

Глава 6.

Конечно, проект ОТС был рожден не путем тех стройных логических умозаключений, которые описаны в предыдущей главе. Иначе изобретать стало бы скучно, да и слишком все было бы просто: ставь задачу, бери с полки свод логических правил и получай готовое решение. В жизни все гораздо сложнее. В данном случае тоже. На осмысление проекта и всесторонний его анализ, занявший всего несколько страниц текста, понадобились годы, которые прошли у автора общепланетной транспортной системы (и одного из авторов книги, которую держит сейчас в руках читатель) в жарких спорах с друзьями, знакомыми, коллегами по работе и специалистами из совершенно разных областей знаний, начиная от физиков, механиков и математиков и кончая философами и социологами.

Принципиальная схема ОТС родилась прозаично, в поисках решений чисто земных, а не космических, проблем. Увлечшись идеями крупного советского изобретателя Нурбея Гулиа, автор загорелся желанием создать идеальный, конечно в пределах возможностей науки и техники, накопитель энергии. Знакомство с этой проблемой выявило множество возможных схем накопления энергии, от которых можно оттолкнуться в поисках идеала. Энергией, как известно, разбрасываться не следует. Ее надо экономить. Но как? Ведь электрическая нагрузка, которую приходится покрывать энергосистемам, сильно колеблется в зависимости от времени года и времени дня — в ней есть свои "пики" и "провалы". Паровые, газовые и водяные турбины, мощные двигатели разных типов вращают генераторы электростанций. Останавливать их или даже снижать мощность по ночам крайне невыгодно. В то же время, как говорится, девать энергию порой некуда. Поэтому энергетики вынуждены идти на компромиссы: снижают по ночам подачу воды к гидротурбинам, приглушают топки тепловых электро-

станций, хотя это и сильнее изнашивает оборудование, снижает срок его службы и повышает аварийность. Но все равно, качество электрической энергии из-за несоответствия ее выработки и потребления резко снижается в ночное время. Например, частота тока в нашей стране повышается в ночные часы до 51-52 Гц /26/, что крайне неблагоприятно сказывается на потребителе этой энергии.

Сейчас мощности электростанций рассчитаны на максимум нагрузки. Если бы появились "склады энергии", это позволило бы очень существенно снизить мощность электростанций, значительно удешевить всю энергосистему.

Наиболее известной является гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС). Устроена она просто: при недогрузке "лишняя" энергия идет на закачку воды в водоем, расположенный выше станции. А в часы "пик" воду направляют к турбинам, вращающим роторы электрогенераторов. Однако у ГАЭС плотность энергии (основной показатель накопителей) мизерная, всего около 1 МДж/м³, к тому же и КПД маловат, хотя и приемлем - примерно 65%.

Примерно такие же КПД и плотность энергии у накопителей, работающих на сжатом воздухе. Обычно их монтируют в старых шахтах, рудниках, или штольнях, куда и закачивают воздух, доводя его давление до 100 атмосфер. Потом его, как и воду направляют в турбину.

Преимущества тех и других накопителей энергии сочетают в себе пневмогидрааккумулирующие электростанции (ПГАЭС). Они имеют более высокую плотность энергии и постоянство давления газа независимо от его количества в резервуаре. На один из первых вариантов ПГАЭС, представляющей собой куполообразный резервуар из пленки, размещенный в море на глубине около километра и соединенный напорной шахтой с находящимся на плаву машинным залом, автор этих строк подал даже заявку на предполагаемое изобретение. По-

лучив отказные решения экспертизы, в которых сообщалось, что заявленная станция ничем не отличается от запатентованного в Англии танкера для хранения и перевозки нефти и парника для выращивания ранних огурцов и капусты из книги "Овощеводство", изданной издательством "Колос", автор понял, что он на правильном пути и продолжал поиск.

Известны и так называемые водородные аккумуляторы. В них избыточная энергия разлагает воду на водород и кислород, которые затем соединяются в топливных элементах, превращаясь обратно в воду и вырабатывая электроэнергию. Но они тоже "не фонтан" - сложны, да и плотность энергии маловата - ниже 100 Мдж/м^3 .

Более эффективны устройства, собирающие энергию в веществе за счет скрытой теплоты его плавления. Плотность энергии у таких накопителей достигает 600 Мдж/м^3 , но КПД их уж больно невысок - около 30%. Правда, такие аккумуляторы энергии значительно лучше более простых тепловых накопителей, в которых естественное или искусственное озеро укрывается пенопластовой "шубой", а затем вода нагревается избыточной энергией вплоть до ее температуры кипения. Долго держит вода тепло, чтобы при необходимости вернуть, хотя и небольшую его часть, обратно в сеть.

Интересны также сверхпроводящие накопители. Если кольцо сверхпроводника охладить до температур жидкого гелия, то электрическое сопротивление в проводнике полностью исчезнет. Теперь можно возбуждать в нем электрические токи, благодаря чему его огромное электромагнитное поле накопит значительный запас энергии. Так ее можно хранить годами. Естественно, кольцо нужно все время охлаждать жидким гелием, который, в свою очередь, надо держать в жидком азоте, чтобы не вскипел. Но это не все. Накопитель нужно одеть в мощную "броню", так как огромные электродинамические силы буквально разрывают сверхпроводник на части, а случайная потеря сверхпро-

водимости способна обернуться сильнейшим взрывом. Подобные накопители тем выгоднее, чем они мощнее. Их КПД достаточно высок — 95%, хотя плотность энергии у них невелика и не превышает 100 Мдж/м³.

