



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 39 за 2011 г.



Садов Ю.А., Нуралиева А.Б.

О концепции нагруженного  
секционированного  
космического лифта

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Садов Ю.А., Нуралиева А.Б. О концепции нагруженного секционированного космического лифта // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 39. 25 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-39>

ISSN 2071-2898



**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук**

**Ю.А. Садов, А.Б. Нуралиева**

**О концепции нагруженного  
секционированного  
космического лифта**

**Препринт №**

**Москва**

ОРДЕНА ЛЕНИНА

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В.КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Ю.А.Садов, А.Б.Нуралиева

**О КОНЦЕПЦИИ НАГРУЖЕННОГО СЕКЦИОНИРОВАННОГО КОСМИЧЕСКОГО ЛИФТА**

Москва

2011

Ю.А. Садов, А.Б. Нуралиева. О концепции нагруженного секционированного космического лифта. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М. 2011.

#### АННОТАЦИЯ

Описывается сверхдлинная космическая тросовая система, включающая в себя сверхпрочный трос, закрепленный нижним концом на поверхности Земли и простирающийся в космическое пространство на десятки тысяч километров, – космический лифт. Излагается новая концепция построения такой системы, отличная от повсеместно принятой в настоящее время и обладающая значительно более широкими функциональными свойствами, большей надежностью, контролируемостью, возможностями управления и восстановления после повреждений и аварий.

Работа поддержана грантами РФФИ 10-01-00406 и научной школы НШ-6700.2010.1.

Yu.A. Sadov, A.B. Nuralieva. On Conception of the Loaded Sectioned Space Elevator. Preprint of Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS. Moscow, 2011.

#### ABSTRACT

The Space Elevator as superlong space tether system that includes superstrong tether, attached to the Earth's surface with its bottom end and stretching for tens thousand kilometers into the space is described. New conception of the system is presented which differs from the now wide spread one and has much more useful functional qualities is more safety, controllable and repairable.

#### Оглавление

Введение.....	3
Исходная идея и основные функциональные возможности космического лифта .....	3
Трос космического лифта, как основной несущий элемент конструкции .....	5
Общая схема и основные компоненты конструкции космического лифта.....	8
Минимальный космический лифт (B. Edwards).....	11
Нагруженный космический лифт .....	15
Оценочные характеристики .....	18
Некоторые проблемы сооружения и эксплуатации нагруженного КЛ.....	21
Заключение .....	23
Литература .....	23

## **Введение**

Известная примерно с середины прошлого века идея космического лифта пережила в начале 21-го века второе рождение. Связано это с появлением реальной надежды на создание материалов, удовлетворяющих высоким по прочности требованиям этого сооружения. Однако, всплеск энтузиазма, вызванный этим открытием, среди приверженцев идеи КЛ, в результате чего появились довольно скороспелые идеи о возможности быстрой и относительно недорогой реализации этой идеи [1], не был в ожидаемой степени поддержан широкими слоями научного сообщества. Показателем этого может служить, например, такой факт, что на крупнейшем мировом собрании ученых и специалистов по космонавтике: ежегодных Международных конгрессах по астронавтике (International Astronautical Congress) тематика космического лифта, хоть и появилась, но в качестве небольшой подсекции раздела “Далекое будущее” (Far Future). Связано это в значительной степени с тем, что привлекательная относительной простотой и легкостью исполнения концепция минимального космического лифта не выдерживает сколько-нибудь обоснованной критики по показателям недостаточных функциональных возможностей, надежности конструкции, сомнительности содержащейся в ней идеи управляемости и практическому отсутствию возможностей ремонта и замены вышедших из строя элементов, что резко снижает ее срок существования.

В данной работе представлена новая концепция космического лифта, включающая в себя оригинальную конструктивную идею и направленная на создание полнофункционального космического лифта с достаточно развитыми эксплуатационными возможностями, включая в себя надежность, возможности инспекции оборудования в процессе эксплуатации, дополнительные возможности управления и ремонта повреждений и дефектов конструкции. Такая конструкция не проста в сооружении и развертывании, очень затратна и может быть реализована только на основе крупномасштабной национальной или международной программы в общем контексте космической деятельности. В то же время включение в этот контекст темы космического лифта придаст общему направлению освоения космического пространства новую перспективу, будет содействовать созданию и развертыванию новых производств и в ряде случаев еще на этапе опытно-конструкторских работ может в качестве побочного продукта развить конструкции и производства, имеющие коммерческую привлекательность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 10-01-00406-а) и Совета по поддержке ведущих научных школ (грант НШ-6700.2010.1).

## **Исходная идея и основные функциональные возможности космического лифта**

Космический лифт – инженерное сооружение, обеспечивающее постоянную транспортную связь между поверхностью Земли и ближним космосом. Идея такого сооружения высказывалась еще К.Э. Циолковским в виде опирающейся на Землю башни, достигающей космической высоты. Такая идея вряд ли может быть когда-нибудь реализована для высот, существенно больших 100 км, даже при наличии достаточно прочных материалов из-за неустойчивости вертикально стоящей конструкции. В настоящее время в основе концепции космического лифта лежит сделанное Ю.Н. Арцутановым в 1960 году [2] и развитое в дальнейшем [3] предложение о подвесной конструкции, базирующейся на длинном тросе, закрепленном в области экватора на поверхности Земли и простирающемся за пределы геостацио-

нарной орбиты. В силу закрепления такой трос будет вращаться вместе с Землей с ее угловой скоростью, а на указанных высотах вызванная этим вращением центробежная сила больше силы притяжения Земли и может обеспечить удерживающую трос в вертикальном положении силу.

Нетрудно понять выгоды существования такой конструкции в случае ее реализации. Обеспечиваемая ею транспортная магистраль между поверхностью Земли и ближним космосом позволила бы:

1. в огромной степени облегчить транспортировку грузов с Земли на орбитальные высоты и обратно и уменьшить затраты энергии на эти операции. Можно указать следующие источники такой экономии:
  - а) при транспортировке вдоль стационарной конструкции энергия расходуется только на подъем полезного груза, и нет необходимости поднимать вместе с ним огромное количество топлива и конструкцию носителя, что требуется при ракетном способе вывода на орбиту. Только за счет этого можно на порядок уменьшить затраты энергии.
  - б) Запускаемый ракетой аппарат для работы на орбите должен обязательно двигаться вдоль нее и поэтому при запуске он должен набрать не только потенциальную энергию, необходимую для подъема на нужную высоту, но и значительную кинетическую энергию, обеспечивающую его движение с нужной скоростью. Устройства, работающие на орбитальных высотах, при наличии стационарной конструкции не обязательно должны двигаться вдоль орбиты и, вообще говоря, не требуют расхода энергии на такое движение. Движение же в горизонтальной плоскости вместе с тросом обеспечивается «бесплатно» за счет передачи поднимающемуся по тросу грузу части кинетического момента Земли через вращающийся вместе с ней трос.
  - в) При транспортировке вдоль стационарной конструкции возможна рекуперация энергии, то есть возвращение в энергетическую систему энергии, приобретаемой перемещаемым грузом на участках, где внешние силы ускоряют его движение. В принципе, при рациональном планировании грузопотока за счет рекуперации можно в несколько раз уменьшить затраты энергии.

Все эти факторы, вместе взятые, могут в сотни раз уменьшить затраты на подъем полезного груза на орбитальные высоты по сравнению с имеющимися в настоящее время.

2. При подъеме с опорой на стационарные элементы не нужно расходовать для приведения поднимаемого груза в движение никакое рабочее вещество. Это опять-таки позволяет:
  - а) Не тратить энергию на подъем этого вещества;
  - б) Не загрязнять атмосферу его выбросом.
  - в) Кроме того, так как транспортировка осуществляется, как правило, входящими в состав конструкции устройствами и механизмами, при каждом акте такой транспортировки практически не возникает никаких «отходов производства», соответственно, сводится к минимуму засорение космического пространства, что уже сейчас представляет большую проблему для космонавтики.
3. Наличие стационарной конструкции, простирающейся от поверхности Земли до космических высот, дает возможность разместить на ней постоянные базы для разверты-

вания научной и производственной деятельности в ближнем космосе, в значительной степени облегчая при этом проблемы снабжения таких баз и смены персонала на них по сравнению с используемыми до настоящего времени орбитальными космическими станциями.

4. Такие базы станут отправной точкой в разрешении такой глобальной проблемы, как использование для земных нужд ресурсов ближнего космоса.

### Трос космического лифта, как основной несущий элемент конструкции

Понятно, что создание такой колоссальной космической конструкции сопряжено со многими техническими трудностями, но основная из них стала понятной с самого начала. Дело в том, что не существует материалов, которые удовлетворяли бы по прочности требованиям к несущему тросу космического лифта. Трос необходимой длины из любого современного материала просто не выдержит собственной тяжести.

