекта Breakthrough Starshot. На иллюстрации показана концепция лёгкого межзвёздного зонда с развёрнутым солнечным парусом, который разгоняется мощным наземным лазерным лучом до релятивистских скоростей. (Credit: Kevin Gill, CC BY-SA 2.0)

Метод движения Breakthrough Starshot предполагает использование световых парусов, которые представляют собой сверхтонкие, высокоотражающие паруса, предназначенные для использования импульса фотонов. Эти паруса сделаны из современных материалов, таких как графен или метаматериалы, которые являются одновременно легкими и прочными. Ожидается, что световые паруса будут иметь толщину всего в несколько сотен атомов и смогут выдерживать интенсивное давление излучения, оказываемое лазерной решеткой. В 2026 году тесты графеновых парусов в Caltech достигли толщины 100 атомов с отражением 99%[55].

Концепция Starshot предусматривает запуск «материнского корабля», несущего около тысячи крошечных космических аппаратов (в масштабе сантиметров) на высотную околоземную орбиту для развертывания. Затем фазированная решетка наземных лазеров сфокусирует световой луч на парусах этих космических аппаратов, чтобы разогнать их один за другим до целевой скорости в течение 10 минут со средним ускорением порядка 100 км/ с2 (10 000 g) и

[55] Caltech reports: 2026

энергией освещения порядка 1 ТДж, подаваемой на каждый парус. Предполагается, что предварительная модель паруса будет иметь площадь поверхности 4 м × 4 м. В презентации модели системы Starshot в октябре 2017 года были рассмотрены круговые паруса и обнаружено, что капитальные затраты на направляющую луча минимизируются при диаметре паруса 5 метров.

Планета размером с Землю Проксима Центавра b находится в обитаемой зоне системы Альфа Центавра. В идеале Breakthrough Starshot должен направить свой космический аппарат на расстояние в одну астрономическую единицу (150 миллионов километров или 93 миллиона миль) от этого мира. С этого расстояния камеры корабля могли бы сделать снимок с достаточно высоким разрешением, чтобы различить особенности поверхности.

Флот будет иметь около 1000 космических аппаратов. Каждый из них, называемый StarChip, будет очень маленьким транспортным средством размером в сантиметр и весом в несколько граммов. Они будут приводиться в движение массивом наземных лазеров мощностью 10 кВт площадью в квадратный километр с общей выходной мощностью до 100 ГВт. Рой из примерно 1000 единиц компенсирует потери, вызванные столкновениями с межзвездной пылью на пути к цели. В подробном исследовании, проведенном в 2016 году, Тим Хоанг и соавторы обнаружили, что смягчение столкновений с пылью, водородом и галактическими космическими лучами может быть не такой серьезной инженерной проблемой, как предполагалось на первый взгляд, хотя это, вероятно, ограничит качество датчиков на борту.

Одной из существенных проблем для Breakthrough Starshot является взаимодействие StarChips с межзвездной средой, которая состоит из частиц газа и пыли. На релятивистских скоростях столкновения с этими частицами могут нанести значительный ущерб космическому аппарату. Чтобы смягчить это, StarChips разработаны с защитными покрытиями и экранированием, чтобы минимизировать воздействие таких столкновений. В 2026 году тесты в Breakthrough Labs показывают, что нано-покрытия выдерживают удары до 0.2 с[56].

Связь со StarChips на межзвездных расстояниях представляет собой еще одну проблему. Космическому кораблю необходимо будет передавать данные обратно на Землю с помощью маломощных систем связи. Для решения этой проблемы StarChips будет использовать технологию лазерной связи, которая обеспечивает более высокую скорость передачи данных и большую эффективность по сравнению с традиционной радиочастотной связью.

Обеспечение надежного источника питания для StarChips во время их путешествия имеет решающее значение. Космический корабль будет полагаться на радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) или усовершенствованные фотоэлектрические элементы для генерации необходимой мощности для своих приборов и систем связи. Эти источники питания должны быть легкими и способными эффективно работать в суровых условиях космоса.

Ожидается, что каждый нанокорабль StarChip будет нести миниатюрные камеры, навигационное оборудование, коммуникационное оборудование, фотонные двигатели и источник питания. Кроме того, каждый нанокорабль будет оснащен световым парусом метрового масштаба, изготовленным из легких материалов, с массой в граммовом масштабе. Предполагается создание пяти субграммовых цифровых камер, каждая с минимальным разрешением 2 мегапикселя. Планируется построить:

· четыре процессора субграммового масштаба;

· четыре субграммовых фотонных двигателя, каждый из которых будет способен работать на уровне диодного лазера мощностью 1 Вт;

· создание атомной батареи весом 150 мг, работающей на плутонии-238 или америции-241;

[56] Breakthrough Initiatives: 2026

· покрытие, возможно, изготовленное из бериллиевой меди, будет защищать наноаппарат от столкновений с пылью и эрозии атомных частиц;

· световой парус будет иметь размеры не более 4 на 4 метра (13 на 13 футов), возможно, из композитного материала на основе графена. Материал должен быть очень тонким и иметь возможность отражать лазерный луч, поглощая лишь малую часть падающей энергии, иначе он испарит парус. Световой парус может также служить источником энергии во время полета, поскольку столкновения с атомами межзвездной среды будут обеспечивать 60 Вт/м 2 мощности;

· лазерный коммуникатор, использующий световой парус в качестве первичного отражателя, мог бы обеспечить скорость передачи данных 2,6—15 бод на ватт передаваемой мощности на расстоянии до Альфы Центавра, предполагая, что диаметр принимающего телескопа на Земле составляет 30 м.

Успешное развертывание Breakthrough Starshot может привести к новаторским научным открытиям. Ожидается, что StarChips будут делать снимки с высоким разрешением и собирать данные о планетах и других небесных телах в системе Альфа Центавра. Эта информация может дать ценные сведения о потенциальной обитаемости экзопланет и наличии внеземной жизни.