Но наиболее компактный накопитель — это маховик диаметром 3–5 м и массой около 200 т, размещенный в камере, из которой откачан воздух. Насаженный на вал электрогенератора, способного работать и в режиме двигателя, он вращается со скоростью около 3000 об/мин, набирая до 10^{11} Дж энергии. Изготавливают такие сверхмаховики из высокопрочных и легких кварцевых, кремниевых и других волокон, чтобы повысить плотность энергии и исключить опасность разрыва.

А если увеличить размер маховика? Ничего не получится. Маховик разорвется и, как ни странно, его разрушение начнется от центра, от оси вращения, — там наибольшие растягивающие напряжения. Тогда уберем центральную часть маховика вместе с валом. Оставим один только обод, разместив его в вакуумной тороидальной камере. На весу обод удерживается магнитными силами. Будучи однажды раскручен, он способен вращаться годами. Раскручивает его и изымает обратно мощность обратимый асинхронный электродвигатель, только свернутый, как и камера, в кольцо.

Лишь через много лет выяснилось, что точно так рассуждал, причем примерно в одно и то же время, и сам Нурбей Гулиа. В этом читатель может убедиться, если возьмет в руки журнал "Техника — молодежи", № 6 за 1982 год. Надо же быть такому совпадению: наши статьи* напечатали одновременно и в одном и том же номере журнала! Однако Гулиа, будучи специалистом по накопителям энергии, был, наверное, полностью удовлетворен полученным результатом как профессионал — создана принципиальная схема сверхнакопителя с гигантской

* Нурбей Гулиа. "Сверхнакопитель энергии", стр. 10–11, и Анатолий Юницкий "В космос ... на колесе", стр. 34–36.

плотностью энергии, достигающей значений 10^{12} Дж/м³.

Другой же автор, не связанный профессиональными рамками, продолжал рассуждать дальше.

Чтобы обеспечить нужды завода, кольцевой сверхнакопитель энергии (КСЭ) будет небольшим. Для города его нужно делать побольше размером, например, в виде кольца, размещенного в подземном канале, который будет охватывать город. А если обеспечивать накопленной энергией регион, республику или страну в целом? Кольцо придется делать диаметром в десятки и даже сотни километров. А если создать единую энергосистему на планете и замкнуть ее и потребителя непосредственно на КСЭ? Тогда ни один джоуль энергии не пропадет. Вся энергия, выработанная электростанциями, будет поглощена сверхнакопителем, откуда потребитель сможет черпать ее когда угодно и сколько угодно, конечно, в пределах того количества энергии, которое накачено в накопитель.

Для выполнения таких задач КСЭ должен иметь диаметр кольца уже в тысячи километров. Трудно подобрать на суше подходящее для него место. Ну что ж, разместим его в океане, на плаву. Например на поверхности воды. А еще лучше, чтобы не мешали шторма, — под водой на глубине в несколько десятков метров. Такой супермаховик сможет сгладить суточные пики в потреблении энергии целых стран и континентов, накапливая ее, почти бесплатную, в ночные часы, и отдавая в электрическую сеть по утрам и вечерам, когда потребление энергии резко возрастает, особенно в часы показа на голубых экранах любимых телефильмов, а также — чемпионатов мира по футболу и хоккею. Но ведь можно сглаживать не только суточные пики потребления энергии, но и сезонные. В таком случае все электростанции весь год работали бы в одном и том же оптимальном режиме, а энергия через КСЭ распределялась по регионам в соответствии с суточными и сезонными потребностями.

Для этого необходимо еще больше увеличить диаметр супермаховика. Вот так, мысленно увеличиваясь и увеличиваясь в размерах, кольцо КСЭ взяло и "наделось" на Земной шар по экватору. Да, это максимально возможные на планете размеры. Но сколько же энергии сможет накопить в себе это гигантское сооружение? Разгоняем кольцо маховика все быстрее и быстрее. Накапливаемая энергия все растет и растет. Вот уже достигнуты космические скорости. И тут как током ударило: ведь при первой космической скорости маховик станет невесомым — он же охватывает планету, и лежит в плоскости, проходящей через ее центр масс, и, таким образом, представляет собой спутник, летящий по круговой орбите! А если еще сильнее разогнать? Появится избыточная сила, направленная в каждой точке кольца вертикально вверх (по отношению к поверхности геоида). Ну а если еще добавить скорость? Подъемная сила может превысить вес всей конструкции и она, растягиваясь и "разбухая" поднимется с Земли и скроется за облаками.

Поняв, что родилась идея какой-то необычной транспортной системы, автор сосредоточил свои основные усилия именно на ней, совершенно забыв о накопителях энергии. Правда, в ходе описанного анализа, который занял около года, были оформлены еще шесть заявок на изобретения на различные варианты накопителей энергии, но их постигла участь упомянутой заявки на пневмогидроаккумулирующую электростанцию. Восьмую же по счету заявку на охватывающий планету "Инерционный аккумулятор энергии" ждала еще более суровая судьба — она трижды возвращалась с предварительной экспертизы и так и не была принята к рассмотрению.

