

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Давайте попытаемся спроектировать идеальный геокосмический транспорт. Идеальный теоретически, так как историческая практика показывает, что рано или поздно конструкторы "выжимают" из техники все, что можно, и она достигает в своих возможностях теоретического потолка, выше которого, увы, уже не прыгнешь. Но прежде, чем искать потолок, до которого мы попытаемся допрыгнуть, необходимо выяснить — а нужно ли это делать? Мы знаем, что те же автомобили, теплоходы, самолеты далеки от теоретического совершенства, но ничего, справляются с поставленными задачами. Даже паровоз, вошедший в реплику "хуже паровоза" и ставший нарицательным (а что в технике может быть хуже паровоза?), скоро вернет часть отданных тепловозу и электровозу позиций на транспорте. Так зачем же нам искать какой-то мифический идеальный транспорт для геокосмических перевозок?

Не будем торопиться с выводами. По прогнозам ООН численность населения планеты составит к 2050 году 9,5 миллиардов человек /I/. В настоящее время в развитых странах годовой объем промышленной продукции в расчете на одного жителя составляет около 30 тонн. Если средний мировой уровень производства достигнет к середине будущего века хотя бы уровня современных развитых стран, то на Земле будет ежегодно производиться около 300 миллиардов тонн промышленной продукции.

Для того, чтобы можно было бы всерьез говорить о значительном вкладе космической индустрии в земную, ее массовая доля в мировом производстве промышленной продукции должна быть равна хотя бы одному проценту. В абсолютном выражении это составит 3 миллиарда тонн готовой продукции. Если перевести продукцию на сырье, то геокосмические перевозки, так как указанная продукция будет произведена

для удовлетворения нужд человечества, проживающего не в космосе, а на Земле, должны составить величину порядка 10 миллиардов тонн грузов в год. Цифра огромная, но именно на нее, как минимальную, и нужно ориентироваться.

Ни одна из известных транспортных систем не сможет обеспечить такой фантастический (по нынешним представлениям) объем геокосмических перевозок. Правда, такой ли уж фантастический?

К стомиллиардному рубежу перевозок человечество подошло более десяти лет назад /8/. Из этих 100 млрд тонн грузов один только железнодорожный транспорт перевез десятки миллиардов тонн. А ведь кроме железных дорог есть еще речные и океанские суда, трубопроводный транспорт, самолеты и автомобили. Когда появились первые автомобили, скептики уверяли, что они совершенно не нужны, так как есть фиакры, прекрасно справлявшиеся с перевозками. Сейчас же в мире насчитывается около 500 миллионов автомашин, которые каждый год перевозят десятки миллиардов тонн. А автомобилей все не хватает.

Так будет и с космическим транспортом. Отсутствие заказов на перевозку в космос миллиардов тонн грузов означает не отсутствие потребности в таком объеме транспортировки, а скорее — отсутствие транспорта, который удовлетворил бы такие потребности землян. Правда, периодически появляются различные грандиозные проекты индустриализации космического пространства, которые, однако, из-за отсутствия требуемого транспорта быстро признаются утопическими. Такова, например, судьба проекта "Космические поселения" профессора физики Принстонского университета Герарда О Нейла, предложившего начать строительство космических городов на десятки тысяч и миллионы жителей уже в недалеком будущем /2/. В этих городах, представляющих собой цилиндры диаметром 1...6 километров и длиной 3-30 километров, раскрученных вокруг своей продольной оси, будут даже

более комфортабельные условия чем на Земле: несколько пониженная гравитация, привычный цикл дня и ночи, естественный солнечный свет, обилие парков и лесов с озерами, реками, травой, деревьями, животными и птицами. Г.О Нейл считал, что к 2060 году в таких поселениях могли бы жить 16 миллиардов человек. По его оценкам в космос необходимо будет доставить от 50 до 5000 тонн различных материалов в расчете на одного человека, а для реализации всей программы необходимо будет доставлять на орбиту десятки и сотни миллиардов тонн различных грузов ежегодно.

А что значит доставить в космос 10 миллиардов тонн полезной нагрузки с помощью ракетного транспорта? Например, если использовать для этих целей многоразовый транспортный космический корабль "Спейс шаттл" грузоподъемностью 29,5 тонны, то потребуется свыше трехсот миллионов стартов корабля, а в атмосферу планеты будет выброшено при работе реактивных двигателей свыше 60 миллиардов тонн хлора и хлористого водорода, свыше 120 миллиардов тонн окислов углерода и 60 миллиардов тонн окислов алюминия /3, с. 25/.

В то время как уже подсчитано, что только 125 частых запусков такого самого мощного американского ракетно-носителя, как "Сатурн-5", или 85 запусков космического корабля "Шаттл" приведут к катастрофическому и необратимому разрушению озонового слоя Земли /4, с. 139/. Для сопоставления укажем, что за счет сжигания топлива разных видов на Земле в атмосферу сейчас ежегодно поступает более 20 миллиардов тонн углекислого газа и "всего только" свыше 700 миллионов тонн других газообразных соединений и твердых частиц, в том числе около 150 миллионов тонн сернистого газа /3, с. 18/.