Проект Starshot предназначен для миссий пролета мимо цели на высокой скорости. Хеллер и др. предложили использовать фотогравитационную помощь для замедления такого зонда и выхода на орбиту (используя давление фотонов в маневрах, похожих на аэроторможение). Для этого требуется парус, который будет и намного легче, и намного больше, чем предлагаемый парус Starshot. В таблице ниже перечислены возможные целевые звезды для фотогравитационной помощи при сближении. Время в пути — это расчетное время, необходимое оптимизированному космическому аппарату для путешествия к звезде и последующего выхода на орбиту вокруг звезды.

Возможные цели для фотогравитационной помощи

| Звезда | Время в пути (год) | Расстояние (св. лет) | Светимость (L⊙) |
|---|---|---|---|
| Проксима Центавра | 121 | 4,2 | 0,00005 |
| α Центавра A | 101,25 | 4,36 | 1,52 |
| α Центавра B | 147,58 | 4,36 | 0,50 |
| Сириус A | будет уточнено | 8,58 | 24,20 |
| Эпсилон Эридана | 363,35 | 10,50 | 0,50 |
| Процион A | 154,06 | 11,44 | 6,94 |
| Альтаир | 176,67 | 16,69 | 10,70 |
| Вега | 167,39 | 25,02 | 50,05 |
| Фомальгаут A | 221,33 | 25,13 | 16,67 |
| Денебола | 325,56 | 35,78 | 14,66 |
| Кастор A | 341,35 | 50,98 | 49,85 |

Последовательные миссии к α Cen A и B могут сократить общее время до 75 лет.

Номинальное отношение массы к площади паруса — $8{,}6 \times 10^{-4}$ г/м$^2$ (графеновый класс). При площади $10^5$ м$^2$ (316 м) $^2$ скорость достигает 37 300 км/с (12,5% c).

Световой парус имеет номинальное отношение массы к поверхности (σ nom) 8,6×10—4 г м $^{-2}$для номинального паруса графенового класса. Площадь легкого паруса, около 10 5 м $^2$ = (316 м$^2$). Скорость до 37 300 км с —1 (12,5% c)

Проект Breakthrough Starshot также поднимает несколько этических и философских вопросов. Потенциал загрязнения других звездных систем и долгосрочные последствия межзвездных путешествий являются предметом продолжающихся дебатов. Кроме того, проект подчеркивает необходимость международного сотрудничества и установления руководящих принципов для исследования и использования пространства за пределами нашей солнечной системы.

Хотя Breakthrough Starshot представляет собой значительный скачок вперед в межзвездном исследовании, это только начало. Технологии, разработанные для этой миссии, могут проложить путь для более продвинутых и амбициозных проектов в будущем. Дальнейшие достижения в области тяги, материаловедения и миниатюризации будут иметь важное значение для реализации мечты о межзвездных путешествиях и расширения присутствия человечества в космосе. К 2026 году проект тестирует прототипы парусов в вакуумных камерах[57].

Доводы в реальность данного проекта: при мощности источника 1,3 ГВт. Основные формулы:

1. Релятивистская кинетическая энергия

2. Энергия реактора за время t

Пример 1. Разгон 1 кг за 1 год ($t = 3{,}1536 \times 10^7$ с) $E \approx 4{,}1 \times 10^{16}$ Дж → $v \approx 0{,}727c$ (72,7% скорости света).

Пример 2. Разгон до 0,9c $\gamma \approx 2{,}294 \rightarrow K \approx 1{,}1646 \times 10^{17}$ m Дж → за 1 год разгоняется $m \approx 0{,}35$ кг.

Пример 3. Разгон 10 г (m = 0,01 кг) до 0,99c требуется $t \approx 133$ года непрерывной работы реактора.

Практические ограничения:

1. Скорость света (cc) недостижима: требуется бесконечная энергия.

2. КПД системы: Реальные потери энергии (нагрев, излучение) уменьшат эффективность.

3. Время: для макроскопических масс (например, 1 тонна) потребуются миллионы лет.

В 2026 году Breakthrough Starshot использует лазеры 100 ГВт для тестов на 0.2 c[58].

[57] Breakthrough Initiatives: 2026

[58] Breakthrough Initiative: 2026

# Глава 9. Проект «Валькирия»

**Проект «Валькирия» (Valkyrie) —** теоретическая концепция космического аппарата, разработанная физиком Джеймсом Пауэллом из Брукхейвенской национальной лаборатории и Чарльзом Пеллегрино, с вкладом теоретика Хироши Такахаши в начальный дизайн двигателя на водяных импульсах (60 импульсов в секунду). Айзек Азимов внес правки, устранив ошибки в конфигурации, позже названной «Массив Азимова»[59]. В 1994 году, перед столкновением кометы Шумейкер-Леви 9 с Юпитером, к проекту присоединился Пьер Нойес из Стэнфордского линейного ускорителя.