Но вернемся к ОТС. Если ленту маховика разогнать до космических скоростей, то она, "разбухая", не только сама выйдет в космос, но и поднимет с собой и груз и пассажиров. А если сам маховик выполнить в виде полезной нагрузки и отпускать его одного в

космос ? Такой грузовой вариант ОТС вполне возможен.

Представьте себе ажурную эстакаду, типа пешеходных переходов через железнодорожные пути, идущую за горизонт в обоих направлениях. Эстакада копирует крупный рельеф местности и сглаживает микрорельеф земной поверхности. Она охватывает планету по экватору, длина которого, как известно, 40075,7 километра, или проходит в плоскости, параллельной ему, на расстоянии до нескольких тысяч километров (рис. 6.1). Над водными просторами, которые протяженнее суши (на экваторе они составляют $3/4$ его длины), эта конструкция будет поддерживаться на заякоренных плавучих платформах (рис. 6.2). Опорами эстакады будут служить также энергетические и административные сооружения, заводы и цехи космического уклона, жилые здания и станции формирования космического грузопотока. Таким опорам на водных просторах океанов бури не страшны, так как их понтонные платформы размещены ниже самых глубоких впадин между волнами, вызванными ураганными ветрами, достаточно частыми в экваториальной зоне. Сами же опоры и решетчатая эстакада благодаря своим небольшим поперечным размерам не будут испытывать значительных ветровых нагрузок.

Поверх эстакады будет размещен идущий вдоль нее путь, представляющий собой вакуумируемый канал, в стенках которого размещен линейный электродвигатель и система магнитного подвеса ротора (рис. 6.3). Ротор предназначен для выведения в космическое пространство, поэтому и его корпус и сердечник изготовлены из доставляемой в космос полезной нагрузки — сырья и материалов, а также полуфабрикатов крупногабаритных изделий, например, солнечных электростанций, имеющих стержневую структуру. Каждый тип материала, например, сталь, медь, алюминий, полимер, и т.п., представлен в виде отдельного слоя 9 в корпусе ротора, либо в сердечнике — в виде размещенного вдоль ротора отдельного стержня I2 (или каната,

нити, проволоки).

Но каким образом этот ротор, находящийся в герметичной камере, опоясывающей планету, выйдет в космическое пространство ?

Заранее изготовленные участки сердечника и корпуса ротора последовательно соединяют друг с другом, например, сваркой и также последовательно укладывают получаемый ротор на дно канала 2. Устанавливают затвор 7 и откачивают из канала воздух до давления $1 \dots 100$ Па. Для разгона ротора на обмотки статора линейного электродвигателя подают переменный электрический ток, в результате чего в зазоре между левой и правой обмотками статора возникает бегущее вдоль ротора магнитное поле, образуемое многофазными токами обмоток статора. В электропроводном слое 8 ротора, выполненном, например, из меди или алюминия, наводятся поперечные электрические токи. Наведенные токи, как и в любом другом электродвигателе, взаимодействуют с бегущим магнитным полем статора. В результате возникает механическая сила, приложенная вдоль продольной оси ротора по всей его длине. Одновременно с этим происходит электромагнитное подвешивание ротора по центру канала и стабилизация этого положения. Ротор, практически не испытывая сопротивления, приходит в движение вдоль канала и, соответственно, — во вращение вокруг Земли, постепенно, например, в течение нескольких дней, набирая высокую скорость. При достижении первой космической скорости ротор становится невесомым, и при дальнейшем ее увеличении — будет стремиться подняться вверх (перейти на более высокую круговую орбиту), но магнитный подвес удержит его от подъема.

Поскольку при космических скоростях движения касание ротором стенок канала недопустимо, он смонтирован в растянутом (в продольном направлении) состоянии. Это исключит в процессе разгона ротора возникновение в нем продольных сжимающих усилий, например, обусловленных неравномерностью работы линейных электродвигателей,

и, как следствие, — потерю продольной устойчивости. Для этих же целей служит и система I4 дополнительной (аварийной) магнитной подвески, источником питания которой будут наведенные в роторе электрические токи. Поэтому при случайных приближениях ротора к обмоткам такой системы в них будут индуцироваться тем большие токи, чем ближе приблизится ротор, магнитные поля которых и возвратят его в исходное положение. Для уменьшения потерь мощности при нахождении ротора по центру канала, то есть при штатном режиме его разгона, токи в аварийной системе магнитного подвеса не индуцируются.

При достижении ротором расчетной скорости движения, например, 12 км/с, включают индукторы токов высокой частоты, размещенные в стенках вакуумированного канала. В результате сублимирующий материал I3 в роторе разогревается до температуры образования пара. Наиболее целесообразно использовать в качестве такого материала питьевую или техническую воду, которую в любом случае придется доставлять на орбиту. После разогрева воды до 380 ... 500 К в корпусе ротора создается избыточное давление. Затем срабатывает пирозаряд и затвор 3 открывается по всей длине канала. Одновременно происходит отключение линейного электродвигателя и основных систем магнитного подвеса. Поскольку ротор имеет скорость движения, достаточную для перехода на более высокую (на сотни километров) круговую орбиту и представляет собой кольцо, охватывающее планету, то это кольцо будет продолжать вращаться по инерции и, в то же время, — увеличиваться в диаметре, пока целиком не окажется за пределами атмосферы и не выйдет в ближний космос.