Ясно, что от ракет при индустриализации космического пространства придется отказаться. Но это не означает, что человечеству придется отказаться и от самой индустриализации космоса, потому что мы пока не видим путей ее реализации. Иначе мы недооценим воз-

возможностей науки и техники, как, например, это произошло в знаменитом прогнозе комитета, изучавшего состояние лондонского транспорта в 1872 г. Было предсказано, что к 1972 г. город будет погребен под толстым слоем навоза. И этот прогноз был достаточно обоснован: с 1801 по 1851 г. Лондон вырос в три раза; в середине века в нем жило 2,5 миллиона человек и один миллион лошадей, каждая из которых производила шесть тонн навоза в год /5/.

Итак, все-таки попытаемся спроектировать идеальный транспорт, который смог бы удовлетворить грядущие потребности человечества при широкомасштабном освоении космического пространства. Для этого сформулируем требования, которым он должен удовлетворять.

Первое. Идеальным транспортным средством будет такое, которое использует для перемещения только внутренние силы. Почему? Все известные "экипажи" взаимодействуют с окружающей средой, на что не только тратится энергия, но и отравляется эта самая среда. Задача найти способ перемещения без взаимодействия с окружающим миром, тем более для перемещения с Земли в космос, конечно, весьма трудная, если вспомнить, что любой другой транспорт, будь то автомобиль, самолет, ракета или антигравитационный корабль, конструкцию которого "знают" только фантасты, да и то далеко не все, становится транспортом лишь в результате механического взаимодействия с окружающей материальной средой: поверхностью дороги, воздухом, путем выброса продуктов горения или взаимодействия с гравитационным полем. Но задача выполнимая, так как с ее "решением" в свое время успешно справился не привыкший мыслить шаблонно, изобретательный и находчивый барон Монхгаузен: используя удивительную силу своих рук он, однажды попав в болото, не растерялся, а изо всех сил дернул себя за косичку и без особого труда вытащил из болота и себя, и своего коня, которого крепко сжал обеими ногами, как щипцами.

Уверенность в том, что такая задача выполнима, продиктована не только техническими достижениями барона, но и отсутствием закона Природы, который бы гласил: "Запрещается для перемещения с Земли в космос использовать внутренние силы системы". В том, что такого закона нет, читатель может убедиться сам, хотя, без сомнения, его уже начал точить червь сомнения: "Что-то здесь не то".

Второе. Каждый килограмм груза, движущегося по орбите со скоростью 8 км/с, имеет кинетическую энергию, равную 32 Мдж^{*}, или 8,9 кВт х час. Такое количество энергии выделяют при сгорании 1,1 кг условного топлива, на что еще тратится, кстати, свыше 3 кг кислорода, который тоже необходимо отнести к топливу (условное топливо, строго говоря, — это не топливо, а горючее; топливо же — это "горючее + окислитель"). Каждый же миллиард тонн грузов, выведенный в ближний космос, будет иметь энергию, равную теплотворной способности 1,1 млрд тонн условного топлива, или если не океана, то целого моря нефти объемом 850 млн кубических метров. Еще больше понадобится кислорода на то, чтобы выделить заключенную в горючем химическую энергию, — его придется безвозвратно изъять из атмосферы планеты в количестве около 3 млрд тонн, либо получить искусственно, на что в свою очередь должна быть затрачена энергия, для получения которой необходим все тот же кислород. Такое количество топлива понадобится при стопроцентном использовании его энергии, что невозможно не только практически, но и даже теоретически.

И эту энергию к грузу должна подвести транспортная система. Поэтому, если ее общий КПД будет равен, скажем, 50%, то уже при транспортировке в космос 10 млрд тонн грузов в год тепловое загрязнение биосферы планеты космическим транспортом превысит ее нынешнее тепловое загрязнение в результате всех видов производственной деятельности человечества.

^{*} Такую энергию имеет мчащаяся с высокой скоростью пригородная электричка

Отсюда следует, что КПД геокосмической транспортной системы должен быть близок к 100%, а еще лучше, если он будет выше этого предела. Нет, авторы не призывают к попытке создать вечный двигатель и нарушить при этом закон сохранения энергии. Такое действительно невозможно. Но черпать энергию из окружающей среды, чтобы она могла совершать полезную работу в дополнение к той работе, которая производится специально подводимой для этой цели энергией, законы физики не запрещают. Кстати, с подобного рода задачей легко "справился" не знающий безвыходных положений Мюнхгаузен: слетав однажды на специально запущенном для этой цели ядре к противнику, — а ядро по мнению барона является вполне комфортабельным транспортным средством, — он, успешно справившись с заданием, пересел на ядро выстреленное противной стороной, и в мгновение ока вернулся обратно. При этом барон превысил энергетические возможности своего транспортного средства, то бишь ядра, воспользовавшись энергией ядра противника для возвращения назад, не вступив при этом в противоречие с законами физики.