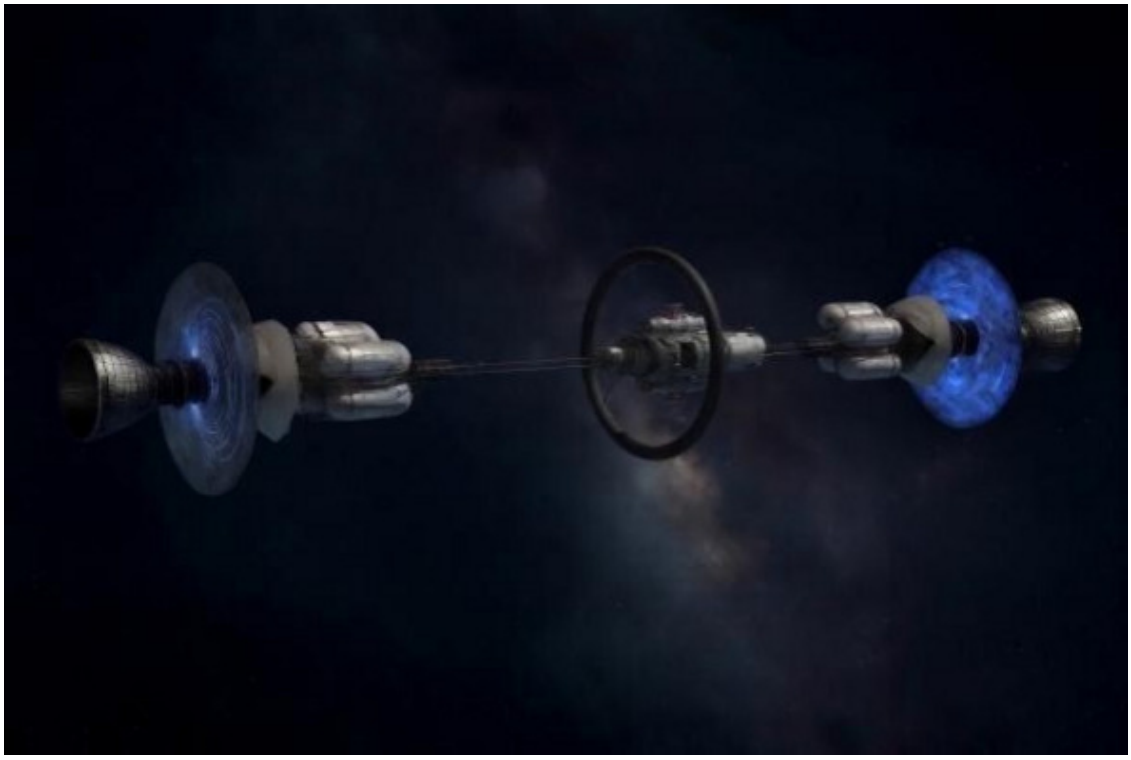
Теоретически «Валькирия» способна разгоняться до 92% скорости света, а затем замедляться, доставляя небольшой экипаж людей в другую звездную систему.

Высокая производительность «Валькирия» обусловлена его инновационной конструкцией. Вместо прочного космического корабля с ракетой сзади, «Валькирия» больше похожа на канатный поезд, в котором помещения для экипажа, топливные баки, радиационная защита и другие жизненно важные компоненты тянутся между передними и кормовыми двигателями на длинных тросах[60]. Это значительно снижает массу корабля, поскольку ему больше не требуются тяжелые элементы конструкции и радиационная защита. Это значительное преимущество, поскольку в ракете каждый дополнительный килограмм полезной нагрузки (сухой массы) потребует соответствующего дополнительного количества топлива. Дизайн тросов аналогичен VASIMR, где длина 10 км минимизирует радиацию[61].

[59] Данный термин ввели Джеймс Пауэлл и Чарльз Пеллегрино после того, как Айзек Азимов указал на несколько серьезных ошибок в их конструкции. Например, «Вы знаете, что Меркурий не тормозится приливами относительно Солнца, не так ли?» В основе определения лежали размышления о солнечных электростанциях размером с Титан, покрывающие огромные площади на поверхности Меркурия или Луны, и называные «Азимовскими батареями», указание писателя о том, что солнечные элементы не обязательно должны быть установлены на Меркурии, они могут быть орбитальными. Они могут быть размещены ближе к Солнцу, для получения энергии. Единственная проблема в том, что световое давление будет иметь тенденцию отталкивать их, гравитация Меркурия может их удерживать.

[60] Подобная система описана в трилогии А. П. Казанцева «Возвращение в грядущее» которую составляют романы; «Тайна нуля», «Донкихоты Вселенной» и «Спустя тысячелетие».

[61] NASA MSFC: 2026



Авторское видение Проект ««Валькирия»

У «Валькирия» будет модуль экипажа, отстающий на 10 километров от двигателя. Небольшой вольфрамовый щит толщиной 20 см будет висеть на расстоянии 100 метров от двигателя, чтобы защитить отстающий модуль экипажа от его вредного излучения. Топливный бак может быть размещен между модулем экипажа и двигателем, чтобы дополнительно защитить его. В хвостовой части корабля будет второй двигатель, который корабль будет использовать для замедления. Передний двигатель и бак, содержащий его запас топлива, могут быть сброшены перед замедлением, чтобы сократить расход топлива. Система тросов требует, чтобы элементы корабля перемещались «вверх» или «вниз» по тросам в зависимости от направления полета.

Первоначально двигатель «Валькирии»[62] будет работать, используя небольшие количества антиматерии, чтобы инициировать чрезвычайно энергичную реакцию синтеза. Магнитная катушка улавливает продукты выхлопа этой реакции, выбрасывая их со скоростью выхлопа 12—20% скорости света (35 000—60 000 км/с). По мере того, как космический корабль приближается к 20% скорости света, в двигатели подается больше антиматерии, пока он не переключится на чистую аннигиляцию материи и антиматерии. Он будет использовать этот режим для ускорения оставшегося пути до 0,92 с. Пеллегрино оценивает, что кораблю потребуется 100 тонн материи и антиматерии, чтобы достичь 0,1—0,2 с, с неопределенным избытком материи, чтобы гарантировать эффективное использование антиматерии. Чтобы достичь скорости 0,92 с и затем замедлиться, Валькирии потребуется соотношение масс 22 (или 2200 тонн топлива

[62] Предок «Валькирия» (Valkyrie), называемый Vasmir, в настоящее время разрабатывается независимо (как испытательный двигатель с обычным источником энергии) в Космическом центре имени Джонсона NASA. Как и «Валькирия» (Valkyrie), Vasmir будет перемещать заряженные частицы с релятивистской скоростью через магнитные поля («ионный двигатель»); но в космосе он будет питаться от реакторов деления-электродвижения и, хотя он будет находиться всего в нескольких месяцах от Юпитера и Сатурна, а Марс — всего в нескольких неделях от Земли, он будет пригоден для использования только в Солнечной системе.