#### Трос постоянного сечения.

Действительно, легко подсчитать, что сила натяжения  $T$  вертикально расположенного в гравитационном поле Земли однородного по длине троса, простирающегося от поверхности Земли до высоты  $L$ , в верхнем его сечении равна

$$T = \rho S (U(r_E + L) - U(r_E)) + T_0,$$

где  $\rho$  – плотность материала троса,  $S$  – площадь поперечного сечения,  $T_0$  – сила натяжения в нижнем конце троса,  $U(r)$  – гравитационно-центробежный потенциал (сила притяжения к Земле  $F_1$  массы в 1 кг, находящейся на расстоянии  $R$  от ее центра, равна  $F_1 = -dU/dr$ )

$$U(r) = -\frac{\mu}{r} - \frac{1}{2}\omega^2 r^2. \quad (1)$$

Здесь  $\mu$  – гравитационный параметр Земли,  $\omega$  – угловая скорость ее вращения. Растягивающее напряжение  $\tau$  в тросе при этом

$$\tau = \frac{T}{S} = \rho (U(r_E + L) - U(r_E)) + \tau_0,$$

а разрыв троса происходит при  $\tau \geq \tau_b$ , где  $\tau_b$  – разрывное напряжение (характеристика прочности материала троса). Введем еще одну, характеризующую материал троса, величину – предельную удельную прочность

$$\chi_b = \frac{\tau_b}{\rho}.$$

Тогда наибольшая высота  $L_m$ , на которую может быть вытянута с поверхности Земли однородная нить из материала с заданной предельной удельной прочностью  $\chi_b$  и  $T_0 = 0$  определяется уравнением

$$(U(r_E + L_m) - U(r_E)) = \chi_b, \quad (2)$$

Величина  $\chi_b$  имеет размерность квадрата скорости и по физическому смыслу соответствует квадрату максимальной скорости распространения вдоль троса малых поперечных возмущений. В качестве единицы измерения этой величины в применении к задачам космического лифта сотрудниками компании Spaceward Foundation недавно предложено название Юри (Yuri) по имени родоначальника современной идеи космического лифта Юрия Николаевича Арцутанова. Величина этой единицы такова:  $1 \text{ Yuri} = 1 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1 \text{ дж/кг}$ . На наш взгляд более

удобно и наглядно использовать для характеристики удельной прочности материала *разрывную длину*. Разрывной длиной  $L_b$  материала будем называть длину однородной нити (троса) из этого материала, при которой он разрывается под действием собственного веса в однородном поле тяготения с напряженностью (ускорением свободного падения)  $g_0$ . Определенная таким образом величина  $L_b$  связана с  $\chi_b$  соотношением

$$\chi_b = g_0 L_b.$$

Выбирая  $g_0 = 10 \text{ м/с}^2$ , получаем удобную формулу для пересчета  $\chi_b$  в  $L_b$  и наоборот. В то же время получающаяся при этом разрывная длина близка по величине к реально измеряемой максимальной длине соответствующего троса (с не слишком высокой удельной прочностью) вблизи поверхности Земли. Легко найти, например, что при таком выборе  $g_0$  разрывная длина 1 км соответствует  $\chi_b = 10000 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 10 \text{ кYuri}$ , и, наоборот, для  $\chi_b = 1 \text{ км}^2/\text{с}^2 = 1 \text{ MYuri}$  имеем  $L_b = 100 \text{ км}$ .

Разрывная длина для наиболее прочных сортов стали может достигать до 40 км, для некоторых синтетических волокон (кевлар) до 180 км, а для наиболее прочных из них (Spectra-2000, Zylon) почти до 300 км. Используя в формуле (1) разрывную длину вместо удельной прочности, найдем соотношение между разрывной длиной  $L_b$  и максимальной реальной длиной вертикального троса  $L_m$

$$(U(r_E + L_m) - U(r_E)) = g_0 L_b. \quad (3)$$

Учитывая, что для высот  $L$ , малых по сравнению с радиусом Земли,

$$U(r_E + L) \cong g_E L,$$

где  $g_E \approx 9.81 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести на поверхности Земли, получим в этом случае уже упоминавшееся соотношение

$$L_m \cong \frac{g_0}{g_E} L_b \cong L_b.$$

Таблица 1

$L_b$ , км	40	200	300	600	1000	2000	3000	6000
$L_m$ , км	<b>41.01</b>	210.5	<b>321.0</b>	676	<b>1213</b>	2996	5880	$\infty$
$S_m/S_0$	$3.492 \cdot 10^{52}$	$3.226 \cdot 10^{10}$	$1.013 \cdot 10^7$	3183	126.4	11.24	5.018	2.240

В первых двух строках таблицы 1 приведены значения максимальной длины однородного вертикального троса для материалов с различной разрывной длиной. Видно, что для реально доступных материалов ( $L_b < 300 \text{ км}$ ) максимальная длина  $L_m$  не сильно превосходит разрывную и далеко не достаточна для решения задачи создания космического лифта. При разрывной длине, измеряемой тысячами километров, максимальная длина троса уже в несколько раз превосходит разрывную. Заметим, что согласно формуле (1) гравитационно-центробежный потенциал  $U(r)$  имеет максимальное значение для геоцентрического расстояния  $r_{gs} \cong 42164 \text{ км}$ , соответствующего геостационарной орбите, поэтому, если максимальная длина достигает 35793 км, то есть геостационарной высоты, то трос может быть протянут без разрыва до сколь угодно большого расстояния, так как выше геостационара гравитационно-центробежная сила уже убывает. Как нетрудно вычислить по формуле (3), указанная максимальная длина достигается при разрывной длине  $L_{b1} \cong 4839 \text{ км}$ . Эта вели-

чина и определяет минимальную разрывную длину троса постоянного сечения, который может быть протянут за геостационарную орбиту. Для более прочных материалов (с большим значением разрывной длины) максимальная с точки зрения прочности длина троса постоянного сечения не ограничена, что отмечено в Таблице 1 символом  $\infty$  для  $L_b = 6000$  км.

Однако, такие значения разрывной длины на порядки больше прочностных возможностей любых известных до недавнего времени материалов, и идея в данном исполнении неосуществима. Впрочем, есть возможность избежать перегрузки троса при увеличении его длины – для этого с увеличением действующей на трос силы при возрастании высоты надо увеличивать площадь поперечного сечения троса. Таким образом, мы приходим к идее троса переменного сечения.

#### Трос переменного сечения, равнонапряженный трос

Нетрудно понять, что наиболее рациональной для троса переменного сечения является конструкция, для которой напряжение троса, то есть величина силы натяжения на единицу площади, в каждом сечении постоянна

$$T = \tau_b S. \quad (4)$$

Тогда критические условия, при которых трос разрушается, возникают во всех сечениях одновременно, и масса такого троса при критическом напряжении будет минимальной среди всех возможных распределений площади поперечного сечения по высоте. Такой трос называется *равнонапряженным тросом*. Дифференциальное уравнение, описывающее изменение площади поперечного сечения  $S$  равнонапряженного троса в зависимости от расстояния  $s$  точки вертикально расположенного троса от поверхности Земли, имеет вид:

$$\frac{dT}{ds} = \tau_b \frac{dS}{ds} = \rho S \left( \frac{\mu_E}{(r_E + s)^2} - \omega_E^2 (r_E + s) \right) = \frac{\tau_b S}{g_0 L_b} \frac{dU(r_E + s)}{ds}.$$

Отсюда для площади сечения имеем

$$S(s) = S_0 \exp \frac{(U(r_E + s) - U(r_E))}{g_0 L_b}. \quad (5)$$

Отметим, что, согласно этой формуле (см. также [4]), для равнонапряженного троса с разрывной длиной  $L_b$  для любой длины троса существует распределение сечений  $S(s)$ , соответствующее критическому напряжению. Стоящее под знаком экспоненты выражение  $(U(r_E + s) - U(r_E))$ , как уже было отмечено выше, имеет максимум при  $s = s_{gs} \cong 35793$  км – высоте геостационарной орбиты, равный приблизительно  $48.39 \text{ км}^2/\text{с}^2$ .