Правда, тут есть одна тонкость. Слетав к противнику и возвратившись обратно, Мюнхгаузен вернулся в исходное состояние с исходными же энергетическими параметрами. Но даже, из школьного курса физики мы знаем, что если состояние системы не изменилось, то механическая работа, совершаемая при этом, равна нулю. И здесь мы сталкиваемся с противоречием: с одной стороны КПД использованного бароном транспортного средства превысил 100%, а с другой — он равен нулю, так как энергия затрачена, а полезная транспортная работа отсутствует. Кстати, такое противоречие присуще и другим известным видам транспорта. Любой из нас может добраться, скажем, из Москвы во Владивосток на поезде или самолете. А добравшись, сделать вывод, что поезд экономичнее самолета. Все вроде правильно. Но, с другой стороны, добравшись до Владивостока, мы будем иметь

те же энергетические параметры, что и при отправке из Москвы: то же состояние покоя и ту же высоту над уровнем моря (к небольшому различию между указанными высотами в приведенном примере придира-ться не следует, так как, честно говоря, авторы не знают их точных значений). Поэтому полезная работа, в ее классическом понимании, в данном случае равна нулю. Соответственно будет равен нулю и КПД каждой из описанных транспортных систем. Это и не удивительно, так как все 100% затрачиваемой энергии в них уходят в данном случае на потери - преодоления сил трения, сопротивления воздуха и т.п.

Строго говоря, термин "коэффициент полезного действия" для транспортной системы с замкнутым транспортным циклом, когда масса грузов "туда" равна массе грузов "оттуда" также будет неприемлем. Этот коэффициент всегда будет равен нулю, так как даже в самой совершенной системе потери энергии и, соответственно, ее затраты, неизбежны, а полезная работа при этом производиться не будет. А поскольку в любой устоявшейся транспортной системе масса грузов, направляемых "туда" равна массе грузов, идущих в обратном направлении (иначе рано или поздно все жители Владивостока перебрались бы в Москву, либо наоборот - все москвичи стали бы жителями Владивостока), то, видимо, не будет исключением из правил и будущая геокосмическая транспортная система, а все сказанное будет справедливым и для нее.

Итак, в идеальной геокосмической транспортной системе ее общий КПД будет зависеть от схемы функционирования. Если груз будет в процессе транспортировки переводиться в более высокоэнергетическое состояние (доставка с Земли в космос), то КПД транспорта должен быть равен 100% - всю подводимую энергию необходимо передать грузу. Если же груз нужно перемещать в менее энергетическое состояние (доставка из космоса на Землю), то КПД транспорта должно быть равно минус 100% - всю энергию груза (кинетическую и потенциальную)

следует отнять у него. Если же грузопоток с Земли в космос сравняется с обратным грузопотоком, то полезная работа, совершаемая транспортной системой, будет равна нулю, соответственно нулевым будет и ее КПД. А желаемого коэффициента полезного действия, превышающего 100%, можно достигнуть в том случае, если из космического пространства прибудет грузов на Землю больше, чем будет отправлено с нее в космос. Такой транспортной системе не только не нужна энергия, а, наоборот, она может служить источником энергии.

Третье. Поняв зыбкость понятия "КПД транспортной системы", попробуем расчленить его на более узкие понятия. Благодаря чему перемещается транспортное средство, например, самолет? Турбина самолета, то есть его двигатель, вращает винт, то есть движитель, который взаимодействует с окружающей средой, то есть воздухом, и толкает самолет, а с ним и груз, вперед.

Итак, подводимая к двигателю энергия, например, в виде энергии, заключенной в топливе, должна быть преобразована в механическую энергию движителя. Ясно, что в идеале КПД такого преобразования - 100%. Затем эту механическую энергию нужно передать движителю. Но должен ли он быть, если мы решили найти такой путь для выхода в космос, когда будут использованы одни только внутренние силы транспортного средства? Тут даже барон Мюнхгаузен нам не поможет. Придется выкручиваться самим.

Как будут осуществляться космические перевозки? Вначале груз необходимо погрузить в транспортное средство. Затем его нужно доставить на орбиту. При этом будет увеличена энергия груза (кинетическая и потенциальная). Здесь проблем нет - энергия может быть подведена как извне, так и из источников энергии, размещенных в самом транспорте. Но ведь не только энергия груза увеличится. Груз, движущийся по орбите, имеет также и значительное количество движения, равное произведению массы на скорость. Количество движения с

помощью одной энергии не подведешь, даже если воспользоваться знаменитой формулой А.Эйнштейна, устанавливающей эквивалентность массы и энергии - слишком легковесна энергия. Например, теплотворная энергия, заключенная в миллиарде тонн нефти будет "весить", а точнее - "иметь массу", равную всего 500 кг. И пусть даже эта энергия "движется со скоростью света", количество движения, которым она будет обладать, равна лишь $1,5 \times 10^{11}$ кг х м/с. Такого импульса достаточно для выведения на орбиту около 20 тысяч тонн грузов. Или для выведения 1 тонны груза понадобится сжечь 50 тысяч тонн нефти. Явно невыгодно. (Из приведенных цифр можно также сделать вывод о крайней энергетической неэффективности солнечных парусников, в которых импульс фотонов, падающих на парус, напрямую преобразуется в давление света).