для 100-тонного космического корабля). В 2026 году VASIMR достигает Isp 5000 с в тестах, но антиматерия остаётся на уровне $10^{-12}$ г/год[63].

На таких высоких скоростях встречный мусор будет представлять серьезную опасность. При ускорении «Валькирия» использует устройство, которое совмещает функции щита от частиц и радиатора капель жидкости. Отработанное тепло сбрасывается в капли жидкости, которые выбрасываются перед кораблем. По мере ускорения корабля капли (теперь уже холодные) эффективно падают обратно в корабль, поэтому система самовосстанавливается. Во время торможения корабль будет защищен сверхтонкими зонтичными щитами, дополненными пылевым экраном, возможно, изготовленным путем измельчения частей сброшенной первой ступени.

Главная проблема осуществимости «Валькирия» (или любого антиматерийно-лучевого двигателя) заключается в его потребности в тоннах антиматерийного топлива. Антиматерия не может быть произведена с эффективностью более 50% (то есть, для производства одного грамма антиматерии требуется вдвое больше энергии, чем вы получили бы от аннигиляции этого грамма с граммом материи). Поскольку полкилограмма антиматерии даст $9\times10^{16}$ Дж при аннигиляции с равным количеством материи, это быстро складывается в огромные энергетические потребности для ее производства. Для производства 50 тонн антиматерии «Валькирия» потребуется $1{,}8\times10^{22}$ Дж. Это то же количество энергии, которое все человечество в настоящее время использует примерно за сорок лет.

Эту проблему можно решить, создав поистине огромную электростанцию для фабрики антиматерии, вероятно, в виде огромного массива солнечных панелей с общей площадью в миллионы квадратных километров или множества термоядерных реакторов. С другой стороны, гибридный двигатель антиматерии-синтеза, который использует «Валькирия» для ускорения до 0,2 с, потребует гораздо меньше антиматерии и, при скорости истечения 30—60 000 км·с —1, все еще будет весьма выгодно отличаться от конкурирующих двигателей, таких как импульсный двигатель инерционного удержания, используемый проектами «Дедал» или проектами «Орион». Легкая конструкция «Валькирия» также может быть применена к широкому спектру космических аппаратов.

При использовании тросов нет жесткости между элементами корабля и двигателями. Без активного ускорения или тяги для натяжения и выпрямления тросов малейший дисбаланс, избыточная сила или перемещение элементов корабля в различные конфигурации полета представляют опасность столкновений между элементами корабля и двигателями. Поскольку длительный космический полет на межзвездных скоростях вызывает эрозию из-за столкновения с частицами, газом, пылью и микрометеоритами, тросы буквально являются спасательными кругами. Изменение курса или поворот корабля требует изменения положения или выравнивания каждого элемента корабля и, предположительно, потребляет больше топлива при этом.

Поскольку жидкокапельные радиаторы (LDR) развернуты, с другой стороны, от движителя и основного корпуса, капли и коллекторы подвергаются воздействию другой половины тепловой энергии от гамма-излучения от аннигиляции антиматерии. Если общая площадь коллекторов больше, чем радиационный экран, LDR будет служить для охлаждения себя, а не экрана для основных компонентов корабля.

> Более подробно расписан проект на сайте Чарльза Пеллегрино[64]: *««Валькирия» — это сверхлегкая ракета, состоящая в основном из голых магнитных катушек и отсеков, удерживаемых вместе тросами. Более ранние проекты звездолетов, разработанные учеными Дональдом Голдсмитом,*

[63] CERN: 2026

[64] https://charlespellegrino.com/propulsion.htm

*Тобиасом Оуэном и другими, дали оценки, что для путешествия к ближайшей звезде потребуется 400 миллионов тонн топлива из материи-антиматерии и что они едва ли смогут достичь десяти процентов скорости света, что привело к времени полета в несколько десятилетий. Такие оценки возникли из традиционных конфигураций ракет (огромные, усиленные башни с двигателями, приваренными к их ногам), что привело к непомерно тяжелым, медленно движущимся аппаратам. Таким образом, более 99,7 процентов их массы стало топливом. Запасы топлива «Валькирии» (как материи, так и антиматерии вместе взятые) оцениваются чуть менее чем в половину массы остального космического корабля, или около ста тонн.*

*Двигатель — это просто магнитная катушка, которая генерирует магнитное поле, от которого отскакивают частицы из зоны реакции материи-антиматерии. Магнитное поле (и, следовательно, катушка) продвигается вперед отскоком, катушка тянет остальную часть корабля на тросе. Тянущий, а не толкающий двигатель устраняет большинство структурных балок, которые не только своим существованием добавляли бы неоправданную массу, но и многократно увеличивали бы эту массу из-за необходимости в щитах и охлаждающем оборудовании, а также из-за дополнительного топлива для толкания добавленного топлива… что приводит к цепной реакции усложнений конструкции… и к двигателю, который горит горячее, но который не может позволить себе разогнать гиганта даже до значительной доли скорости света. В отличие от того, что традиционно стало известно как большой, медленно движущийся «космический ковчег» для межзвездного полета, «Валькирия» становится маломассивным скоростным катером.*

*Основное топливо «Валькирии», антипротон. Небольшое количество антипротонов регулярно производится в физических экспериментах. В атомных ускорителях они удерживаются магнитом (или закупориваются), охлаждаются и стабилизируются путем объединения с антиэлектронами (называемыми позитронами), чтобы произвести атомы антиводорода.*