Подставляя это значение в формулу (5), получим для отношения максимального сечения троса к начальному простое выражение

$$S_m/S_0 = \exp(4.839/L_b), \quad (6)$$

где  $L_b$  выражено в тысячах километров. Для значения  $L_b = 0.04$ , соответствующего стали, получаем чудовищное число  $3.5 * 10^{52}$ . Таким образом, хотя формальная возможность протянуть стальной трос до высоты геостационарной орбиты появилась, нет никакой возможности соорудить такой трос. В последней строке таблицы 1 приведены вычисленные по формуле (6) значения  $S_m/S_0$  для некоторых величин  $L_b$ . Видно, что даже использование наиболее прочных из существующих материалов с  $L_b = 200$  км и  $L_b = 300$  км не слишком

сильно помогает делу, и только, если разрывная длина материала троса превышает 1000 км, утолщение троса не выражается астрономическими числами.

### Концевая масса

Еще одним важным элементом конструкции космического лифта является балансировочная (уравновешивающая) масса  $M_k$  на конце троса. Она выбирается так, чтобы сумма действующих на нее гравитационной и центробежной сил уравновешивала силу натяжения в верхнем конце троса. Отсюда

$$M_k = \frac{T(L)}{\omega_E^2 r - \frac{M_E}{r^2}} = \frac{S_0 \tau_m}{\omega_E^2 r - \frac{M_E}{r^2}} \exp \frac{(U(r) - U(r_E))}{g_0 L_D}. \quad (7)$$

где  $L$  — длина троса,  $r = r_E + L$ ,  $\tau_m$  — принятое постоянное (допустимое) напряжение троса:  $\tau_m = kg_0 L_D$ . В этой формуле расстояние  $r$  от центра Земли входит не только под экспоненту, но и в знаменатель формулы, который обращается в нуль для геостационарного расстояния  $r = r_{gs} \cong 42164$  км. Это объясняется тем, что суммарная гравитационно-центробежная сила для такого расстояния равна 0, и никакая масса не может создать нужной уравновешивающей силы. Для  $r$ , несколько превышающих  $r_{gs}$ , балансировочная масса получается конечной, но очень большой и может во много раз превышать массу троса. Из формул (5) и (7) видно также, что если  $U(r) = U(r_E)$ , что выполняется для расстояния  $r = r_{sq} \cong 150123$  км — расстояния, изоэнергетического поверхности Земли, то  $S(r) = S_0$ , и, соответственно,  $T(L) = T(0)$ . Здесь  $L = r_{sq} - r_E \cong 143750$  км. Таким образом, на такой высоте сила натяжения равнонапряженного троса равна силе его натяжения на поверхности Земли, а выше она продолжает уменьшаться, стремясь к 0. Вместе с ней уменьшается, приближаясь к нулю, и концевая масса.

### **Общая схема и основные компоненты конструкции космического лифта**

Как видно из изложенного выше, массовые характеристики несущей компоненты КЛ в очень сильной степени зависят от прочности (точнее, от разрывной длины) материала троса, так что с доступными на данный момент материалами реальное сооружение такой конструкции невозможно. Поэтому, как создание космического лифта, так и обсуждение деталей его конструкции и подробностей динамики считались до недавнего времени делом преждевременным и непродуктивным. Положение изменилось с открытием в последнем десятилетии 20-го века практически одномерной, трубчатой модификации углерода — углеродных нанотрубок [5,12], обладающих, согласно теоретическим подсчетам, колоссальной разрывной прочностью — около 130 ГПа, в пересчете на разрывную длину — 10000 км [13]. И хотя фактически нити с такими (или близкими) характеристиками еще не получены, надежды на возможность создания нужного материала побудили ряд ученых и инженеров начать поисковые и исследовательские работы по тематике космического лифта. Обзор ряда таких исследований приведен, например, в статье [11]. В США эти работы были поддержаны НАСА. В результате возникли более или менее проработанные цельные концепции КЛ [6,7]. Практически все они включают в себя следующие основные компоненты:

1. Сверхпрочный несущий трос переменного по длине сечения длиной не менее 60000 км – при меньшей длине требуется чрезмерно большая концевая масса. Материал троса должен иметь разрывную длину более 1000 км.
2. Уравновешивающая масса на конце троса. Она, разумеется, может иметь и какую-нибудь другую функциональную роль.
3. Транспортирующая система в виде опорной конструкции и транспортных вагонеток (кабин).
4. Беспроводная или локальная энергетическая система.
5. Необходимые элементы наземной инфраструктуры.

Рассмотрим подробнее все пункты этого перечня.

Приведенные в пункте 1 значения и оценка разрывной длины троса прямо следует из изложенного в предыдущем разделе. При указанной разрывной длине 1000 км отношение площади максимального сечения троса к начальной согласно формуле составляет около 127, что, действительно, похоже на предельно допустимое значение этой величины, характеризующей степень неоднородности троса. Минимальная длина троса выбрана из соображений разумности концевой массы. Для того чтобы получить приведенное выше число, запишем отношение концевой массы троса к массе самого троса, причем массу троса оценим приближенно, считая, что средняя линейная плотность троса близка к максимальной. Это довольно правдоподобно, учитывая, что в окрестности геостационарной высоты, то есть максимума плотности, производная плотности вдоль троса равна 0, а ближе к концам плотность быстро уменьшается. Количественно, это предположение выразим формулой

$$M_T = \gamma \rho_{max} L = \gamma \rho_0 L \exp \frac{(U(r_{gs}) - U(r_E))}{g_0 L_b},$$

где  $M_T$  – полная масса троса,  $L$  – его длина,  $\rho_0$  и  $\rho_{max}$  – линейные плотности троса в начальной точке (на поверхности Земли) и максимальная (на геостационарной высоте).  $\gamma$  – безразмерный коэффициент, несколько меньший 1. Для определенности, чтобы получить числовую оценку, положим  $\gamma = 0.8$ . Тогда

$$\begin{aligned} \frac{M_k}{M_T} &= \frac{S_0 \tau_m}{\omega_E^2 r - \frac{\mu_E}{r^2}} \exp \frac{(U(r_E + L) - U(r_E))}{g_0 L_b} / \gamma \rho_0 L \exp \frac{(U(r_{gs}) - U(r_E))}{g_0 L_b} = \\ &= \frac{S_0 \tau_m}{(\omega_E^2 r - \frac{\mu_E}{r^2}) \gamma \rho_0 L} \exp \frac{(U(r_E + L) - U(r_{gs}))}{g_0 L_b} = \frac{1}{k \gamma} \frac{L_b}{L} \frac{g_0}{(\omega_E^2 r - \frac{\mu_E}{r^2})} \exp \frac{(U(r_E + L) - U(r_{gs}))}{g_0 L_b}. \end{aligned}$$

Здесь  $r = r_E + L$ . В последнем преобразовании использованы формулы:

$$\rho_0 = \rho_v S_0 \quad \text{и} \quad \tau_m = \frac{\tau_b}{k} = \frac{g_0 L_b \rho_v}{k},$$

где  $\rho_v$  – объемная плотность материала троса,  $\tau_b$  – разрывное напряжение материала,  $\tau_m$  – допустимое напряжение,  $k$  – коэффициент запаса прочности.

По этой формуле получаем, что при  $L_b/k = 3000$  км и  $L < 60000$  км масса концевой тела не менее, чем в 2 раза превышает массу троса. Если длина троса лишь немного превышает высоту геостационарной орбиты, концевая масса многократно увеличивается. Так, на высоте 42000 км от поверхности Земли отношение  $\frac{M_k}{M_T}$  составляет уже около 10. Чтобы не

поднимать такой груз за геостационарную орбиту имеются предложения использовать в качестве балансирующей массы подходящий небольшой околоземной астероид.

Трос является основной несущей частью космического лифта и в то же время транспортной магистралью. В качестве транспортного средства рассматриваются обычно сравнительно небольшие транспортные кабины (вагонетки), перемещающиеся вдоль троса. Чаще всего предлагаются использующие трос, как опорный элемент, автономные кабины, несущие на себе двигатели и механические устройства, обеспечивающие подвижное сцепление с тросом. Имеются также варианты, в которых кабина подвешивается на подвижном тросе, связанном в определенных точках с помощью блоков с несущим тросом. В этом случае двигатели могут располагаться вне кабины, приводя в движение блоки подвижных тросов.

Несмотря на большую выгоду использования космического лифта для доставки грузов на орбитальные высоты, затрата энергии на эту операцию все равно остается весьма существенной. При перемещении 1 кг груза с поверхности Земли на геостационарную орбиту его потенциальная энергия в гравитационно-центробежном поле Земли увеличивается на  $48 \text{ МДж} = 13.3 \text{ кВт-час}$ . Для обеспечения транспортного потока 1000 кг/сутки требуется средняя мощность как минимум 0.5 МВт. Передача такой мощности вдоль лифта по проводам на расстояние в десятки тысяч километров приводит к огромным потерям энергии. Эта энергия выделяется в виде тепла в проводах, и возникает большая проблема отвода этого тепла из конструкции КЛ. Поэтому обычно для обеспечения работы КЛ энергией предлагаются беспроводные средства передачи энергии или использование локальных средств производства энергии, например, за счет солнечного излучения или атомной энергетики. В качестве беспроводной энергопередачи возможна передача энергии по лучу лазера или в виде микроволнового излучения.