Значит, транспортное средство должно иметь какой-то конструктивный элемент, который будет отдавать необходимое количество движения доставляемому в космос грузу - ведь мы запретили транспортному средству механически взаимодействовать с окружающей средой, поэтому оно должно нести требуемое количество движения в своем чреве. Этот конструктивный элемент и станет внутренним двигателем проектируемого транспорта.

Итак, груз будет помещен в транспорт, уже имеющий требуемое для космических путешествий количество энергии. Груз выводится на орбиту, причем двигатель передает ему необходимое для нахождения на орбите количество движения и, соответственно, требуемую для этого движения энергию. Затем транспортное средство забирает с орбиты другой груз и доставляет его на Землю, по пути отнимая у него излишнее количество движения и, соответственно, энергии. При такой схеме транспортировки энергия и количество движения станут циркулировать (или, как еще говорят, будет происходить их рекуперация) внутри системы, не выходя наружу, во внешнюю среду.

Таким образом, рекуперация и энергии и количества движения в системе неизбежны, иначе она не будет удовлетворять поставленным требованиям экологической чистоты. Это сразу дает нам возможность выбрать вид энергии, который необходимо использовать. Ясно, что тепловая энергия не подходит – цикл Карно накладывает ограничения на КПД, который принципиально не может быть близок к 100%. А при рекуперации эти КПД (подвода и отвода энергии) перемножаются, что уменьшит общее КПД системы до уровня паровоза.

Подойдет только электрическая энергия. Законы не налагают запрет на 100%-ное КПД электромагнитных систем. Скажем, современные электрогенераторы уже имеют КПД 98–99%. А ведь еще можно использовать явление сверхпроводимости и электрические потери вообще будут сведены к нулю.

Ясно и другое. Поскольку должна происходить рекуперация количества движения, причем количества значительного, то оно должно быть достаточно хорошо ограждено от неподвижных элементов конструкции. Поэтому без вакуума и магнитного подвеса нам не обойтись.

Четвертое. А сейчас объединим все предыдущие условия: геокосмическая транспортная система должна быть экологически чистой. Те грандиозные задачи, которые ей предстоит выполнить при индустриализации космического пространства, исключают механическое и энергетическое взаимодействие системы с окружающим миром в процессе транспортировки грузов. Иначе его загрязнение будет настолько ужасающим, что человечество просто-напросто откажется от такого пути развития. Откажется от гор хлеба и бездны могущества, говоря словами великого Циолковского.

Поиск решения

Попробуем подойти к решению поставленной задачи чисто логически. Будем фантазировать совершенно свободно, не опасаясь реплик

"внутреннего редактора".

Итак, самое главное – использование внутренних сил, как механических, так и энергетических.

Чтобы использовать внутренние силы, нужно ни на что не опираться. Станем мысленно убирать опору. Транспортное средство начнет падать, пока не достигнет центра Земли, что и не удивительно, так как безопорное статическое равновесие может быть только в центре масс планеты. Пробиваться, подражая инженеру Гарину к ядру Земли? Сделать сквозной канал через всю планету? Такую схему анализировал еще К.Э. Циолковский и пришел к выводу, что она не даст результата. Да и как вырыть колодец длиной свыше 12 тысяч километров, проходящий сквозь расплавленные недра планеты, давление в которых достигает значений почти в четыре миллиона атмосфер /6, стр. 73/ ?

Но в этом нет необходимости. Есть еще один путь, чтобы совместить центр масс конструкции с центром Земного шара и обеспечить таким образом безопорное равновесие. Решение напрашивается само собой: нужно, чтобы конструкция охватывала геоид. Возможны два варианта: полая сфера и кольцо. Первый вариант отпадает сразу: вряд ли человечество согласится жить в буквальном смысле под колпаком, хотя возможно, такое решение и устроило бы древних мыслителей, представлявших себе Землю, окруженную даже не одной, а несколькими хрустальными сферами.

Остается кольцо. Ну что ж, это не ново. Еще знаменитый изобретатель Никола Тесла, правда знаменитый своими смелыми экспериментами и оригинальными техническими решениями в области электро- и радиотехники, свыше ста лет назад предложил опоясать Землю кольцом по экватору /7/. В отличие от колец Сатурна, состоящих из камней и пыли, это – жесткое. Его строят с помощью лесов и подпорок, затем подпорки убирают, и кольцо свободно повисает в воздухе, вращаясь с

той же скоростью, что и Земля. А если кольцо удержать от вращения, земная поверхность понесется под ним со скоростью 1600 км/ч. На нем можно будет совершать путешествия, вплоть до кругосветных.