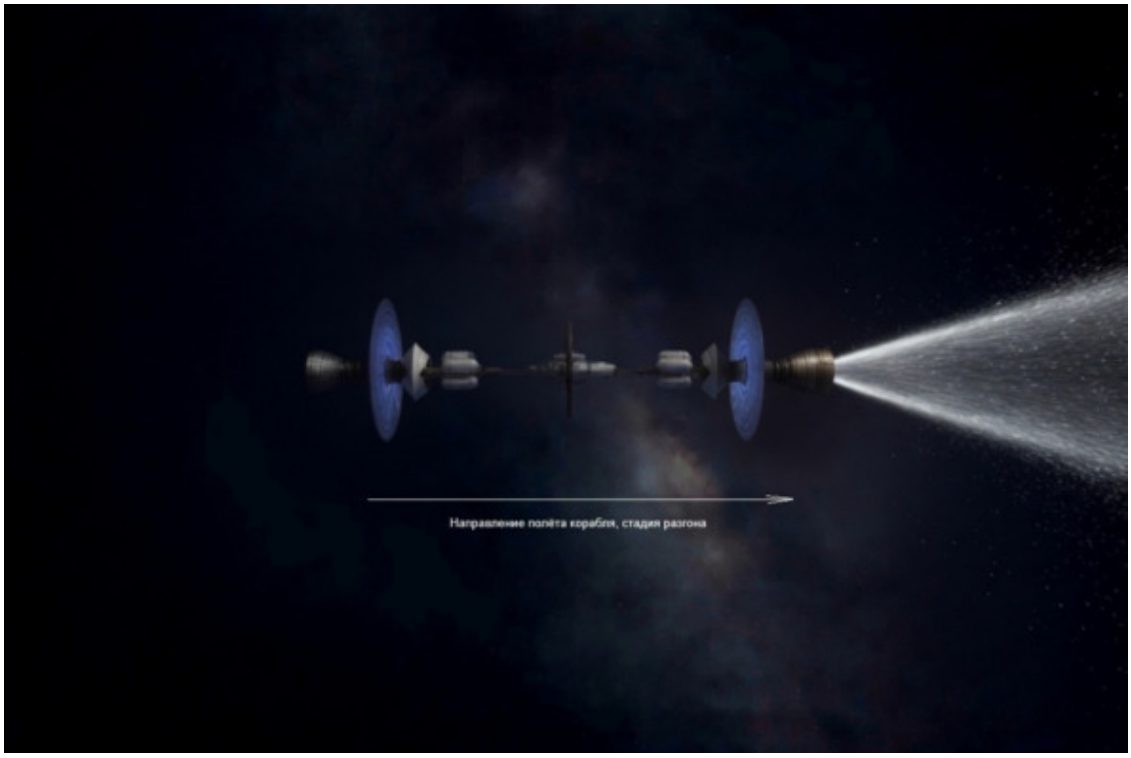
*Атом антиводорода — это близнец антиматерии более знакомого атома водорода, но его электрон (позитрон) заряжен положительно, а его отрицательно заряженный протон (антипротон) также имеет заряд, противоположный заряду обычного ядра водорода. Поскольку материя и антиматерия аннигилируют друг с другом при контакте, каждая из которых преобразует 100 процентов своей массы в энергию и частицы со скоростью, близкой к скорости, и поскольку каждый из них при контакте высвобождает огромные выбросы энергии из буквально микроскопических количеств топлива. Единственный способ хранения, который может сработать, — это твердый антиводород, переохлажденный в пределах одного градуса абсолютного нуля (в пределах одного Кельвина от —273 градусов по Цельсию). При очень низких температурах антиводород конденсируется в «белые хлопья» с чрезвычайно низкой скоростью испарения.*

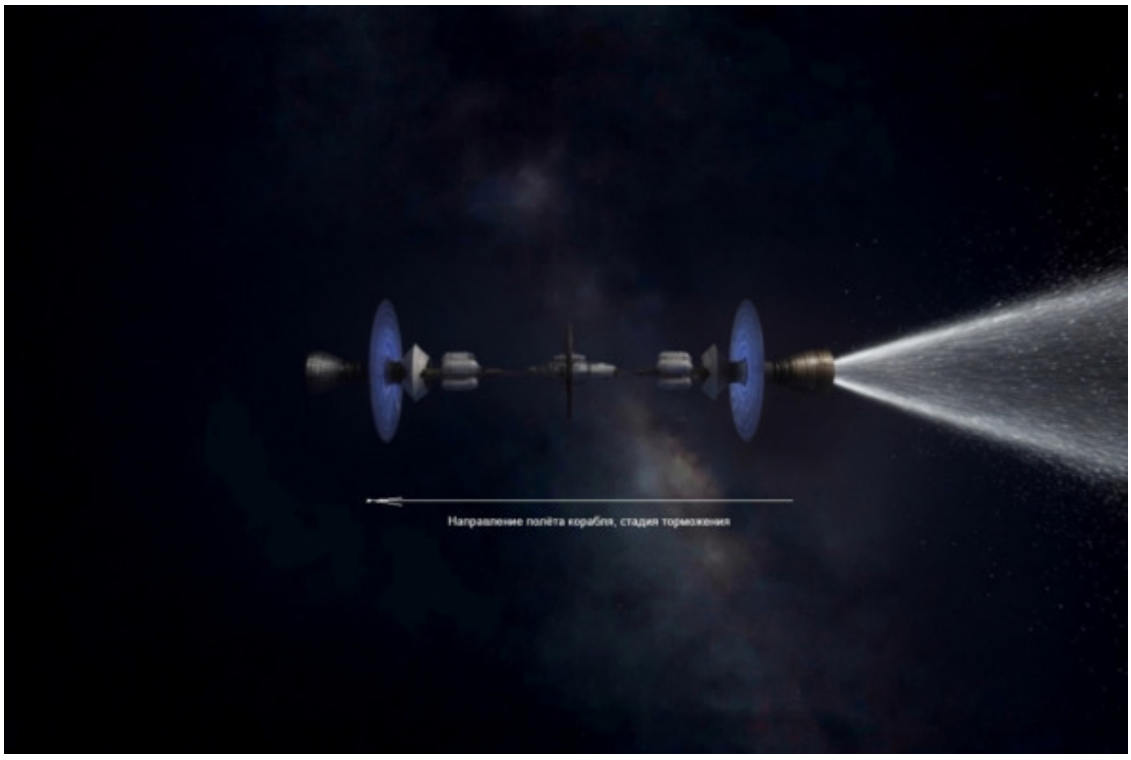
*Частицы твердого антиводорода могут быть подвешены и удерживаться вдали от стенок «стручка» электростатическими силами и/или магнетизмом. В пределах 0,0005 градусов К антиводород кажется достаточно стабильным, чтобы обеспечить хранение и смешивание в виде микроскопических топливных пластин с реальной материей, и, хотя этот способ хранения когда-то рассматривался как основа*