Очень редко затрагиваются в основных работах, посвященных космическому лифту, вопросы контроля состояния и управления конструкцией. Возможно, это связано со слабой проработанностью проблем динамики лифта, начиная с описания его состояния. Кроме того содержательное решение таких вопросов требует гораздо более конкретной разработки конструкции и функционирования всего сооружения. В качестве трудной проблемы управления в работе [8], наряду с задачей стабилизации движений, рассматривается задача избегания столкновения с орбитальными объектами естественного или искусственного происхождения. Предлагается использовать для решения обеих задач расположенные вдоль троса небольшие ракетные двигатели для локального отклонения троса в случае риска столкновения. Правда, это связано со значительными проблемами в конструкции и функционировании КЛ. Другим вариантом является размещение основания лифта на плавучей платформе [9]. Одним из методов уменьшения риска разрушающего столкновения является также применение троса не круглого сечения, а в виде тонкой ленты.

Разумеется, постоянно связанная с космическими объектами, неподвижная относительно поверхности Земли, конструкция является удобным местом размещения на ней разнообразных приборов и устройств для постоянного зондирования Земли и космоса, а также для организации долговременных производственных модулей, предназначенных для работы в условиях космоса. Для реализации такой возможности несущая конструкция КЛ должна обладать определенным запасом прочности и допускать возможность размещения на ней жестких каркасных элементов, которые стали бы основой для установки на них нужной аппаратуры и производственного оборудования. Много проблем возникает в случае необходимости более или менее постоянного нахождения на космических элементах конструкции людей.

Важной составной частью общей конструкции КЛ являются ее наземные элементы, как связанные с ней конструктивно, так и обеспечивающие ее функционирование, материальное снабжение, энергетику и т.д. В некоторых проектах предлагается морское базирование наземного сегмента КЛ на подвижной морской платформе. В качестве аргументов за этот вариант выдвигается возможность управлять в определенных пределах положением лифта относительно Земли, например, при возникновении угрозы повреждения конструкции космическим телом или для более удобного размещения всей конструкции на перегруженном пространстве геостационарной орбиты. Выдвигаются также предложения сделать нижний, опирающийся на поверхность сегмент конструкции КЛ как можно выше, снизив этим начальное растягивающее напряжение в нижнем сечении троса, что повлечет за собой пропорциональное снижение нагрузки на всей длине лифта, и, как результат, заметное уменьшение полной массы конструкции.

### **Минимальный космический лифт (B. Edwards)**

Приведенный выше краткий обзор основных сведений о космическом лифте дает представление о больших потенциальных возможностях этой конструкции, огромных ее преимуществах, как средства транспортировки грузов с Земли на орбиту и обратно, и в то же время о колоссальных сложностях ее реализации. Самой большим, принципиальным препятствием для этого, которое нельзя обойти, является отсутствие материалов, удовлетворяющих по прочности требованиям к тросу КЛ. Поэтому долгое время концепция космического лифта рассматривалась как заманчивая, но не реализуемая в обозримое время идея, и почти не получала ни конструктивной разработки, ни серьезного теоретического рассмотрения. Но в начале 1990-х годов японскими учеными была открыта еще одна модификация углерода, в которой молекулы образовывали длинные полые трубки, которую так и назвали – углеродные нанотрубки (УНТ, или CNT в английской транскрипции) [5]. Свойства их оказались удивительными. Теоретические вычисления показали прочность на разрыв для продольно приложенной нагрузки 130 ГПа, что более, чем в 60 раз, превышает прочность легированной стали. С учетом того, что плотность графита примерно в 4 раза меньше плотности стали, получаем, что разрывная длина материала из УНТ примерно в 250 раз больше разрывной длины стали и составляет около 10000 км. Такой материал по прочности вполне удовлетворяет сформулированным выше требованиям к тросу космического лифта. Открытие УНТ дало почву для возврата к идее КЛ. В конце 90-х годов в рамках НАСА была проведена работа по пересмотру этой идеи с учетом новых достижений. По договору с Институтом Перспективных концепций (NIAC NASA) Б.Эдвардс провел исследование возможностей реализации этой идеи и пришел к выводу, что при наличии производства УНТ, обладающих теоретически найденными характеристиками, создание КЛ возможно на фактически имеющейся технологической базе в течение 10 лет с затратой около 40 млрд. долларов. Результаты Эдвардса были изложены в отчете о его работе и в более доступных публикациях [1, 6, 9].

Положенная в основу выводов Эдвардса концепция включает следующие основные моменты:

1. Основным элементом троса является лента из сверхпрочного материала (УНТ), вмещающая несущую и опорную функции.
2. Транспортная система реализуется в виде кабины, ползущей по несущей ленте.

3. Энергия для движения кабины передается с Земли по лазерному или микроволновому лучу.
4. В качестве наземной базы используется плавающая платформа, расположенная в зоне экватора в районе с наиболее спокойной грозовой и штормовой обстановкой.
5. Система строится последовательно, начиная с минимальной конфигурации с лентой толщиной 1 мкм и шириной несколько сантиметров, путем постепенного усиления несущего троса склеиванием его с дополнительно доставляемым на орбиту материалом.

Детально проработана процедура последовательного создания конструкции, когда на начальном этапе выводится на орбиту, близкую к геостационарной, и разворачивается с нее легкая лента микронной толщины из УНТ и несущей способностью около 3000 Н. Она разворачивается до поверхности Земли и закрепляется на ней. Дальнейшее развитие конструкции производится путем усиления этой ленты с помощью подъема по ней и утолщения и уширения ее новыми партиями сверхпрочного материала. Таким образом, с самого начала конструкция работает как транспортное средство, то есть космический лифт, обеспечивающий собственное строительство. По расчетам автора, каждые 4 суток можно будет поднимать новую партию материала и примерно через 2.5 года довести грузоподъемность системы до 20 тонн. После этого конструкция может использоваться в рабочем режиме для разнообразных транспортных операций в околоземном пространстве. Собственно сама транспортировка осуществляется автономно движущейся по тросу кабиной, габариты и вместимость которой постепенно увеличиваются вместе с развитием системы. Энергия для работы лифта передается на кабину с поверхности Земли лазерным лучом. Для подъема 20-тонной кабины предполагается иметь мощность 2.4 МВт.

Такая, довольно полная и последовательная концепция космического лифта была представлена автором в отчете, а затем широко распространена в статьях и докладах, была издана книга такого же содержания. В рекламную кампанию с целью убедить людей в почти полном отсутствии технических препятствий для быстрого сооружения КЛ включились несколько организованных на волне ажиотажного интереса к этой проблеме компаний. Наиболее активными среди них являются калифорнийская Spaceward Foundation, возглавляемая Беном Шелефом, и базирующаяся в Бремертоне (штат Вашингтон) LiftPort Group. Первая из них при финансовой поддержке НАСА организовала цикл соревнований среди, в основном, студенческих команд на изготовление сверхпрочного материала и подъемника, способного за наименьшее время подняться по подвешенной к аэростату ленте с помощью электродвигателя, получающего питание с поверхности Земли по лазерному лучу. Программа соревнований была рассчитана на 5 лет (2006–2010), НАСА выделила на нее 4 млн. долларов. В конце срока предполагалось продемонстрировать работоспособность выбранных принципов работы и продвинуться в реальном создании сверхпрочных материалов. Фирма LiftPort Group под руководством Майкла Лэйна провозгласила своей задачей создание массовой транспортной системы, открывающей широкие возможности овладения ресурсами космического пространства и доступной для частных пользователей. Ее руководители были настолько уверены в быстром достижении этой цели, что даже опубликовали на своем сайте дату ввода в строй космического лифта – 12 апреля 2018 года. Правда, через некоторое время этот срок был отодвинут на 2031 год.

Во всяком случае, работа Эдвардса и разработанная им концепция космического лифта вызвали значительный всплеск активности в этой области. Начиная с 2002 года, а особен-

но после 2005 года стали появляться не только рекламные и популяризаторские статьи, но и серьезные научные исследования, в том числе, по вопросам динамики конструкции, по различным ее техническим аспектам. В связи с появлением новой области приложения умножились разработки по технологии производства УНТ, по методам беспроводной передачи энергии. Начиная с 2004 года на крупнейшем международном собрании ученых в области космической деятельности и астронавтики – ежегодных Международных астронавтических конгрессах – образована специальная секция по космическому лифту. Начали проводиться и специализированные мероприятия: в США – Space Elevator Conference, проводимая ежегодно в Редмонде (штат Вашингтон), в Европе International Conferences on Space Elevator, CNT Tether Design and Lunar Industrialization Challenges. Несколько удивляет то обстоятельство, что, несмотря на значительное количество публикаций и разнообразие рассматриваемых по тематике КЛ вопросов, практически все обсуждение ведется на основе представленной в работах Эдвардса концепции, лишь иногда с незначительными модификациями.