При прохождении атмосферного участка пути происходит постепенное обгорание слоя абляции^ж, что, в конечном итоге, приводит к

^ж Абляционное покрытие ротора может быть выполнено из теплостойкого неэлектропроводного материала, например, из обугливающихся пластмасс на основе фенольных, кремнийорганических и др. синтетических смол, содержащих специальные наполнители, или же из керамики.

освобождению отверстий в корпусе ротора (он выполнен перфорированным) и дает выход для паров сублимирующего материала. Пар, вырываясь из отверстий под давлением в десятки, а возможно – и в сотни, атмосфер, создает вокруг ротора защитную газовую "шубу", которая исключит его дальнейший контакт с атмосферой. Поскольку в приграничных областях пар имеет ту же скорость движения, что и ротор, дальнейшее его аэродинамическое торможение и нагрев резко уменьшается. При использовании в качестве сублимирующего материала криогенных жидкостей, например, жидкого азота, ротор будет выведен в космос с более низкой температурой, чем в случае использования воды.

На рис. 6.4 показан продольный профиль наиболее сложного участка грузового ОТС: при прохождении через Анды в Южной Америке, где высота гор достигает 5 километров. Для уменьшения высоты эстакады ее продольный профиль плавно вписан в крупный рельеф местности с радиусом кривизны 100 км и более. На таких участках, общая протяженность которых составляет величину около одного процента от длины ОТС, путевая структура должна иметь более мощную систему магнитного подвеса, обеспечивающую движение ротора по криволинейным участкам с центростремительным ускорением до $500 \text{ м}^2/\text{с}$ (перегрузка – 50 единиц). При подъеме ротора в космос на таких участках он некоторое время будет сохранять свою первоначальную криволинейную форму, аналогично движению баллистических антенн^{*} /20, 21/. Это, впрочем, не отразится на его выходе в космос, так как по мере подъема ротор постепенно примет форму идеального коль-

^{*} Баллистическая антенна – это гибкая электропроводная нить, например, тросик или лента, замкнутая в кольцо и имеющая длину от нескольких метров до нескольких километров. Для установки антенны включают привод движения нити, в простейшем случае – двигатель со шкивом на валу, и нить, выбрасываемая вертикально вверх, поднимается на высоту до нескольких километров. Несмотря на свою гибкость и восходящая и нисходящая ветви антенны благодаря их высокой скорости весьма устойчивы даже под порывами сильного ветра.

ца — такая форма отвечает минимуму энергии. Аналогично, с целью уменьшения объема строительных работ эстакада может плавно огибать, в плане, отдельные горы и пики, например, пики Маргарита (высота 5109 м) и Кения (5199 м) в Африке, находящиеся в непосредственной близости от экватора.

По мере увеличения в процессе подъема диаметра кольца, образуемого ротором, он удлиняется на 1,57% на каждые 100 км подъема над поверхностью планеты. После выхода из плотных слоев атмосферы, на высоте порядка 100 км, продольные усилия в корпусе ротора в результате удлинения достигают критического значения и корпус разрывается в сечениях А-А (рис. 6.5). Для чего в этих сечениях, расстояние между которыми может варьироваться от нескольких километров до нескольких тысяч километров, толщина стенки корпуса утончена, ослаблена до строго калиброванного значения, рассчитанного на определенное продольное усилие. А усилие это, естественно, возникает при строго определенном растяжении, например, равном 1,57%. Для разделения корпуса могут быть использованы и кольцевые пирозаряды*, которые сработают одновременно во всех сечениях А-А, например, по управляющему радиосигналу. Образовавшиеся фрагменты I корпуса ротора (рис. 6.6) растянуты в продольном направлении, поэтому они начинают сокращаться по длине на величину упругой деформации** (орбита δ). При этом потенциальная энергия упругого растяжения гасится фрикционными башмаками 3 (рис. 6.5),

* Таких зарядов должно быть, в зависимости от тех задач, которые будут поставлены перед выводимой в космическое пространство полезной нагрузкой, от нескольких десятков, до нескольких тысяч штук, причем все они должны сработать одновременно.

** Удлинение ротора при его подъеме может идти как в упругой, так в упругой, так и в пластической зоне деформаций диаграммы деформаций материалов, из которых изготовлен ротор. Но сокращение длины фрагментов ротора после его растяжения будет происходить только на величину упругой составляющей общей деформации.

взаимодействующими с поверхностью сердечника. В противном случае при большой длине образовавшихся фрагментов, достигающей сотен и тысяч километров, их концы при сокращении длины могут достигать в своем движении скорости пули, что привело бы к ударному разрушению ротора. При сокращении длины фрагментов корпуса сердечник служит для них направляющей. Причем в процессе сокращения внутренний диаметр корпуса будет постепенно, в соответствии с коэффициентом Пуассона, увеличиваться, что исключит его заклинивание на сердечнике и обеспечит снижение тормозных сил по мере уменьшения сил растяжения. Это даст плавный, без рывков, режим сокращения длины, при этом во фрикционных будут погашены возможные продольные колебания ротора, которые могут быть вызваны, например, неоднородностями атмосферы при ее прохождении в процессе выхода на орбиту.