*для потенциальной конструкции двигателя. В 1984 году разработчики обнаружили, что реагенты материя-антиматерия быстро разлетались, как только начиналась реакция, делая саму реакцию, по-видимому, невозможной для поддержания.*

*Почти идентичная проблема возникла у разработчиков, пытающихся поддерживать управляемый термоядерный синтез: он работал только если кто-то хотел создать короткий, мощный взрыв. Эта проблема привела к очень сложной конструкции двигателя «Валькирия» Mark II, в котором микропластины должны были собираться из материи и антиматерии непосредственно перед использованием, а затем запускаться — до шестидесяти пластин в секунду — в зону реакции, разогреваемую лазером. Это привело к новой проблеме, почти идентичной той, с которой столкнулись инженеры-авиаконструкторы Первой мировой войны, пытаясь выяснить, как лучше всего стрелять пулями через винт самолета, не отстреливая винт (за исключением того, что антиматерия умножала эту проблему в сто раз). По мере того, как двигатель становился сложнее, росли и его системы безопасности, росла и его масса, а это означало больше топлива и больше срабатываний в секунду, что означало большую сложность, и так далее, и так далее.*

*Mark III на самом деле довольно прост. Регулировка температуры в отсеках антиматерии будет контролировать, насколько быстро или медленно испаряется белая чешуйка антиводорода. Когда испаренный антиводород покидает магнитную бутылку и направляется к стволу магнитной пушки атомного ускорителя, атомы ионизируются и лишаются своих позитронов. Позитроны просто выбрасываются в космос (ибо, если им позволить реагировать с электронами, они будут производить мощные гамма-лучи, обеспечивая при этом, по сути, нулевую тягу). Антипротоны ускоряются примерно до 750 километров в секунду, и когда они прибывают в зону реакции, ведут себя как медленные релятивистские бомбы. На этой скорости антипротоны проходят как призраки через бериллиевые окна, едва ли замечая, что они вообще прошли через что-либо. Они взрываются, когда достигают («прилипают») ядер водорода за окном (включая дейтерий и, возможно, следы трития), и путем тщательного контроля количества антипротонов, достигающих водорода (путем регулирования скорости испарения в контейнерах с антиматерией), и, следовательно, контроля температуры водородной мишени, результатом становится тонко настроенная реакция термоядерного синтеза — по сути, водородная бомба, запускаемая антиматерией, которая вместо взрыва просто светится, по крайней мере, так хочется, чтобы она светилась. Это свечение на самом деле является распылением достаточно массивных заряженных частиц, среди которых ядра гелия. Так же, как антипротоны, вылетающие через бериллиевое окно, не замечают существования стенки контейнера, любые продукты синтеза, вылетающие наружу (на все еще относительно низкой скорости в 12—20 процентов от скорости света), вылетают, как лучи света, выходящие из стекла. Затем частицы отскакивают от переднего магнитного поля корабля, отдавая свою энергию в виде тяги.*




*Когда скорость корабля начинает подниматься выше двенадцати-двадцати процентов скорости света, термоядерные ионы, хотя и более массивные, чем продукты прямой протон-антипротонной аннигиляции, значительно снижают эффективность тяги. Чтобы вывести Валькирию на более высокую долю скорости света, необходимы более высокие скорости истечения. На этом этапе реакционная смесь Mark III все меньше и*

*меньше зависит от термоядерного синтеза, пока в конечном итоге не переходит исключительно к протон-антипротонной паре. На этом этапе менее эффективная реакция (которая сбрасывает частицы с низкой массой на высокой скорости) стала более эффективной реакцией. Продукты реакции, движущиеся с высокой релятивистской скоростью, состоят из элементарных частиц, называемых мезонами. Каждый мезон имеет массу, промежуточную между протоном и электроном. По сути, это фрагмент протона, ставший настолько релятивистским (читай баллистическим), что он одновременно является частицей и волной, и некоторые из его кварков и глюонов рассеялись во вселенной в виде энергии. Распыление материи-антиматерии производит три разновидности, или «аромата», пи-мезонов.*

*1. Тридцать процентов продуктов реакции протон-антипротон составляют нейтральные пи-мезоны. Они немедленно распадаются на гамма-лучи.*

*2. Положительно заряженные пи-мезоны, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света, распадаются на положительно заряженные мю-мезоны (мюоны) и нейтрино, пролетев в среднем всего двадцать один метр. Мюоны существуют несколько микросекунд (почти два километра), прежде чем распадаются на положительно заряженные электроны и нейтрино.*

*Отрицательно заряженные пи-мезоны ведут себя так же, как и положительно заряженные, за исключением того, что образующиеся мюоны и электроны заряжены отрицательно. Заряженные пионы и мюоны — это те частицы, которые нам нужны, и желательно, чтобы самые внутренние края магнитного поля двигателя (или магнитной толкающей пластины) достигали зоны реакции на расстоянии в двадцать один метр, чтобы он мог украсть всю тягу, которую могут дать пионы, прежде чем значительная их часть распадется и потеряет часть своей энергии в виде бесполезных нейтрино.*

