

**Пл.1**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем управления имени В.А.Трапезникова  
Российской академии наук

Высотные привязные телекоммутационные платформы  
и ветровые нагрузки

Хитрово Алексей Александрович  
ст. научн. сотр., к.т.н., лаб.2.

## Пл.2

- 1 – летательный аппарат (ЛА)
- 2 – соединительный кабель (СК)
- 3 – подъемное устройство (лебедка)
- 4 – ветровая нагрузка на ЛА
- 5 – распределенная ветровая нагрузка на СК
- 6 – сосредоточенная ветровая нагрузка на СК

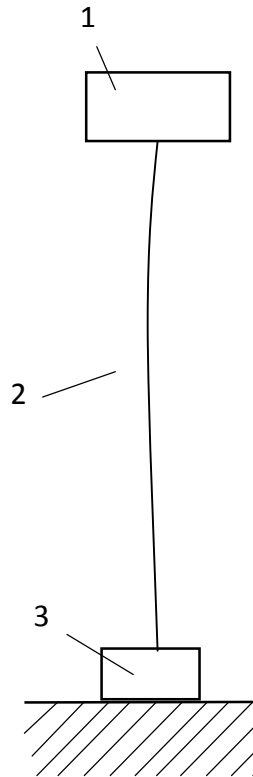


Рис. 1

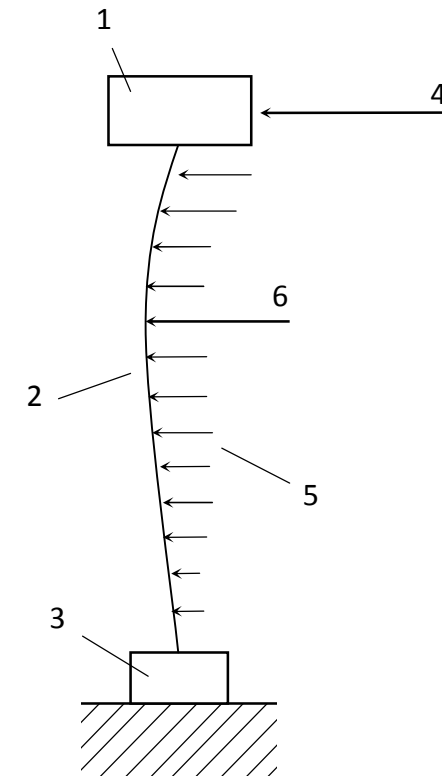


Рис. 2

ЛА – беспилотные летательные аппараты с вертикальными (и боковыми) винтами (коптеры), аэростаты, кайты (змеи).

СК - информационный канал, кабель для подачи электроэнергии к ЛА, тросовая тяга, молниеотводная система [1]

### Пл.3

При отсутствии ветровой нагрузки силовая схема системы показана на рис.3.

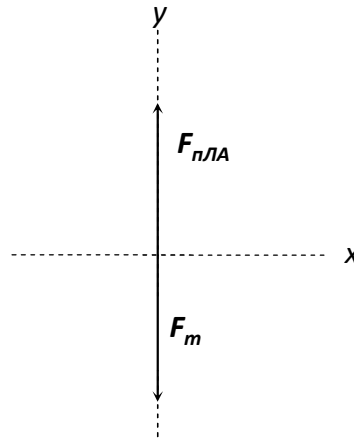


Рис.3

$F_{пла} = F_m$ , где  $F_{пла}$  – вектор подъемной силы ЛА,  $F_m$  – вектор веса

$$(1) \quad F_m = F_{мЛА} + F_{мСК}$$

где :  $F_{мЛА}$  – вектор веса ЛА,  $F_{мСК}$  – вектор веса СК.

## Пл.4

При наличии ветровой нагрузки на ЛА и СК ее надо рассматривать как нормальное давление, обусловленное общим сопротивлением ЛА и СК, и следует определять как сумму средней и пульсационной составляющей, причем для высоких сооружений пульсационную составляющую можно не учитывать [2].