Но даже будучи юным, а в юности нам все кажется возможным, Никола понял, что его проект неосуществим. Почему? Кольцо, хотя оно ни на что и не опирается, испытывает силу тяжести и по своей сути является огромной аркой с длиной пролета свыше 12 тысяч километров (рис. 5.1). Опуская вывод расчетной формулы, лишь отметим, что усилие сжатия N в такой арке будет определяться очень простой формулой (знак "минус" означает, что конструкция работает на сжатие):

$$N = -qR, \quad (5.1)$$

где q - вес единицы длины арки; R - радиус планеты.

Легко подсчитать, что если мост Николы Теслы изготовить, например, из стали, то его конструкция будет испытывать напряжения, превышающие по своей величине давление в центре Земного шара. Нет таких конструкционных материалов, да и вряд ли они будут созданы. А ведь мы рассмотрели усилия в конструкции без учета того, что она работает на сжатие. При работе на растяжение растянутый элемент может быть сколь угодно большой длины, хоть в тысячи километров, как, например, в космическом лифте Юрия Арцутанова, длина которого превысит для условий Земли 40 тысяч километров. Сжатый же элемент может потерять устойчивость, искривиться, поэтому в нем появляется прогрессирующе увеличивающийся изгибающий момент, который и приводит конструкцию к разрушению. При этом напряжения в материале могут быть в сотни и тысячи раз более высокими, чем при действии точно таких же по величине внешних нагрузок, но вызывающих не сжатие, а растяжение элементов конструкции.

Поскольку сжимающие напряжения недопустимы, то может сделать

мост Теслы полым внутри и надуть его газом под давлением, достаточным для разгрузки конструкции хотя бы от ее веса (рис. 5.2) ? Для этого должно соблюдаться условие:

$$\sum q_y \leq 2F \quad (5.2)$$

где q_y - проекция весовой нагрузки на ось y ; F - продольное усилие в кольце, создаваемое давлением газа.

Поскольку $\sum q_y = 2qR$, а $F = \pi r^2 p$, где r - внутренний радиус поперечного сечения полого кольца; p - давление газа, то условие устойчивого равновесия такого моста примет вид:

$$2qR \leq 2\pi r^2 p, \quad (5.3)$$

откуда мы можем найти требуемое давление газа

$$p \geq \frac{qR}{\pi r^2} \quad (5.4)$$

Выразив линейный вес q через параметры планеты, вокруг которой будет устроен полый мост,

$$q = \rho q = \rho f \frac{M}{R^2} \quad (5.5)$$

где ρ - линейная плотность моста (масса единицы длины); q - ускорение свободного падения на поверхности планеты; f - гравитационная постоянная; M - масса планеты,

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho, \quad (5.6)$$

где ρ - средняя плотность вещества планеты, мы получим общее выражение для требуемого давления газа в оболочке моста не только для условий Земли, но и, например, для случая, когда такой мост будет устроен вокруг астероида:

$$p \geq \frac{4}{3} \rho g \left(\frac{R}{r} \right)^2 \quad (5.7)$$

На рис. 5.3 приведен график, показывающий зависимость давления газа в оболочке от значений линейной плотности кольца ρ и соотношения R/r для значения $Q = 5,5 \times 10^3$ кг/м³ (средняя плотность вещества Земли).

Из диаграммы следует, что при приемлемых значениях давления (до 100 атм, которые ограничены на графике штриховой линией) допустимы значения R/r до величины $R/r = 10^5$, что для условий Земли даст значение для поперечного сечения оболочки $r = 64$ м. Создать оболочку диаметром почти в 130 м и массой всего 1000 кг/пог.м (в эту массу входит и масса находящегося под давлением газа), к тому же выдерживающей давление в 100 атмосфер, нереально.

Хотя такой проект вполне реализуем для малых планет и астероидов, где возможны соотношения $R/r = 10^3 \dots 10^4$. Например, при радиусе астероида $R = 100$ км и радиусе поперечного сечения оболочки 10 м, избыточное давление в ней при $\rho = 10^3$ кг/м должно быть равно всего 5×10^4 Па (0,5 атм). Надувая такую оболочку сильнее, или наоборот, сбрасывая давление в ней, можно даже заставить ее подниматься над астероидом ("разбухать") или опускаться назад за счет продольной деформации ее материала. Например, чтобы подняться над таким астероидом на 1000 м, оболочка должна удлиниться всего на 1%, что легко достижимо. Причем такие подъемы будут совершаться за счет внутренних сил, так как изменять давление в оболочке можно с помощью бортовых систем.

Но ведь нам нужен не только подъем, а и скорость не ниже первой космической, иначе груз, доставленный в космос, просто-напросто упадет обратно на планету как метеор. При постановке задачи создания идеального геокосмического транспортного средства (ГТС)

в третьем условии мы определили, что оно должно иметь рекуператор количества движения и энергии.

Первую космическую и более высокую скорость движения кольцо может достигать двумя способами: путем быстрого увеличения диаметра, при этом скорость будет радиальной, либо путем раскрутки кольца вокруг планеты, при этом скорость будет тангенциальной (окружной) (рис. 5.4). Проанализируем оба пути.