*Одна из причин, по которой корабль построен на основе тросовой системы, заключается в том, что двигатель испускает смертельные дозы гамма-лучей. Полет на ракете на антиматерии похож на полет на гигантской бомбе со смертельным лучом. Подвешивание отсека экипажа, контейнеров с антиматерией и других основных, чувствительных к радиации элементов на конце десятикилометрового троса позволяет двигателю рассеивать большую часть своих лучей прямо в космос и срезать много тонн защиты.*

*Дополнительная защита достигается путем привязывания крошечного блока (скажем) вольфрама к тросу, примерно в ста метрах позади зоны реакции материи-антиматерии. Гамма-лучи ослабляются в десять раз на каждые два сантиметра вольфрама, через которые они проходят. Таким образом, блок вольфрама глубиной двадцать сантиметров снизит дозу гамма-излучения для всего, что находится за ним, в десять раз в десятой степени. Важное преимущество экранирования, обеспечиваемое тросом длиной десять километров, заключается в том, что, размещая вольфрамовый экран в сто раз ближе к двигателю, чем к экипажу, диаметр экрана должен составлять всего одну сотую диаметра тени гамма-излучения, которую мы хотим отбросить на отсек экипажа и вокруг него. Вес системы экранирования тогда становится тривиальным (за исключением эффекта гамма-излучения «небесного сияния», с которым, вероятно, можно*

*справиться с помощью экранирования отсека экипажа от космических лучей в сочетании с разумным размещением капельного охладителя и запасов воды).*

*Однако гамма-лучи будут выбивать атомы из положения в структурах около двигателя, делая катушки, тросы и оборудование для обслуживания более прочными, но хрупкими. Это, вероятно, потребует дополнительных вольфрамовых пробок и колец (называемых теневыми экранами, эти затемнители гамма-излучения уже используются в некоторых очень продвинутых ядерных реакторах). Другое дополнительное решение — сплести большинство структур, находящихся в пределах четырех километров от двигателя, из сотен нитей, нагревая их по одной за раз до нескольких сотых градуса ниже их точки плавления. Смещения гамма-излучения в проводах, таким образом, перестраиваются, и атомы могут восстановить свои нормальные положения. (Это «лечение» становится более практичным благодаря разработке в Японии в 2002 году «умных титановых композитов». )*

*Однако, похоже, ничего не можем сделать, чтобы предотвратить случайные превращения атомов в другие элементы. Пролететь достаточно далеко с работающими на полную мощность двигателями, и корабль медленно превратится в золото, а также в литий, мышьяк, хлор и множество других элементов, которых не было на борту, когда вы улетели. Эти новые вещества будут концентрироваться вокруг зоны реакции антиматерии, и важно отметить, что уже появляющиеся передовые композитные материалы диктуют, что «Валькирия», даже на этой ранней стадии проектирования, будет построена в основном из керамических и органических композитных материалов, а не из металлов.*

*Вероятно, что расширяющиеся знания о композитах будут учтены к тому времени, когда релятивистские космические корабли будут фактически построены, так что корабли будут включать любые трансмутированные элементы в свои нити таким образом, что в конечном итоге приведут к структурным улучшениям для судов, спроектированных (с помощью сложных тросовых реле и робототехники) так, чтобы они, по сути, перестраивали себя во время полета. Использование того, что на первый взгляд кажется недостатком (трансмутация), — это просто вопрос предвосхищения «недостатка» до того, как вы начнете строить. Это непредвиденные недостатки (незаданные вопросы), которые грозят подскочить и утянуть вас вниз.*

*Система тросов «Валькирия» требует, чтобы элементы корабля были спроектированы так, чтобы подниматься «вверх» и «вниз» по тросам, как лифты на рельсах. В этой конфигурации есть ирония. Наша «вывернутая наизнанку» ракета — с двигателем впереди топливных баков и топливными баками впереди полезной нагрузки — не является чем-то новым. Пройден полный круг и заново открыт оригинальная конфигурация ракеты Роберта Годдарда. Магнитное поле сопла двигателя также не является совершенно новым творением. Оно направляет и фокусирует струи субатомных частиц таким же образом, как инструмент, выбранный микробиологами, направляет потоки электронов через магнитные линзы. «Валькирия», по сути, является не более чем прославленным электронным микроскопом.*

*Полет в космосе со значительной долей скорости света похож, на взгляд в ствол суперколлайдера частиц. Даже у изолированного протона есть жало, а песчинки начинают напоминать торпеды.*

*Разработчики рассмотрели система, которая может выполнять обе функции (защиту от частиц и отвод тепла), по крайней мере, во время ускорения и крейсерской фазы полета. Возможность сброса перехваченного тепло двигателя в жидкость (в основном органический материал с металлическими включениями) и выбрасывать потоки горячих капель впереди корабля. Капли излучают свою тепловую нагрузку в космос до того, как корабль разгонится и снова поймает их в магнитных воронках для последующего повторного использования. Во время торможения корабль будет защищен сверхтонкими зонтичными щитами, дополненными пылевым экраном, возможно, изготовленным путем измельчения частей сброшенной первой ступени.*

*Одним из больших преимуществ щита от капель является то, что он постоянно обновляется. Сделайте вмятину в нем, и полость немедленно заполнится вырывающейся струей.*

*«Валькирия» спроектирована так, чтобы нести запасной двигатель, расположенный на кормовом конце ее десятикилометрового троса. Передний двигатель тянет корабль вперед во время фазы ускорения полета. Он также срабатывает во время фазы крейсерского полета (корабль, по сути, находится в свободном падении с температурой 92% С), но только при одной тысячной доле силы тяжести, поддерживая трос натянутым и позволяя повторно захватывать летящие вперед капли. В конце фазы крейсерского полета отсек экипажа, контейнеры антиматерии и теневые щиты перестраиваются вдоль троса, и кормовой двигатель начинает свой (длительный в течение месяцев) тормозной режим. Запасной двигатель обеспечивает возможность спасения и устраняет трудности, связанные с поворотом десятикилометрового корабля бортом к релятивистской бомбардировке, чтобы развернуть двигатель и запустить его в обратном направлении.*