Одновременно с этим, или несколько позже, аналогично происходит разделение сердечника в сечениях Б-Б (рис. 6.5) на отдельные фрагменты и сокращение их длины, что и показано на рис. 6.6 (орбита *В*). Ротор после этого принимает вид последовательных телескопических соединений, способных обеспечить двойное удлинение. Благодаря этому он может быть выведен на любую из круговых орбит до высоты 6400 км, равной радиусу Земли, без использования корректирующих реактивных двигателей. Их функцию выполняют фрикционы в телескопических соединениях, которые и обеспечат плавное торможение удлинения кольца ротора и, соответственно, — радиальной составляющей скорости его движения.

Первый же запуск ротора образует вокруг Земли на высоте 500 ... 1000 километров, или выше, кольцевую структуру, которая в дальнейшем послужит основой для создания космического ожерелья планеты и свяжет транспортными и энергетическими коммуникациями в единую систему создаваемые в космосе заводы, фабрики, энергетические установки и жилые комплексы. Последующими запусками ротора

в космос будут доставлены элементы солнечных электростанций, например, свернутые в рулон и размещенные внутри ротора пленочные от-
ражатели, а также стержни для сооружения каркаса электростанций, каждая из которых будет иметь площадь в десятки квадратных кило-
метров. Одного запуска ротора будет достаточно, чтобы доставить ма-
териалы для сооружения солнечных электростанций общей мощностью
свыше 100 миллионов киловатт. На рис. 6.7 приведена зависимость
количества выводимой на орбиту полезной нагрузки, которая, как
отмечалось выше, будет равна массе ротора, от диаметра его попе-
речного сечения и плотности упаковки груза. Из графика видно, что
для доставки за один рейс в космос миллионов тонн грузов не нужны
большие поперечные размеры ротора. Например, при поперечном диа-
метре 10 см и плотности упаковки груза 6 г/см^3 масса ротора будет
равна примерно 2 млн. тонн.

Но у описанного варианта грузового ОТС есть существенный не-
достаток — ротор, вращающийся вокруг планеты с космической скоростью,
выпускается непосредственно в атмосферу. Поэтому она будет загряз-
няться продуктами обгорания абляционной защиты. Хотя это загрязне-
ние будет и существенно ниже*, чем ракетными двигателями, но все
же оно будет иметь место. Но нельзя ли его избежать совсем? Вот
если бы удалось создать вакуумированный канал в атмосфере для
пропуска ротора, то воздух не только ничем не загрязнялся, но и
не препятствовал бы движению. Но такое возможно только в рассказах
"очевидцев" о полетах в небе нашей планеты НЛО-навтов на своих
сверхнеобычных летательных аппаратах, способных с места, "в карьер",
развивать скорость в десятки километров в секунду, двигаясь при

* Масса абляционной защиты составит величину порядка нескольких
десятков процентов от массы полезной нагрузки, то есть от массы
ротора. Поэтому даже при полном ее обгорании удельное загрязне-
ние атмосферы (т.е. отнесенное к массе полезной нагрузки), при-
чем загрязнение менее токсичными продуктами, будет в сотни раз
более низким в сравнении с ракетно-космической техникой.

этом (в атмосфере !) совершенно беззвучно. Было бы заманчиво завладеть "секретами" неуловимых космических пришельцев, но поскольку энтузиасты этого дела заняты вот уже в течение сорока лет безуспешными попытками заполучить если не чертежи, то хотя бы любительскую фотографию этой чудо-техники, нам придется уповать только на самих себя^{*}.

А может мы преувеличиваем сложности прохождения ротором атмосферы планеты ? По сообщениям зарубежной печати атмосферное торможение, которое испытывает снаряд, проходящий атмосферу со скоростями свыше 5 км/с, экспериментально не исследовалось /22/. Тем более не исследовалось движение бесконечной нити, каковой с точки зрения механики является ротор ОТС, одновременно вращающейся с космической скоростью вокруг Земли и увеличивающейся с переменной скоростью в диаметре. Отсутствие экспериментального материала не дает возможности точного количественного расчета торможения ротора при его непосредственном выходе в атмосферу и эрозии его абляционной защиты. Перенос же данных, накопленных в настоящее время экспериментаторами для расчета пролета через атмосферу тел ограниченной длины на расчет ротора неправилен. Основная причина - наличие лобового сопротивления и ограниченная длина снаряда в первом случае, отсутствие лобового сопротивления и бесконечная длина - во втором. Эти различия коренным образом изменяют характер взаимо-

^{*} Впрочем, никакой чудо-корабль, даже созданный неземными учеными и инженерами, не может иметь более высокие технико-экономические показатели, чем ОТС, в чем читатель может еще раз убедиться, если вернется к анализу, проделанному в предыдущей главе. Иначе этой неземной технике придется нарушать фундаментальные законы физики и механики: Закон сохранения энергии, закон сохранения количества движения и др., что вряд ли ей будет под силу. И еще одно можно сказать об этой технике. Если она действительно существует, то должна быть необычайно сложной, так как будет основана на неуловимо тонких (иначе наши ученые давно бы это открыли) свойствах материи, реализовать которые простыми средствами обычной механики, как в ОТС, невозможно. Поэтому, скорее всего, если эти "секреты" и будут нам раскрыты, то это даст не больший результат, чем если бы мы раскрыли секреты производства современной космической ракеты неадвентальцу. Ни те ни другие просто не в состоянии будут воспользоваться полученными данными, для реализации которых у них нет соответствующей научной и производственной базы.

действия ротора с атмосферой.