При радиальном выведении груза, а по отношению к Земле – при вертикальном направлении его движения, будет происходить равноускоренное увеличение диаметра кольца и, соответственно, – его длины. Затем, при достижении расчетной скорости движения, груз должен быть отцеплен, а расширение кольца – заторможено, иначе оно не только удлинится, что порвется. Условия выведения груза в космос должны быть более комфортными, чем в нынешних ракет-носителях, поэтому принимаем ускорение вертикального подъема $a = 20 \text{ м/с}^2$ (перегрузка – две единицы). Конечная скорость груза, при которой он должен быть отцеплен от кольца, будет не ниже второй космической, то есть $v_{II} = 11,2 \text{ км/с}$. Иначе груз упадет обратно на Землю.

Тогда время разгона $t = v_{II}/a = 560 \text{ с}$. За это время радиус кольца увеличится на $\Delta R = \frac{at^2}{2} = 3,1 \times 10^6 \text{ м}$. Соответственно его длина должна увеличиться на относительную величину $\mu = \Delta R/R = 0,48$, или на 48%. Столько же времени потребует процесс торможения кольца, при этом оно пройдет точно такой же путь. Поэтому кольцо будет заторможено на высоте, примерно равной радиусу Земли, а его относительное удлинение составит при этом около 100%. Трудно будет создать такое кольцо. Хотя для малых планет приведенные цифры будут более приемлемыми (благодаря более низкой первой космической скорости) и такая схема транспортировки будет вполне реализуемой. Радиальное направление выведения груза в космос плохо еще и потому, что груз навсегда покинет зону притяжения Земли и станет

странником Солнечной системы, а при более высокой скорости, — и галактики. Причем груз "разбредется" настолько далеко, что собрать его уже не будет никакой возможности. Да и скорости различных грузов, в зависимости от их местонахождения на кольце, будут различаться друг от друга на десятки километров в секунду, хотя, казалось-бы, они будут выброшены в космическое пространство все с одинаковой скоростью. Скорости грузов были бы равными, если считать Землю неподвижной. Но ведь она летит в пространстве вокруг солнца со скоростью $v_z = 30$ км/с (рис. 5.5), поэтому в направлении движения планеты скорости v_r и v_z (скорости груза и планеты) будут суммироваться, а в противоположном направлении — вычитаться.

Значит, остается тангенциальный способ выведения грузов на орбиту. Но как это сделать за счет внутренних сил? В условии номер три постановки задачи по созданию идеального транспортного средства мы выяснили, что оно должно иметь рекуператор количества движения и энергии. Но поскольку рекуперация должна совершаться за счет внутренних сил, без взаимодействия с окружающей средой, то на каждом этапе функционирования — при нахождении на Земле, подъеме в космос и нахождении на орбите — общее количество движения ГТС и его механическая энергия (кинетическая энергия плюс потенциальная энергия) должны быть неизменны. Как же тогда должно быть устроено ГТС?

В конце пути кольцо обязано обеспечить своим пассажирам скорость не ниже первой космической. А в начале оно должно быть неподвижным, ведь "на ходу" в него не вскочишь. Выход только один: сделать общепланетную "баранку" из нескольких колец, способных вращаться независимо друг от друга. Тогда, отталкиваясь от одного из них, другие могут получить необходимые скорости, не взаимодействуя с окружающей средой. Очевидно, должно быть внешнее кольцо — корпус транспортного средства. Внутри него в специальных кожухах

расположены рабочие кольца-маховики, каждое из которых выполнено в виде бесконечной электропроводной ленты.

Еще раньше мы выяснили, что ленты должны быть размещены в вакууме, поэтому из каждого кожуха должен быть выкачан воздух. Так же было выяснено, что для привода подходит только электрическая энергия, поэтому он будет выполнен в виде линейного электродвигателя, как и маховики, бесконечного, то есть замкнутого в кольцо. Чтобы маховики не касались стенок кожуха, они подвешены с помощью магнитного подвеса. Вроде все выяснили, кроме одного: сколько должно быть независимых колец? Хотелось бы поменьше, два кольца, как это показано на рис. 5.6, но это надо выяснить.

Проанализируем функционирование ГТС. После строительства транспортного средства на Земле нужно ввести в него требуемое для космического путешествия количество движения и энергии. Для этого на обмотки статора линейного электродвигателя подают переменный электрический ток, в результате чего возникает бегущее вдоль статора магнитное поле, образуемое многофазными токами его обмоток. В ленте маховика неводятся поперечные электрические потоки. Наведенные токи, как в любом электродвигателе, взаимодействуют с бегущим магнитным полем статора, в результате чего возникает механическая сила, приложенная вдоль продольной оси маховика. Одновременно с этим происходит магнитное подвешивание ленты маховика по центру канала, в котором он размещен, и стабилизация этого положения. Лента, не испытывая сопротивления, так как размещена в вакууме и не касается стенок канала, приходит в движение вдоль него и соответственно, — во вращение вокруг Земли, постепенно набирая высокую скорость. При достижении первой космической скорости лента становится невесомой, а при дальнейшем увеличении скорости — будет стремиться подняться вверх (перейти на более высокую круговую орбиту), но магнитный подвес удержит ее от подъема. Но скорость про-