В то же время, на наш взгляд, эта концепция отнюдь не является неуязвимой для критики, да и критические замечания тоже нередки в публикациях, но они обращены, как правило, к общей идее космического лифта, к трудно разрешимым пока вопросам освоения производства удовлетворительного материала на основе УНТ, или к трудностям и угрозам, обсуждать которые на данном этапе преждевременно, например, к уязвимости КЛ для террористических нападений [10]. Но существует немало недостатков и слабостей, вытекающих из самой концепции, и обусловленных, по-видимому, стремлением автора всячески продемонстрировать техническую возможность (и даже относительную легкость) создания этого замечательного сооружения, привлечь внимание и средства к его скорейшему созданию. Основными пунктами критики, по нашему мнению, являются следующие:

1. Принятая в концепции Эдвардса (да и практически во всех других серьезных предложениях) схема, в которой транспортировка грузов вдоль троса осуществляется с помощью кабин, движущихся по этому же тросу. Такая схема требует обеспечения прочного механического контакта между тросом и подъемной кабиной, при этом трос является не только главным несущим элементом всей системы, но и выполняет роль опорной среды для движения кабины. Это обстоятельство, во-первых, приводит к тому, что возникающие при неравномерности движения кабины динамические нагрузки непосредственно передаются на трос, и без того работающий почти на пределе прочности, во-вторых, механический контакт между тросом и кабиной в любом случае приводит к повышенному износу и истиранию тонкой ленты троса. Указанные два обстоятельства могут значительно снизить надежность и уменьшить срок жизни конструкции, ухудшив тем ее эксплуатационные характеристики. Кроме того, рассматриваемая конструкция, в которой в единственном тросе совмещены несущая и опорная функции, практически исключает возможность организации двустороннего движения, что сильно ограничивает транспортные возможности КЛ Эдвардса. Встречающиеся иногда предложения создания КЛ с двумя тросами трудно реализуемы, так как практически невозможно создать систему, включающую два сверхдлинных (десятки тысяч километров) троса, с одной стороны, сохраняющую целостность, с другой, исключаящую возможность столкновения и спутывания тросов. Наконец, нагрузка несущего троса дополнительной опорной функцией приводит к большой проблеме обеспечения тепловой безопасности троса, на котором будет выделяться большое количество тепла, как на активной фазе движения (движение за счет работы дви-

гателей на участках, где потенциальная энергия подъемников увеличивается), так и на пассивной фазе с уменьшающейся потенциальной энергией подъемников.

2. Большие возражения вызывает принятая концепция беспроводного энергоснабжения КЛ. Разумеется, это серьезная проблема и современные проводники электричества вряд ли подойдут, чтобы осуществить целенаправленную передачу энергии по проводам, а солнечные батареи пока еще не настолько совершенны, чтобы обеспечить энергоснабжение в нужном объеме. Но, разумеется, техника совершенствуется, и ко времени, когда создание КЛ станет реальностью, параметры этих устройств могут достичь нужных величин. Главный, на наш взгляд, недостаток беспроводного энергоснабжения конструкции с поверхности Земли состоит в том, что такая система является по существу односторонней: если на подвижной кабине можно (с определенными трудностями) разместить устройства для приема лазерного или микроволнового излучения, то передать оттуда заметное количество энергии по лучу – задача существенно более сложная. Поэтому при беспроводном способе передачи энергии практически невозможно обеспечить ни перераспределение энергии в пределах лифта (на сотни и тысячи километров), ни передать возможный избыток энергии на Землю. Это означает фактически невозможность рекуперации энергии, то есть использования высвобождающейся на пассивных участках движения кабин энергии, что составляет значительную долю экономии энергии за счет КЛ и в большой степени лишает его этого преимущества.
3. В концепции Б.Эдвардса, как, практически и во всей известной литературе по КЛ, почти не затрагиваются вопросы организации систем контроля за состоянием оборудования и управления движениями КЛ, обеспечивающие живучесть конструкции. Исключения представляют некоторые предложения о возможностях уклонения конструкции от столкновения с другими орбитальными объектами. Так, уже в статьях Эдвардса указывается, что при подвижном расположении в океане устройств закрепления КЛ путем перемещения этих устройств можно до определенной степени управлять движениями лифта и, в частности, решать задачу избегания столкновений. Для этого, разумеется, нужно иметь детальное представление о динамике сверхдлинного гибкого троса. Другой способ решения этой задачи предложен в [8], где предлагается разместить вдоль лифта множество ракетных двигателей, которые представляют собой средство для более локального управления движениями троса. Все же таких двигателей не может быть очень много и “сфера влияния” каждого из них будет, скорее всего, включать в себя участок троса длиной несколько тысяч километров.
4. Практически нет возможности разместить на чрезвычайно облегченной и сильно напряженной конструкции КЛ стационарные отсеки и оборудование для проведения постоянной научной и производственной деятельности, что в значительной степени ограничивает функциональные возможности КЛ.

Все высказанные замечания к конструкции Эдвардса достаточно очевидны, и автору, скорее всего, пришлось пойти на принятие таких ограничений вследствие желания показать относительную доступность достаточно быстрой реализации проекта (при условии, конечно, существенных успехов в промышленном получении сверхпрочного волокна из нанотрубок) с целью привлечь к нему внимание. В то же время поспешность в этой деятельности опасна не только прямыми последствиями возможных неудач и даже катастроф, но и сильной дискре-

дитацией в результате таких событий самой идеи космического лифта с отсрочкой связанных с ней исследований и разработок на многие десятилетия.

Поэтому излагаемая ниже концепция нагруженного космического лифта, определяющая по мнению авторов более реалистичные черты и характеристики КЛ, вовсе не рассчитана на быстрое осуществление, а скорее служит основой для постановки возникающих при этом научных и технических проблем, только при глубоком осмыслении которых и значительном прогрессе в их решении возможно продвижение к осуществлению этой грандиозной идеи.

### Нагруженный космический лифт

Предлагаемая здесь конструкция КЛ по своей общей идее должна отличаться значительно большими функциональными возможностями, надежностью, управляемостью и долговечностью. Для того чтобы обеспечить такие качества, разумеется, необходимо оснастить эту конструкцию соответствующими техническими средствами и устройствами, что неизбежно увеличит ее массу, так что несущий трос и движущиеся кабины, являвшиеся в ранее рассматриваемых конструкциях практически единственными существенными частями, теперь теряют эту роль и являются только одними из ее элементов. В частности, при расчете прочности несущего троса необходимо с самого начала учитывать наличие других конструктивных составляющих. Так как КЛ представляет собой, по существу, одномерное сооружение, то для таких расчетов надо иметь хотя бы общее представление о распределении указанной дополнительной массы (дополнительной нагрузки) вдоль троса. Вследствие огромной длины троса и трудности обеспечения непосредственной механической и энергетической связи между удаленными друг от друга частями лифта естественно предположить, что основные его функции являются более или менее одинаковыми на таких частях, и связанная с ними дополнительная масса будет, в общем, довольно равномерно распределена по длине. Принятие такого предположения приводит к концепции *равномерно нагруженного* космического лифта. Далее мы будем придерживаться этой концепции.

Итак, будем считать, что в конструкцию КЛ, кроме простирающегося на всю его длину несущего троса из сверхпрочного материала с разрывной длиной  $L_b$  и линейной плотностью  $\rho_T S(s)$ , где  $\rho_T$  – плотность материала троса,  $S$  – зависящая от координаты  $s$  рассматриваемой точки площадь сечения несущей компоненты троса, включены еще некоторые компоненты, составляющие дополнительную массу  $a$  на единицу длины троса, и эта величина  $a$  вдоль троса не меняется. Тогда для полной погонной массы  $\sigma$  троса с учетом его равнонапряженности имеем

$$\sigma_T = \rho_T S(s), \quad \sigma = \sigma_T + \sigma_a, \quad T(s) = \tau_m S(s) = g_0 L_m \sigma_T.$$

Отсюда

$$\frac{d\sigma}{ds} = \frac{d\sigma_T}{ds} = \frac{1}{g_0 L_m} \frac{dT}{ds} = \frac{1}{g_0 L_m} \sigma \left( \frac{\mu_E}{(r_E + s)^2} - \omega_E^2 (r_E + s) \right),$$

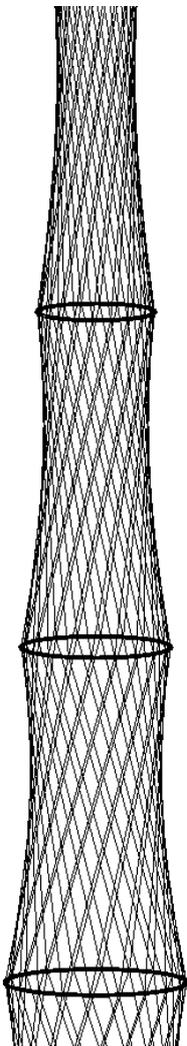
и

$$\sigma(s) = \sigma(0) \exp \frac{U(r_E) - U(r)}{g_0 L_m}.$$

Таким образом, распределение полной линейной плотности равномерно нагруженного троса имеет тот же вид, что и для троса без нагрузки.