При пролете обычного снаряда сквозь атмосферу с космической скоростью движения он в буквальном смысле слова "прорубает" в ней коридор. Причем масса воздуха, попадающего в эту "мясорубку" может превышать массу снаряда даже при его вертикальном старте, а при наклонном к горизонту полете количество воздуха, встречающегося на пути снаряда, увеличивается в десятки раз.. По законам классической механики такое движение (с достаточной степенью достоверности) можно рассматривать как полностью неупругий удар двух тел, так как воздух, находящийся на пути снаряда, получает ту же скорость движения, что и снаряд, - он просто не успевает уступить ему дорогу.

Тогда, если масса такого воздуха будет хотя бы только равна массе снаряда, потери* энергии на удар составят 50% согласно формуле (5.11). Поэтому так быстро и сгорают метеориты при попадании в атмосферу, так как выделяющаяся при таком неупругом ударе огромная энергия разогревает воздух до температуры выше 10 тысяч градусов, с распадом молекул кислорода и азота на атомы, ионизацией, образованием свободных электронов и протеканием химических реакций. Именно поэтому: "... вследствие огромной скорости снаряда при вылете сопротивление наружного воздуха ... эквивалентно сопротивлению стальной брони ..."

* Именно по этой причине стараются максимально уменьшить относительное количество воздуха (то есть величину, равную отношению масс этого воздуха и снаряда), встречающегося на пути движения. Для чего снаряд должен иметь максимально возможное удлинение и максимально возможную плотность упаковки. Поэтому лучше всего для его изготовления подходит вольфрам, который имеет не только высокую температуру плавления (3410°C), но и плотность, равную $19,3 \text{ г/см}^3$. Однако, учитывая высокую стоимость вольфрама и малые его запасы на земле, в грядущих, как и в нынешних тоже, перевозках он будет занимать небольшую долю. Основная масса перевозок будет приходиться на груз с плотностью упаковки $1...5 \text{ г/см}^3$.

** Прочитано из книги: Штернфельд А.А. Введение в космонавтику.- М.: Наука, 1974, стр. 47-48.

Тем не менее, несмотря на сложности прохождения одиночным снарядом атмосферы, специалисты НАСА^ж считают, что вольфрамовый снаряд даже массой в несколько килограммов может быть успешно запущен в космос без чрезмерной эрозии (в пределах 10% массы) и с потерей энергии в 15% /22, стр. 112/.

При выходе ротора ОТС на орбиту картина будет совсем иной. Ему не надо будет "прорубать" коридор в атмосфере со всеми описанными выше негативными эффектами. Этот коридор уже будет занят им самим. Атмосфера должна пропустить ротор лишь в вертикальном направлении, а эта составляющая скорости движения будет дозвуковой, по меньшей мере в плотных слоях атмосферы, до высот в 20 тысяч метров, где плотность атмосферы в 10 раз ниже, чем у поверхности земли.

Разница будет и в другом. При сгорании защитного слоя образующийся при этом газ имеет ту же скорость движения, что и его источник, поэтому он выполняет роль газовой смазки, разделяющей атмосферу и движущееся тело. Когда движется снаряд ограниченной длины, указанный защитный слой будет "размазан" по стенке получающегося в атмосфере "коридора", длина которого и, соответственно, боковая поверхность превышают длину и боковую поверхность снаряда в тысячи раз, а при малых углах полета к горизонту - в сотни тысяч раз. Поэтому "смазать" такую огромную площадь абляционному слою снаряда весьма трудно. При вращении же ротора ОТС в атмосфере последующий его участок занимает место предыдущего, а площадь боковой поверхности "коридора", в котором он находится, будет равна его боковой поверхности. Поэтому толщина защитной газовой "шубы", образуемой разрушающимся слоем абляции, будет при прочих равных условиях в тысячи раз большей, чем при пролете одиночного снаряда. Соответственно и более эффективной будет абляционная защита, тол-

^ж НАСА - Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, ведомство правительства США.

щина которой на роторе может быть поэтому ниже, чем на отдельных снарядах.

Но поскольку атмосфера создаст определенные трудности при непосредственном выпуске в нее ротора ОТС, надо все-таки их избежать. Нужен вакуум при движении в атмосфере. Раз создать в воздухе вакуумированный канал для пропуска ротора нельзя, то пусть он несет этот вакуум с собой, с земли.

На рис. 6.8 показан вариант такого ОТС. Вакуумированный канал в нем выполнен в виде тонкостенной оболочки, охватывающей ротор. Оболочка изготовлена с возможностью разъема по длине и может подниматься в космос вместе с ротором. Для чего, после разгона ротора до расчетных скоростей, открывают защитную крышку 12, закрывают вакуумный клапан 8 и включают электромагниты 11. В результате линейные электродвигатели 5 вместе с системой магнитного подвеса ротора отходят от оболочки 1. Ротор и оболочка ничем больше не удерживаются на планете. Одновременно с этим включаются системы 3 автономной магнитной подвески оболочки относительно ротора. Энергопитание систем подвески может осуществляться как от ротора, который в таком случае будет использован в качестве ротора генератора, так и от источников электрической энергии, размещенных в полости хвостового обтекателя 5 (требуемый ресурс работы источников питания — несколько минут). Ротор, поднимаясь, несет вместе с собой и защитную оболочку и, таким образом, проходит атмосферный участок пути, находясь в вакууме. После выхода из плотных слоев атмосферы, например, на высоте 100 км, срабатывают пирозаряды и оболочка разделяется в продольном направлении на две части, которые с помощью парашютов возвращаются назад для повторного использования. Дальнейший же подъем ротора и его выход в космическое пространство аналогичны описанному ранее.