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки (ССВН, в дальнейшем – ВН)  $w_m$  на высоте  $z$  над поверхностью земли следует определять по формуле (2):

$$(2) \quad w_m = w_0 k c_c$$

где:  $w_0$  – нормативное значение ветрового давления;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий ветровое давление по высоте;  
 $c_c$  – суммарный аэродинамический коэффициент ЛА и СК.

Нормативное значение ветрового давления следует принимать в зависимости от ветрового района по карте ветровых нагрузок с учетом таблицы 1 [2] (см. рис.4) (существует мировая карта ветровых нагрузок).

Таблица 1

Ветровые районы	1а	1	2	3	4	5	6	7
$w_0$ , кПа	0,24	0,32	0,42	0,53	0,67	0,84	1,00	1,20

2. Строительные нормы и правила нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85\*. Министерство строительства Российской Федерации. Разработаны ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР.

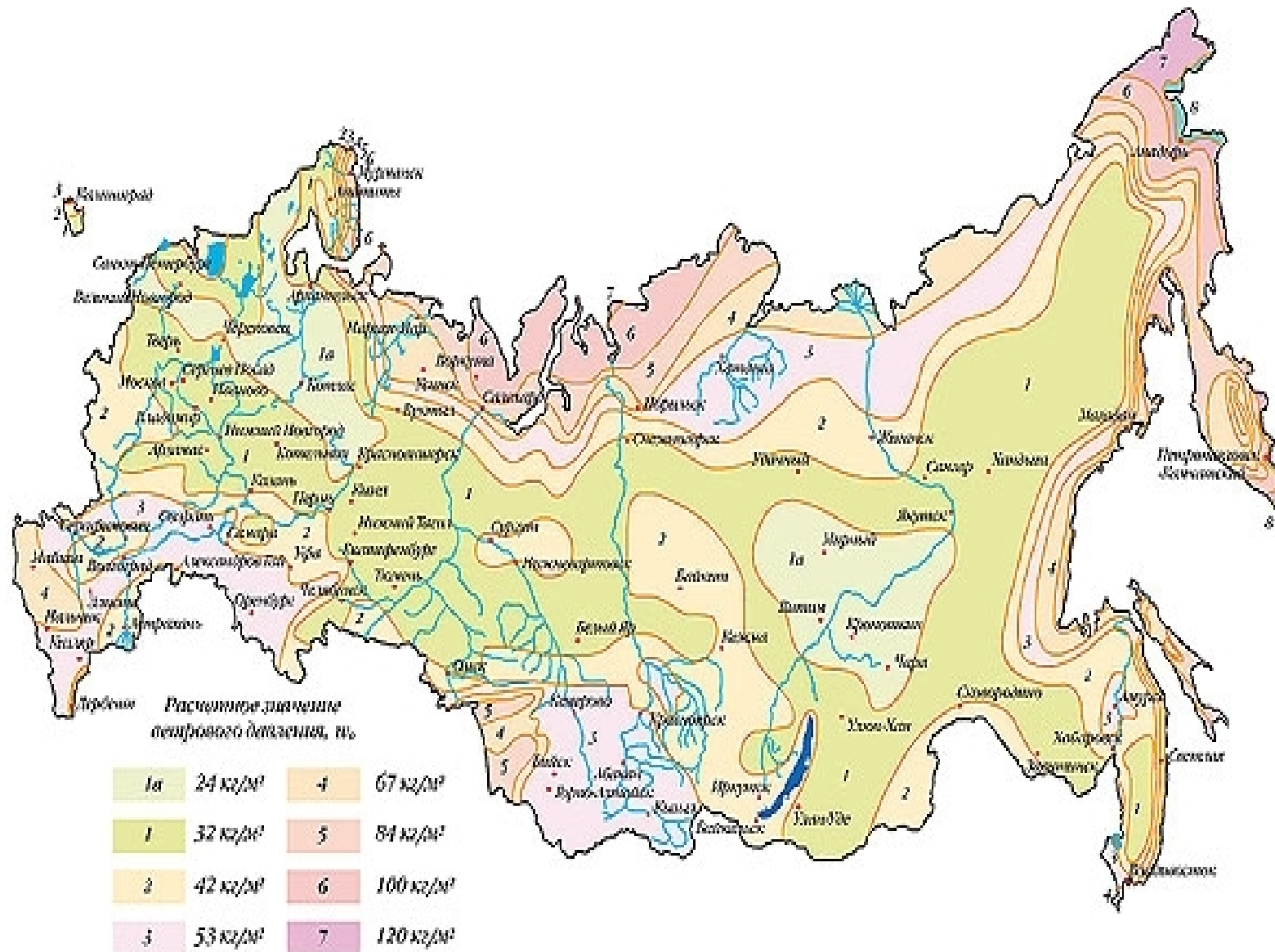


Рис.4

**Пл.6**

Таблица 2.  
Значения коэффициента  $k$ :

Высота $z$ , м	A	B	C
$\leq 5$	0,75	0,5	0,4
10	1,0	0,65	0,4
20	1,25	0,85	0,55
40	1,5	1,1	0,8
60	1,7	1,3	1,0
80	1,85	1,45	1,15
100	2,0	1,6	1,25
150	2,25	1,9	1,55
200	2,45	2,1	1,8
250	2,65	2,3	2,0
300	2,75	2,5	2,2
350	2,75	2,75	2,35
> 480	2,75	2,75	2,75

Коэффициент  $k$ , учитывающий изменение ветрового давления по высоте  $z$ , что необходимо для учета распределенной ветровой нагрузки на СК, определяется по таблице 2 в зависимости от типа местности:

A – открытые побережья морей, озер, водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра;

B – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой, местами более 10 м;