### Несущая конструкция

Наличие дополнительной массы  $\alpha$  дает возможность разнообразить конструкцию лифта для повышения его функциональных возможностей. Далее в этой работе рассматривается следующее построение несущей конструкции. Она состоит из отдельных цилиндрических секций, круговая в сечении форма которых поддерживается круговыми шпангоутами. Совокупность этих шпангоутов образует поперечную структуру несущей компоненты лифта. Шпангоуты соединяются набором тонких прямолинейных сверхпрочных нитей, расположенных косо по отношению к осевой линии КЛ, образуя в каждой секции собранную из этих нитей гиперболоидальную боковую поверхность. Получающаяся в целом конструкция лифта локально напоминает известную Шуховскую радиотрансляционную башню в Москве, только гораздо более узкую и длинную с одинаковым диаметром всех секций. Не обсуждая пока проблем создания такой конструкции и ее механических свойств, укажем некоторые достоинства предложенной конструктивной схемы:



1. Для реализации такой конструкции не требуется получения сверхпрочных волокон космической длины, вся конструкция собирается из одинаковых сравнительно коротких отрезков нитей (длиной порядка 100 м).
2. Снимается трудная для других способов построения проблема соединения отдельных элементов сверхпрочного троса в единую сверхдлинную конструкцию без потери прочности.
3. Легко решается проблема переменности сечения троса по длине. Для этого боковые поверхности отдельных секций просто должны содержать различное количество нитей.
4. Получающаяся таким образом продольная несущая структура состоит из отдельных нитей и ее прочностные характеристики практически не отличаются от характеристик отдельных нитей, в то время как прочность любого тканого или клееного материала из тех же нитей существенно меньше прочности отдельной нити.
5. Упрощается задача унификации процесса построения всей конструкции, так как отдельные секции являются практически взаимозаменяемыми.
6. Облегчается задача выявления и замены дефектных и поврежденных элементов.
7. Боковая поверхность предлагаемой конструкции является практически двумерной поверхностью, при этом сохраняются противометеоритные преимущества ленточного исполнения несущего троса.

### Транспортная система

Секционированная нагруженная конструкция позволяет осуществить на КЛ новый уровень развития транспортной системы. В ней реализован принцип разделения несущей и опорной функций основной конструктивной компоненты. Опорная функция при этом возлагается на систему опорных тросов, служащих для перемещения подъемников. Каждой из опорных тросов имеет ограниченную длину (порядка километра) и крепится в концевых уз-

лах к несущей конструкции. При этом такой трос не обязан иметь ни чрезвычайную прочность, ни переменное сечение. Кабина подъемника может либо двигаться вдоль такого опорного троса, не подвергая несущую конструкцию ни механическому износу, ни добавочным динамическим нагрузкам, либо неподвижно сцепляться с ним. В последнем случае подъемник движется вместе с опорным тросом, как в обычных наземных лифтах. Тогда двигатели и источники электроэнергии располагаются не на кабине, а неподвижно относительно основной конструкции лифта в узлах крепления подвижных тросов. При этом возможны конструктивные решения, обеспечивающие перецепление кабины с одного опорного троса на другой без остановки движения. Если поперечный размер рассматриваемой конструкции достаточно велик (несколько метров), то появляется возможность размещения на ней нескольких опорных тросов. Это дает возможность осуществить двустороннее движение кабин вдоль КЛ, что обеспечивает существенное улучшение его функциональных характеристик.

### Энергетика

Значительные возможности для развития получает в рассматриваемой конструкции и энергетическая система. Во-первых, дополнительная несущая способность нагруженного лифта позволяет реализовать на нем продольную энергетическую структура в виде проводных средств передачи электроэнергии между отдельными частями лифта. Даже если будет сложно осуществить такую передачу в масштабах всей конструкции, то уже локальная переброска (в пределах 1000 км) электроэнергии даст возможность значительно повысить эффективность работы за счет рекуперации и более рационального размещения источников (приемников) энергии и потребителей. В принципе, при наличии системы подвижных тросов и соответствующей организации транспортного движения возможна и чисто механическая рекуперация, когда одна кабина в процессе движения является противовесом для другой. Как уже упоминалось, в этом случае двигатели могут устанавливаться на КЛ неподвижно, неподвижно относительно корпуса лифта могут крепиться и приемники энергии в случае использования беспроводных схем энергоснабжения с поверхности Земли, что значительно упрощает дело. Но кроме этого, здесь значительно расширяются возможности использования и солнечной энергии, так как размеры приемных устройств не ограничиваются теперь габаритами подъемных кабин. Более того, солнечные батареи могут теперь располагаться, в случае их пленочного исполнения, по всей поверхности лифта, что, даже при минимальном их КПД, может с избытком обеспечить энергетические затраты на транспортировку. Не следует также упускать из виду потенциальную возможность использования для передачи энергии перспективных неметаллических проводников на основе, например, различных модификаций графена, электропроводность которого по некоторым данным может приближаться к сверхпроводникам. Эти материалы могут послужить основой для создания общей проводной системы электроснабжения КЛ. Тогда возникают возможности не только для передачи энергии на лифт с Земли по проводам, но и обратного процесса снабжения земных потребителей энергией, полученной в космосе. Возможность рекуперации энергии, выделяемой на пассивных участках транспортировки, может уменьшить остроту проблемы сброса этой энергии.

### Управление и контроль

Упомянем, наконец, еще одну немаловажную особенность данной конструкции. Все основные структурообразующие ее элементы вплоть до отдельных нитей несущего троса открыты для наблюдения и доступа. Это дает возможность организовать систему тотального контроля за состоянием сооружения и его отдельных элементов. Технически сложнее, но, по-

видимому, возможно создать систему автоматического выявления и замены дефектных и поврежденных элементов конструкции. Такого рода система помогла бы существенно повысить надежность и долговечность конструкции. Можно представить себе также сложную, но мощную систему управления локальными изгибными движениями КЛ путем дифференцированного управления натяжением отдельных волокон. Такая система, без сомнения, была бы полезна для решения многих задач управления состоянием и движениями лифта, в том числе, задачи уклонения от опасных столкновений с внешними объектами.

### Размещение стационарных относительно Земли объектов

Наконец, наличие на конструкции жесткой поперечной структуры в виде шпангоутов дает возможность достаточно просто, и не мешая основной транспортной функции лифта, разместить на нем многочисленные площадки для установки различного оборудования и стационарные рабочие места для проведения научной и производственной деятельности и обслуживания КЛ.

В целом, изложенные выше предложения образуют основу концепции полнофункционального космического лифта, позволяющего решать следующий круг задач:

1. обеспечить постоянную экономичную транспортную магистраль между поверхностью Земли и ближним космосом, позволяющую осуществлять двустороннее движение и достаточно большой грузопоток без расхода рабочего тела и засорения околоземного пространства;
2. в частности, существенно облегчить вывод космических аппаратов на высокоэллиптические и гиперболические орбиты;
3. обеспечить условия для проведения разнообразной научной и производственной деятельности в условиях космического пространства на стационарных базах, размещенных на конструкции космического лифта;
4. в более далекой перспективе развить на той же основе гуманитарную деятельность в космосе.

Такой лифт будет обладать также улучшенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с имеющимися концептуальными схемами, а именно:

1. возможностью полного контроля за состоянием элементов КЛ, вплоть до отдельных волокон несущего троса, а также возможностью устранения мелких дефектов и ремонта небольших повреждений на борту лифта;
2. возможностью управления локальными движениями лифта путем дифференцированного изменения натяжений отдельных волокон;
3. повышенной за счет этих возможностей надежностью и долговечностью конструкции.