Такое грузовое ОТС хотя и несколько сложнее конструктивно, но оно имеет ряд бесспорных преимуществ перед вариантом с абляционной защитой ротора. В таком ОТС отпадает необходимость в слое абляции, который каждый раз должен быть нанесен на ротор, а затем вместе с ним – разогнан до космических скоростей. Не будет в нем тормозиться и нагреваться атмосферой выводимая в космос полезная нагрузка. Этот вариант более целесообразен и с экологической точки зрения – он не представит никакой опасности для окружающей среды.

Но не слишком ли много понадобится тратить энергии на подъемы каждый раз в космос оболочки, масса которой соизмерима с массой ротора, а ведь это – миллионы тонн? Нет, немного. В отличие от ОТС с двумя вращающимися кольцами (корпусом и ротором), энергопотери в котором показаны на рис. 5.7, затраты энергии в описанном варианте будут на несколько порядков ниже. Дело в том, что здесь оболочка не будет получать вращения вокруг планеты, на что и тратится огромная энергия. Простой же подъем точно такой массы, пусть даже на высоту в сотни километров, значительно менее энергозатратен. На рис. 6.9 показаны относительные затраты энергии на подъем оболочки (в процентах от начальной кинетической энергии ротора) в зависимости от ее относительной массы (в процентах от массы ротора). Потенциальная энергия подъема оболочки в поле тяготения Земли будет определяться зависимостью:

$$\Delta U_r = \frac{\mu M_z m_o}{r_z} \times \frac{H}{r_z + H}, \quad (6.1)$$

где μM_z – геоцентрический гравитационный параметр, равный $3,98 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$; r_z – радиус Земли; m_o – масса оболочки; H – высота подъема. Из формулы (6.1) следует, что работа, совершаемая по подъему оболочки, впрочем как и любого другого тела, равна потенциальной энергии ее подъема на бесконечную вы-

соту ^{*}, умноженной на множитель $H/r_3 + H$, который при H , стремящемся к бесконечности, стремится к единице.

Данные на графике приведены для начальной скорости ротора, равной второй космической, то есть 11,2 км/с. При такой скорости относительная подъемная способность ротора, определяемая зависимо-
мостью

$$\frac{m_o^{max}}{m_p} = \frac{\frac{v_p^2}{r_3} - g}{g} = \frac{v_p^2}{g r_3} - 1, \quad (6.2)$$

где m_o^{max} — максимальная масса оболочки, которую может поднять ротор; m_p и v_p — масса и скорость ротора; g — ускорение свободного падения, будет равно единице, поэтому максимальная масса оболочки может быть равна массе ротора^{жж}. При большей массе оболочки ротор не сможет оторвать ее от земли. Поэтому при использовании более тяжелых оболочек ротор должен иметь более высокую скорость, чем 11,2 км/с.

Из графика видно, что затраты энергии на подъем оболочки незначительны. Например, если ее масса будет равна массе ротора, то на подъем оболочки на высоту 100 км необходимо затратить всего 1,54 процента от кинетической энергии ротора. В то время как в ракете подобные потери энергии^{жжж} достигают величины в тысячи процентов !

Аэродинамические потери энергии на выведение ротора с защитной вакуумированной оболочкой также будут небольшими, так как

^{*} В свою очередь эта энергия равна кинетической энергии этого же тела, движущегося со второй космической скоростью. Именно поэтому тело, брошенное вверх с такой скоростью улетает в бесконечность; поэтому эту скорость называют еще скоростью ухода или освобождения, так как тело уже больше никогда не возвращается назад.

^{жж} Для подъема более массивной оболочки ротор должен быть разогнан до более высокой, чем вторая космическая, скорости.

^{жжж} Имеются в виду затраты энергии на подъем и разгон топлива и конструкции ракеты по отношению к механической энергии выведенной на орбиту полезной нагрузки.

скорость их вертикального подъема может быть сколь угодно малой. Например, аэродинамические потери при установившейся силе атмосферного сопротивления, равной 30 Н/пог.м. (скорость подъема ротора при этом будет расти по мере уменьшения плотности атмосферы с высотой: от десятков метров в секунду у поверхности земли, до сотен метров в секунду на высотах, достигающих десятков километров) для ротора массой 10 кг/м составят величину порядка $0,1\%$ от его начальной кинетической энергии.

Потери же энергии ротора с абляционной защитой на атмосферном участке пути могут достигать десятков процентов. При этом до космических скоростей будет разгоняться не только полезная нагрузка, то есть непосредственно сам ротор, но и его абляционная защита, масса которой будет достигать десятков процентов от количества выводимого в космическое пространство груза. И вновь на эти же десятки процентов необходимо больше затратить энергии. Но ведь электрическая энергия дешевая, и стоит ли так переживать из-за каждого десятка процентов? Ведь наверняка первый вариант грузового ОТС, как наиболее простой и дешевый, предпочтительнее. Не будем торопиться с выводами. Ниже будет показано, что, как ни странно, при больших геокосмических грузопотоках их себестоимость будет определяться не сложностью ОТС, не стоимостью капитальных затрат на его сооружение, то есть стоимостью эстакады, путевой структуры, линейного электродвигателя и магнитного подвеса при всей грандиозности их масштабов, не затратами на его эксплуатацию, наконец, и многим другим. Главную скрипку здесь будет играть энергия, затраченная на доставку грузов на орбиту. Именно к стоимости затраченной электрической энергии и будет стремиться в пределе себестоимость космических перевозок. Поэтому необходимо максимально уменьшать потери энергии, пусть даже путем усложнения конструкции.