должна расти, поэтому центробежная сила (центробежной силы, как таковой, в природе не существует, это – всего лишь математический прием, с помощью которого более просто могут быть решены многие проблемы движения тел по криволинейным траекториям) от вращения маховика будет передаваться через магнитный подвес на корпус ГТС, оказывая на него все возрастающее вертикальное давление, пока не уравнивает каждый его погонный метр. Но скорость увеличивают еще, чтобы появилась избыточная подъемная сила, а корпус удерживают от подъема, например, с помощью магнитных захватов.

В транспортном средстве, с предварительно раскрученным до расчетной скорости маховиком, размещают груз и пассажиров. Большие грузы подвешивают на канатах прямо к корпусу. После освобождения диаметр кольца начнет медленно расти. Для подъема достаточно, чтобы превышение центробежной силы над весом достигло 10 Н на погонный метр. При этом продольное усилие в кольце, которое и будет заставлять его удлиняться, согласно формуле (5.1) может достичь значения (если оказывать сопротивление растяжению) $6,4 \times 10^7 \text{ Н}$, или 6400 тонн. Такого усилия вполне достаточно, чтобы преодолеть все возможные и случайные помехи движению.

После выхода из плотных слоев атмосферы, например, на высоте 50 км, уже можно начать приводить во вращение вокруг Земли корпус транспортного средства. Для этого обратимый привод (линейный электродвигатель) включают на генераторный режим. Двигатель, раньше использовавшийся для разгона ленты маховика, сейчас начнет работать как генератор, при этом маховик будет тормозиться, а двигатель – вырабатывать электрический ток. Корпус транспортного средства подчиняясь закону сохранения момента количества движения вокруг Земли, – под действием реактивного (тормозного) усилия возникающего не только в ленте маховика, но и, согласно третьему закону Ньютона, в обмотках двигателя, связанных с корпусом – приходит в

движение в ту же сторону, что и маховик, пока не достигнет первой космической скорости. Очевидно, что начальный запас количества движения и энергии должен быть достаточным, чтобы вывести и ГТС и груз на круговую орбиту с первой космической скоростью. Большой избыток энергии не нужен, иначе это потребует дополнительных расходов энергии и связанных с этим ее потерь.

Поэтому после выведения на орбиту маховик будет заторможен до скорости, равной нулю относительно корпуса. Но поскольку корпус в этот момент будет иметь первую космическую скорость, то точно такую же скорость будет иметь после торможения и маховик (отсюда видно, что на Земле маховик должен быть разогнан до более высокой скорости).

Из механики известно, что если тело массой m_k , двигавшееся со скоростью v_{k0} , и тело массой m_l , двигавшееся со скоростью v_{l0} , после механического взаимодействия друг с другом стали двигаться вместе с одинаковой скоростью v , то такое взаимодействие называется полностью неупругим ударом. Скорость движения тел v после полностью неупругого удара можно определить на основании закона сохранения количества движения. Она будет равна /9, стр. II7 ... II8/:

$$v = \frac{m_k v_{k0} + m_l v_{l0}}{m_k + m_l} \quad (5.8)$$

Кинетическая энергия тел после удара будет иметь следующую величину:

$$E_n = \frac{1}{2} (m_k + m_l) v^2 = \frac{(m_k v_{k0} + m_l v_{l0})^2}{2 (m_k + m_l)} \quad (5.9)$$

А до удара кинетическая энергия обоих тел была равна:

$$E_d = \frac{1}{2} m_k v_{k0}^2 + \frac{1}{2} m_l v_{l0}^2 \quad (5.10)$$

Определим "потери" механической энергии, или ту часть энергии, которая во время удара перешла в тепловую (а в ГТС - электрическую) форму:

$$\Delta E = E_d - E_n = \frac{1}{2} \frac{m_k m_l}{m_k + m_l} (v_{lo} - v_{ko})^2 \quad (5.11)$$

В принятых обозначениях индекс "К" относится к корпусу ГТС, "Л" - к ленте маховика. Выразим массу маховика через массу корпуса:

$$m_l = k m_k \quad (5.12)$$

Для упрощения будем считать, что начальная скорость движения корпуса транспортного средства, при его нахождении на поверхности планеты, равна нулю, то есть $v_{ko} = 0$, хотя, например, на экваторе поверхность Земли при ее суточном вращении и движется со скоростью 464 м/с. Но поскольку эта скорость мала в сравнении с космическими скоростями, то ею можно пренебречь. Тогда относительные потери энергии $\Delta E/E_n$ и $\Delta E/E_{kk}$, где E_{kk} - кинетическая энергия корпуса после вывода в космос (скорость его движения v), а также относительная начальная скорость движения маховика v_{lo}/v будут равны:

$$\frac{\Delta E}{E_n} = \frac{1}{k} \quad (5.13)$$

$$\frac{\Delta E}{E_{kk}} = \frac{1+k}{k} \quad (5.14)$$

$$\frac{v_{lo}}{v} = \frac{1+k}{k} \quad (5.15)$$

Диаграммы относительных потерь энергии в транспортном средстве с одним маховиком, вычисленных по формулам (5.13) и (5.14), а также относительной скорости маховика, вычисленной из зависимости (5.15), представлены на рис. 5.7 и 5.8 соответственно. Из этих диаграмм можно сделать важные выводы, необходимые для дальнейшего конструирования ГТС.