Разумеется, создание такого сооружения представляет собой техническую задачу гигантской сложности. Прежде всего, конечно, решение ее невозможно без разработки и освоения производства сверхпрочного волокна с разрывной длиной порядка 3000 км в промышленных масштабах. Хотя работы в этом направлении ведутся в ряде стран, достигнутые успехи пока не оправдали надежд на быстрое продвижение. Есть отдельные сообщения о получении с довольно большими трудностями выровненных пучков волокон примерно метровой длины.

### **Оценочные характеристики**

Для того чтобы примерно представить себе основные параметры предлагаемой конструкции, приведем здесь некоторые ориентировочные расчеты. Основными параметрами при этом яв-

ляются разрывная (предельно допустимая) длина троса  $L_m$  и величина равномерно распределенной дополнительной нагрузки  $\sigma_a$ . Теоретически вычисленная разрывная длина волокон из УНТ составляет около 10000 км. В недавних экспериментах на коротких волокнах удалось получить разрывную длину около 7500 км [17]. Учитывая еще необходимый запас прочности, будем принимать в приводимых ниже оценках  $L_m = 3000$  км. Оказывается, что только от этой величины зависит отношение максимальной полной линейной плотности конструкции  $\sigma_c = \sigma_T + \sigma_a$  на высоте геостационарной орбиты к ее величине на поверхности Земли. (Здесь  $\sigma_c$  – полная линейная плотность троса,  $\sigma_T$  – плотность несущей компоненты). Обозначив это отношение  $\Phi_m \equiv \Phi_m(L_m)$ , будем иметь

$$\Phi_m(L_m) = \frac{\sigma_{c,max}}{\sigma_{c,0}} = \frac{\sigma_{T,max} + \sigma_a}{\sigma_{T,0} + \sigma_a},$$

откуда

$$\sigma_{T,max} = \Phi_m \sigma_{T,0} + (\Phi_m - 1) \sigma_a.$$

(Нижний индекс “0” указывает на значение линейной плотности на поверхности Земли). Эта формула позволяет оценить важное для нас значение максимальной силы натяжения троса. Действительно, для равнонапряженного троса

$$T = g_0 L_m \sigma_T.$$

Сила натяжения  $T_0$  (на поверхности Земли) должна обеспечивать, по крайней мере, подъем кабины лифта с массой порядка 1 т, поэтому положим для оценки  $T_0 \cong 10^4$  Н, и  $\sigma_{T,0} = T_0 / (g_0 L_m) \cong 1/3 \frac{\text{т}}{\text{км}}$ . Труднее привести рациональные доводы для обоснования оценки дополнительной нагрузки. Представляется, что величина  $\sigma_a = 1 \frac{\text{т}}{\text{км}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$  недостаточна для обеспечения повышенных функциональных возможностей лифта. С другой стороны, нагрузка свыше  $1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$  приводит к чрезвычайно тяжелой конструкции. Поэтому при дальнейших оценках будем полагать  $1 \frac{\text{т}}{\text{км}} < \sigma_a < 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$ . Для характеристики ее введем безразмерный параметр  $A = \sigma_a / \sigma_{T,0}$ , определяющий распределение полной массы лифта между массой несущего троса и дополнительной массой. Тогда указанное предположение записывается так:  $3 < A < 3000$ . Приведенная выше формула принимает вид

$$T_{max} = T_0 (\Phi_m + (\Phi_m - 1)A) \cong T_0 (5 + 4A),$$

где вместо  $\Phi_m$  подставлено значение  $\Phi_m \cong 5$ , примерно равное его значению при  $L_m = 3000$  км. Согласно этой формуле получаем  $17 < T_{max} / T_0 < 12000$ , следовательно, максимальная сила натяжения троса тяжелого (соответствующего верхней границе  $A$ ) лифта около  $1.2 \cdot 10^8$  Н. Важное значение имеет распределение масс между отдельными компонентами лифта. Так как дополнительная нагрузка постоянна вдоль троса, то легко получаем, что полная ее масса для лифта длиной 10000 км составляет для тяжелого лифта 100000 т. При этом масса несущей компоненты троса равна примерно 310000 т, и около 90000 т приходится на массу конечного тела. Полная масса лифта около 500000 т.

Полученные цифры могут показаться устрашающе большими, но не следует упускать из виду к какому огромному сооружению они относятся. Кроме того, большая дополнительная масса означает большие дополнительные возможности КЛ.

Рассмотрим ориентировочно возможности распределения этой дополнительной нагрузки. Примем для определенности, что длина секции лифта (расстояние между шпангоутами) равно 100 м, а диаметр шпангоута 3 м, так что внутри этого кольца можно разместить две лифтовые шахты. Пусть на поверхности секции можно разместить до 1200 соединяющих шпангоуты силовых нитей, так что расстояние между соседними нитями на шпангоуте будет около 8 мм. Вспоминая сделанную выше оценку максимального натяжения троса ( $1.2 \cdot 10^8$  Н), находим, что каждая нить должна выдерживать нагрузку  $10^5$  Н. Линейная плотность такой нити при принятой здесь прочности материала равна  $3,3$  г/м, площадь сечения  $2.5$  мм<sup>2</sup>, диаметр 1.8 мм, а масса одной 100-метровой нити 330 г. Если все нити конструкции одинаковы, то общее их число  $0.94 \cdot 10^9$ . Для оценки массы дополнительной поперечной структуры, состоящей в основном из круговых шпангоутов, подсчитаем массу такого шпангоута, исходя из необходимой его прочности. Основной нагрузкой, действующей на шпангоуты, является однородное радиальное сжатие под действием наклоненных к оси конструкции сильно напряженных нитей. Если  $\varphi$  – угловая мера дуги между точками крепления нити к последовательным шпангоутам,  $d$  – диаметр шпангоута,  $l$  – расстояние между шпангоутами, то радиальная компонента силы, действующей на шпангоут от одной нити, сила натяжения которой равна  $T_1$ , определяется формулой

$$T_{rad} = \frac{d}{l} T_1 \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

Если общая сила натяжения всех нитей между шпангоутами  $T = nT_1$ , то всестороннее радиальное давление на шпангоут

$$p_{rad} = \frac{T}{\pi l} \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

При найденных выше величинах ( $T = T_{max} = 1.2 \cdot 10^8$  Н,  $l = 100$  м) и  $\varphi = 60^\circ$  получаем  $p_{rad} \cong 10^5$  Н/м. Используя формулу Леви для критического напряжения упругого кольца при равномерном всестороннем сжатии [14]

$$p_{кр} = 3EJ r^{-3},$$

найдем, что кольцо радиусом  $r = 1.5$  м может выдержать такое напряжение при изгибной жесткости  $EJ \cong 1.1 \cdot 10^5$  Н·м<sup>2</sup>. Примерно такую жесткость на изгиб имеет титановое кольцо толщиной 1 см и шириной (в плоскости кольца) 10 см ( $E = 1.1 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>,  $J \cong 8.3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>4</sup>), и поэтому может выдержать требуемое напряжение. Во всяком случае, полученное требование к прочности не представляется невыполнимым. Масса такого кольца составляет около 42 кг, то есть 42% от 100 кг дополнительной нагрузки на 100-метровой секции. Полная масса всех шпангоутов будет около 42000 т.

Поэтому можно считать, что масса поперечной структуры лифта, состоящей, в основном, из силовых шпангоутов, составляет примерно половину массы всей дополнительной нагрузки, то есть 50000 т.

Остальная половина этой нагрузки распределяется на продольную механическую структуру: конструкция транспортной системы, включающей сами подъемники, подвижные тросы и обслуживающее их оборудование, на продольные электрические кабели и другое оборудование энергетической системы, на точечные стационарные объекты. Если принять, что в конструкции этих элементов можно использовать те же сверхпрочные материалы, что и

для несущего троса, и перспективные легкие неметаллические проводящие кабели, то ограничения на массу для этих элементов, по-видимому, не такие жесткие. Ориентировочная весовая компоновка предлагаемой конструкции КЛ (в тяжелом варианте) представлена в таблице 2:

Таблица 2

<u>Части или элементы конструкции</u>	<u>Масса (т)</u>
Несущий трос	310000
Концевая масса (противовес)	90000
Дополнительная масса, всего	100000
Поперечная структура (шпангоуты, траверсы)	50000
Транспортная система (подъемники, тросы, подъемное оборудование)	10000
Продольные электрические кабели	10000
Другие элементы энергетической системы (принимающее и генерирующее оборудование)	10000
Точечные функциональные элементы и другая полезная нагрузка	20000