Да, но мы ведь упустили из виду еще один вид потерь энергии: при подъеме в космос на сотни километров гигантская конструкция ОТС, а в грузовом варианте – его ротор, должны растянуться на величину, хоть и в π раз меньшую, но все же значительную, также равную сотням километров. Не уйдет ли туда вся энергия?

Как уже отмечалось, на каждые 100 км подъема над землей кольцо должно удлиниться на эти же 100 км, увеличенные в 2π раз, то есть на 628 км, что составит от его первоначальной длины 1,57%. Много это или мало? Например, для стали – нет, не много. Относительное удлинение до разрыва всех без исключения марок стали лежит в пределах 12 ... 35% /23/. Поэтому стальной ротор без разрушения сплошности материала может быть запущен на высоты 800 ... 2200 км. Кроме того, практически любой металл и сплав может быть переведен в сверхпластичное состояние, в котором их можно деформировать при небольших напряжениях и нагрузках на сотни и тысячи процентов /24, стр. 94/. Могут быть использованы и сверхупругие материалы, в том числе обладающие эффектом "памяти формы", упругая деформация которых составляет многие проценты. К таким материалам, например, относится нитинол (сплав никеля с титаном), который упруго удлиняется на величину до 10% /24, стр. 113/. Не говоря уже о полимерах, большинство из которых удлиняется на десятки и сотни процентов без всяких ухищрений. А есть еще и электропроводные полимеры, которые могут быть использованы и для изготовления растягиваемых в процессе выхода на орбиту электрических систем ОТС.

Впрочем такие удлинения и не требуются. Ведь ротор будет расчленен на отдельные фрагменты на высотах порядка 100 км, когда его растяжение будет находиться в пределах 2%, недостижимых только для таких хрупких материалов как чугун и стекло, но они и не нужны там. Затраты энергии, расходуемые на деформацию стержня, в

данном случае ротора, равны /25, стр. 388/:

$$U_g = \frac{1}{2} N \cdot \Delta l = \frac{1}{2} E_{\text{ю}} S_p \frac{\Delta l^2}{l_0}, \quad (6.3)$$

где N — продольное усилие в роторе; Δl — абсолютная деформация; $E_{\text{ю}}$ — модуль Юнга материала; S_p — площадь поперечного сечения ротора; l_0 — начальная длина.

С учетом того, что в рассматриваемом случае $\Delta l = 2\pi H$, $l_0 = 2\pi r_z$, а начальная кинетическая энергия ротора равна

$$E_{\text{кр}} = \frac{m_p v_p^2}{2} = \pi r_z S_p \rho_{\text{мр}} v_p^2, \quad (6.4)$$

где m_p — масса ротора, $m_p = 2\pi r_z S_p \rho_{\text{мр}}$;

$\rho_{\text{мр}}$ — плотность материала ротора,

получим выражение для относительных потерь энергии на растяжение ротора при его подъеме в космос:

$$\frac{U_g}{E_{\text{кр}}} = \frac{E_{\text{ю}}}{\rho_{\text{мр}}} \left(\frac{H}{r_z v_p} \right)^2 \quad (6.5)$$

Потери энергии на подъем сплошного стального ротора показаны на рис. 6.10. Из графика следует, что на высоте разделения ротора на отдельные фрагменты по длине, равной 100 км, он аккумулирует благодаря своему растянутому состоянию потенциальную энергию, равную 10^{-4} (или 0,01%) от начальной кинетической энергии. Это ничтожно мало. Тем более, что ротор будет представлять собой не сплошную стальную болванку, как принято в расчетах, а может иметь более податливую в продольном направлении пустотелую конструкцию, заполненную, например, сыпучей или жидкой полезной нагрузкой.

ЛИТЕРАТУРА:

20. Светлицкий В.А., Мирошник Р.А., Куркин В.И. Определение форм стационарного движения нити в средах различной вязкости. "Прикладная механика", Киев, 1972 г., т. УШ, в. 4.
21. Мирошник Р.А. Исследование стационарного движения баллистической антенны в плоском однородном потоке. "Изв. вузов. Машиностроение". 1972, № 10.
22. Хоук Р.С. и др. Электромагнитные рельсовые метатели: возможности прямого запуска тел в космос. "Аэрокосмическая техника", т. I, № 2, февраль 1983 г., стр. 110-120.
23. Машиностроительные материалы: Краткий справочник. Раскатов В.М. и др. М.: Машиностроение, 1980, стр. 23.
24. Займовский В.А., Колупаева Т.Л. Необычные свойства обычных металлов (под редакцией Л.Г.Асламазова). - М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит-ры, 1984 - 192 с.
25. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика.- М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит-ры, 1979 - 520 с.
26. Мелентьев Л.В. Решения XXVII съезда КПСС и задачи энергетики. "Энергия: экономика, техника, экология", 1986, № 8, стр. 2-13.