Во-первых, потери энергии уменьшаются при относительном увеличении массы маховика и становятся равным нулю при h , стремящемся к бесконечности. Во-вторых, относительная начальная скорость маховика также резко падает при увеличении его массы и становится равной 100% (то есть равной скорости, которую будет иметь корпус транспортного средства на орбите, а она в свою очередь будет равна первой космической скорости) при h , стремящемся к бесконечности. Поэтому, чем массивнее будет маховик, тем более приемлемыми будут режимы эксплуатации ГТС. Но ясно, что он не может составлять всю массу транспортного средства, иначе на корпус и все, что с ним связано (двигатель, система создания магнитного подвеса, полезная нагрузка и т.п.) ничего не останется. Например, при $h = 1$ (масса маховика составляет 50% от всей массы транспортного средства; на все остальное, соответственно, также придется 50%) потери энергии составят 100% от общей кинетической энергии находящегося на орбите транспортного средства, при этом начальная скорость ленты маховика составит $v_{\text{л0}} = 2v = 16$ км/с. При $h = 5$ потери энергии будут уже равны 20%, а $v_{\text{л0}} = 1,2v = 9,6$ км/с. Поэтому, если ГТС будет одинаковой массы в обоих случаях, то для космических путешествий предпочтительнее второй вариант, так как потери энергии в нем будут в пять раз меньшими.

Если же потери энергии сравнивать с энергией корпуса транспортного средства, которую он будет иметь, находясь на орбите, то согласно зависимости (5.14) относительные потери энергии будут

значительно более высокими (кривая δ на рис. 5.7). Причем эти потери всегда более 100%.

Хотя, в принципе, потерь энергии, как таковых, может и не быть. Электрическая энергия, вырабатываемая линейным электродвигателем в процессе торможения маховика и имеющая суммарную величину (выделение энергии будет растянуто во времени), определяемую формулой (5.11), может быть использована и, таким образом, не будет потеряна. Например, ее можно передать потребителям как на Земле, так и в космосе, с помощью микроволновых излучателей, которыми можно снабдить ГТС. Эта энергия может быть также накоплена в специальных электрических аккумуляторах, размещенных в транспортном средстве. Но это либо усложнит его конструкцию, либо в окружающую среду будут поступать мощные потоки энергии, не так уж и безвредные для нее.

Поэтому выделяющуюся в процессе выхода на орбиту энергию целесообразнее всего утилизировать в самом транспортном средстве. Лучше всего, когда энергия будет не просто аккумулироваться, но и, накапливаясь, — давать дополнительное количество движения корпусу транспорта. В конечном счете это не только уменьшит общие потери энергии, но и облегчит выведение полезной нагрузки на орбиту.

Итак, мы пришли к окончательной конструкции идеального геокосмического транспорта, который должен иметь минимум три кольца: корпус и два бесконечных маховика. При подъеме в космос первый маховик будет тормозиться, а вырабатываемая при этом энергия будет переключена на линейный двигатель второго маховика, который станет разгоняться в противоположном направлении. Это обеспечит полную рекуперацию энергии внутри транспортного средства и исключит ее потери, при этом второй маховик облегчит разгон корпуса до требуемой первой космической скорости.

Вариант выполнения такого транспортного средства, известного

под названием "Общепланетное транспортное средство" (ОТС), показан на рис. 5.9.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Вишневский. Сколько нас будет в XXI веке ? "Знание - сила", 1983 г., № I, стр. 13.
2. Космические поселения. "Наука и жизнь", 1976 г., № 5, стр. 46 ... 51.
3. Новиков Л.С. и др. Экологические аспекты космонавтики.- М.: Знание, 1986.- 64 с., - (Новое в жизни, науке, технике. Сер. "Космонавтика, астрономия" ; № 5).
4. Зигель Ф.Ю. Вам, земляне. Изд. 2-е, перераб.- М.: Недра, 1986.- 161 с.
5. М.Арапов. Трудно быть оракулом.- "Изобретатель и рационализатор", 1979, № 10, стр. 40.
6. К.А.Куликов, Н.С.Сидоренков. Планета Земля. М.: Наука, 1977.- 192 с.
7. Электрический прометей. "Изобретатель и рационализатор", 1979, № 4, стр. 25.
8. "Техника - молодежи", 1977, № 8, стр. 13.
9. Стрелков С.П. Механика. - М.: Наука, 1975.- 560 с.