### **Некоторые проблемы сооружения и эксплуатации нагруженного КЛ**

Приведенные оценки могут показаться устрашающими и нереализуемыми. На взгляд авторов они лишь отражают более или менее грандиозность самой идеи космического лифта и дают представление о реальных масштабах его конструкции. Следует отметить также, что кажущиеся гигантскими размеры и масса вполне сопоставимы с этими характеристиками для крупнейших сооружений человечества. Большие морские суда – авианосцы и супертанкеры – имеют массу около 100000 т. Масса древнеегипетской пирамиды Хеопса составляет около 5 млн. т, и вся эта масса практически при отсутствии технических средств была поднята на высоту до 150 м в течение 20 лет. Много аналогий с КЛ можно найти в истории строительства Транссибирской магистрали в России. Длина ее свыше 5000 км. Сооружалась она в течение почти 20 лет в условиях почти полного бездорожья и очень затрудненной связи между отдельными участками магистрали. Для характеристики объемов работ укажем, что только в 1903 году в полотно дороги было уложено свыше 1 млн. тонн рельсов и крепежной конструкции, а возможности транспортировки показывает, например, такой факт: конструкции для моста через Амур изготавливались в Варшаве и затем транспортировались сложным путем через Одессу, по морю до Владивостока и оттуда опять по железной дороге до Хабаровска. Эта перевозка занимала несколько месяцев, причем часть конструкций погибла в результате военных действий начавшейся Первой мировой войны. Разумеется, приведенные факты являются лишь отдаленными аналогиями возможных трудностей сооружения КЛ, на самом деле можно ожидать немало других сложностей разного характера. Но все же подчеркнем, что почти все предвидимые при сооружении КЛ проблемы и трудности могут быть преодолены на основе уже имеющихся или (достаточно продвинутых в разработке) проходящих стадию промышленного внедрения технологий. Исключение составляет только самая ключевая проблема КЛ – освоение промышленного производства сверхпрочного волокна на основе УНТ.

Исследования по этой проблеме довольно интенсивно ведутся в ряде стран в течение последнего десятилетия, особенно в США, в Китае и в Японии. Большая трудность возникает в том, чтобы получить более или менее линейно ориентированный массив длинных молекул. Для предшествующих экспериментов приходилось буквально поштучно выбирать такие молекулы, в результате, наибольшая длина полученных до 2006 года волокон исчислялась одним-двумя сантиметрами. Похоже, что положение начинает меняться в последние годы. В интернете появились сообщения о возможности получения волокон из УНТ многометровой длины. Хотя японцы мало пишут о своих успехах в этой области, заслуживает внимание резко возросший, начиная с 2009 года, интерес со стороны японских исследователей к проблематике космического лифта. (На секциях Международного конгресса по астронавтике, IAC, посвященных космическому лифту, не было японских докладов до 2009 года. В 2009 году японскими участниками было представлено 2 таких доклада из 7, а в 2010 – 6 докладов из 8). В Японии получены самые прочные к настоящему времени полиамидные волокна: Zylon и Тогауса [15], предложен метод получения длинных волокон из упорядоченных пучков молекул УНТ, образована Японская ассоциация по космическому лифту.

Растущая активность в изучении свойств углеродных нанотрубок позволяет практически уверенно говорить об их уникальных электрических и термических свойствах, что дает надежду на возможность осуществления передачи электроэнергии вдоль лифта по проводам. Это не только снимает заботу о размещении на КЛ аппаратуры для дистанционного приема и передачи энергии, но и открывает чрезвычайно привлекательные возможности для рекуперации энергии и обмена ею между отдельными устройствами, а также облегчает проблему сброса энергии, выделяющейся на пассивных участках движения транспортных устройств лифта.

Разумеется, даже когда все научные и технологические проблемы будут решены, остается колоссальная проблема организации и финансирования самого строительства. Оно может потребовать не только огромных материальных и финансовых ресурсов, но и занять очень большое время, исчисляемое десятилетиями. Поэтому разумным путем достижения конечной цели может быть подход последовательного продвижения к ней в рамках общей стратегии космических исследований при наличии общего понимания величия решаемой задачи и организации широкого международного взаимодействия. [16].

Одним из возможных первых шагов в этом направлении может быть сооружение большой орбитальной станции на геостационарной орбите. Помимо своего прямого назначения, такая станция могла бы играть роль платформы, с которой начнется сооружение отдельных элементов космического лифта, например, в виде развертывания последовательных гиперболических секций. При этом нет необходимости дожидаться освоения технологий производства сверхпрочных материалов – первые тысячи километров такой конструкции вполне могут быть созданы на основе уже существующих волокон. В процессе этой работы можно будет опробовать и отработать необходимые для КЛ аппаратуру и технологии, проверять ее функциональные и эксплуатационные качества. Введенные в строй секции будут постепенно образовывать большую геостационарную тросовую систему, которая может быть использована обычным для таких систем образом, как орбитальная транспортная система, а также может служить в качестве “космической недвижимости”, дополнительным к самой геостационарной орбите местом размещения орбитальных систем, требующих сохранения своего положения относительно поверхности Земли. В таком качестве такое сооружение может иметь привлекательность и для коммерческой деятельности.

## Заключение

Изложенная в данной работе концепция описывает очень трудную для реализации огромную и затратную конструкцию. Создание ее, по нашему убеждению, не может быть единственной целью какого-либо специального проекта. Оно требует проведения капитальных научных исследований, создания новых технологий и целых отраслей производства и должно осуществляться, как составная часть общей национальной или международной стратегии освоения околоземного космического пространства. Многолетняя поэтапная работа над космическим лифтом может стать одним из притягательных центров такой стратегии, стимулировать работу научных и конструкторских коллективов, инициировать творческий поиск в ряде направлений. С другой стороны, такая работа невозможна без опоры на огромный опыт, накопленный за десятилетия развития космонавтики, и современную инфраструктуру космической деятельности. Завершение строительства этого сооружения по-настоящему расширит сферу деятельности человечества за пределы своей планеты. Разумеется, все это может оказаться возможным только при условии, что будут найдены пути для крупномасштабного промышленного производства сверхпрочного материала несущего троса.

## Литература

1. Edwards B.C. Design and Deployment of a Space Elevator. // *Acta Astronautica*, v. 47, iss. 10, Nov. 2000, p. 735-744.
2. Арцутанов Ю.Н. В космос на электровозе. // *Комсомольская правда*, 31 июля 1960 г.
3. Арцутанов Ю. В космос без ракет. // *Знание – сила*, 1969, № 7, с. 25.
4. Pearson J. The orbital tower: a spacecraft launcher using the Earth's potential energy. // *Acta Astronautica*, 1975, v. 2, No. 10, p.785-799.
5. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. // *Nature*. 1991, v. 354, № 6348, p. 56–58.
6. Edwards Bradley C. The Space Elevator. Final Report on the theme “The Space Elevator” for the NASA Institute for Advanced Concepts (NIAC). 80 p.
7. Smitherman D.V. Jr. Space Elevator: An Advanced Earth-Space Infrastructure for the New Millenium. // Marshall Space Flight Center. Huntsville, Alabama. NASA/CP-2000-210429. August 2000.
8. Perek L. Space elevator: Stability. // *Acta Astronautica*, v. 62, iss. 8–9, Apr.–May 2008, p. 514–520.
9. Edwards B.C. The Space Elevator. // NIAC Phase II. Final Report – Eureka Scientific, March 1, 2003.
10. Первушин Антон. Мифология космического лифта (Эссе из цикла “Космическая экспансия: от фантастики к реальности”). // “Полдень. XXI век”, 2009, № 53 (май), сс. 161-170.
11. Шошунов Н.Л. Космический лифт: надежды и проблемы. // *Полет*, № 3, 2006, с. 53-60.
12. Yakobson B.I., Smalley R.F. Fullerene Nanotubes: C 1.000.000 and Beyond // *American Scientist* 85, July/Aug. 1997, pp. 324-337.
13. Demczyk B.G., Wang Y.M., Cumings J., Hetman M., Han W., Zett A. and Ritchie R.O. // *Mater. Sci. Eng.*, A334, 173, 2002.
14. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. Киев: Наукова Думка, 1972.

15. Okada M., Inoue Y., Ishida A., Mimura H. Light and Strong CNT Fiber Spun with CNT Web. // 61-st International Astronautical Congress. Prague, CZ. IAC-10-D4.4.3
16. Avnot Mark S. The Space Elevator in the context of current space exploration policy. // Space policy, v. 22, iss. 2, May 2006, p. 133–139.
17. Chia-Chi Chang, I-Kai Hsu, Mehmet Aykol, Wei-Hsuan Hung, Chun-Chung Chen, and Stephen B. Cronin. A New Lower Limit for the Ultimate-Breaking Strain of Carbon Nanotubes. // ACS Nano, 2010, 4(9), pp. 5095-5100.