*На этом этапе пустые топливные контейнеры, весящие несколько тонн и больше не используемые, будут потреблять топливо, если они будут замедляться вместе с остальной частью корабля. Поскольку новые контейнеры и возвращаемое топливо (по крайней мере, компонент материи, который на самом деле составляет львиную долю запаса топлива корабля) могут быть изготовлены и заменены в солнечной системе назначения, контейнеры будут измельчены в сверхтонкую пыль и сброшены за борт. Со скоростью до девяноста двух процентов от скорости света пыль будет лететь впереди замедляющегося корабля, взрывая межзвездные зерна и расчищая временный путь. (Траектория должна быть такой, чтобы релятивистские пылевые потоки рассеивались и вылетали из галактики, не проходя вблизи звезд и не рискуя детонировать в атмосферах планет.*

*Этот поток релятивистской пыли является первой линией обороны от частиц, встречающихся на конечном этапе захода на посадку. При работе кормового двигателя в направлении полета поля капельного распыления станут полезными только для отвода тепла от кормового двигателя, поскольку вдоль троса «вверх» теперь стало «внизом», и капли могут распыляться только «вверх», за двигателем, где, двигаясь с постоянной скоростью, они упадут обратно на замедляющийся корабль. Для защиты от частиц и зерен впереди корабля, сверхтонкие «зонтики», изготовленные из*

*органических полимеров, похожих на майлар, и уложенные в тысячи слоев, должны быть опущены в направлении полета.*

*Это вторая линия обороны — против частиц, дрейфующих в постоянно удлиняющемся столбе пространства между кораблем и «кулаком». Зонтики будут вести себя во многом как щит от капель, и, аналогично, они будут спроектированы с учетом быстрого самовосстановления.*

*Во время крейсерской фазы полета псевдогравитация создается путем вращения всего отсека экипажа (который также является посадочным аппаратом, с жилыми помещениями, примерно равными однокомнатной квартире) на подвесной системе (уравновешенной припасами) для создания силы, эквивалентной одной земной гравитации (или одному g). Два члена экипажа (предположительно, муж и жена), вероятно, должны будут весить около 55 килограммов или ниже, чтобы наилучшим образом выдержать ускорение в два g, необходимое для достижения 92-процентной крейсерской скорости, а затем замедлиться с нее. Как фаза ускорения, так и фаза замедления полета длятся в течение шести месяцев, как это видят внешние наблюдатели (немного меньше для экипажа: при 70-процентной скорости света экипаж уже стареет почти на треть медленнее, чем остальная вселенная; при 92-процентной скорости они стареют только на один день за каждые три дня, проведенных на Земле).»*

# Глава 10. Проект «100 Year Starship»

**Проект 100 Year Starship** (100YSS) представлял собой совместную инициативу Агентства перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) и Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), рассчитанную на один год для изучения возможностей создания межзвёздного корабля в течение столетия. В исследовании рассматривалась разработка жизнеспособной и устойчивой модели для постоянных, долгосрочных инвестиций частного сектора в бесчисленное множество дисциплин, необходимых для того, чтобы сделать межзвездные космические путешествия осуществимыми и возможными. Целью было изучить, что потребуется — организационно, технически, социологически и этически — для разработки возможности отправки людей к другой звезде в течение 100 лет. Исследование завершилось грантом в размере 500 000 долларов, предоставленным консорциуму под руководством Фонда Дороти Джемисон за выдающиеся достижения, что привело к созданию независимой организации, унаследовавшей название 100 Year Starship от DARPA. Ежегодные симпозиумы 100YSS проводились с 2011 по 2015 год и снова в 2023 году.

Исследование 100 Year Starship было задумано летом 2010 года директором Тактического технологического офиса DARPA Дэвидом Нейландом как попытка создать целостную и устойчивую модель для настойчивых, долгосрочных секторов инвестиций в мириады дисциплинированных, необходимых для того, чтобы сделать дальние космические путешествия практичными и осуществимыми. Исследование было направлено на то, чтобы способствовать возрождению чувства удивления среди студентов, академических кругов, промышленности, исследователей и населения в целом, чтобы они задумались «почему бы и нет» и побудили их заняться совершенно новыми видами исследований и разработок, связанных со всеми вопросами, связанными с длительными дальними космическими полетами. DARPA предположило, что такие исследования могут принести пользу Министерству обороны и НАСА, а также частному и коммерческому сектору. Это было похоже на то, как научная фантастика подталкивала поколения ученых и инженеров следовать по их карьерному пути, как способ захватить воображение людей, которые обычно не думают заниматься исследованиями и разработками, и пометить их чем-то, что их воодушевит. Вдохновением для 100YSS послужил научно-фантастический роман Роберта Хайнлайна 1956 года «Время для звезд», в котором Фонд Long Range создал технологии, на разработку которых ушли поколения, но в конечном итоге они принесли пользу всему виду. Нейланд назначил Пола Еременко из Управления тактических технологий руководителем программы и координатором исследований для 100YSS. Еременко убедил директора Исследовательского центра NASA Ames Пита Уордена сотрудничать с DARPA в этом проекте. DARPA профинансировало усилия в размере 1 миллиона долларов, а NASA Ames предоставило 100 тысяч долларов в качестве вспомогательного финансирования. DARPA намеревалось начать годовое исследование 100YSS 1/11/11 со встречи визионеров для стратегического планирования, за которой последовал коммерческий запрос предложений летом 2011 года, затем международный симпозиум осенью 2011 года и, наконец, присуждение гранта исследовательского фонда в конце 2011 года. Однако Уорден опередил DARPA и преждевременно объявил о зарождающемся исследовании до внутренней правительственной координации на конференции Long Conversation в Сан-Франциско в октябре 2010 года. Это вызвало значительные проблемы в правительственных кругах и вынудило DARPA немедленно выпустить ранний пресс-релиз от Еременко.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.