C – городские районы застройки зданиями высотой более 25 м.

Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии  $30z$  – при высоте сооружения  $z$  до 60 м и 2 км – при большей высоте [2].

## Пл.7

Таблицу 2 можно описать полиномами  $k_n$  с точностью нескольких процентов:

(3) Для А –  $k_{пА} = 0,000000124 * z^3 - 0,0000784 * z^2 + 0,019z + 0,795$

(4) Для В –  $k_{пВ} = 0,000000103 * z^3 - 0,0000647 * z^2 + 0,0169z + 0,483$

(5) Для С –  $k_{пС} = 0,0000000623 * z^3 - 0,0000419 * z^2 + 0,0133z + 0,311$

Сила ВН, действующая на ЛА:

(6)  $F_{вЛА} = w_m * S_{ЛА}$

где:  $w_m$  - нормативное значение ВН;

$S_{ЛА}$  - площадь ЛА, которой соответствует  $c_{ЛА}$ .

В свою очередь:

(7)  $w_m = w_0 * k_n * c_{ЛА}$

(8) где:  $w_0 = \rho * V_c / 2$  - но  $w_0$  берется из таблицы 1.

Здесь:  $\rho$  - плотность воздуха, зависящая от температуры и влажности;

$V_c$  - средняя составляющая скорости ветра;

$c_{ЛА}$  - переменный аэродинамический коэффициент, включающий лобовое сопротивление, коэффициенты трения ЛА о воздух, зависящий от конструкции и наклона ЛА по отношению к потоку воздуха, причем наклон ЛА может сопровождаться возникновением моментов на ЛА.

Теоретическая оценка  $c_{ЛА}$  может дать существенную ошибку, поэтому желательно определять его экспериментально с помощью аэродинамической трубы на натурном образце или с помощью адекватной модели.

В процессе воздействия ВН на ЛА необходимо учитывать, что  $c_{ЛА}$  состоит из компонентов по осям  $x$  и  $y$  -  $c_{xЛА}$  (коэффициент по скорости) и  $c_{yЛА}$  (коэффициент подъемной силы), зависящие от угла  $C$  наклона ЛА [3], откуда:

ВН по скорости на ЛА:

(9)  $F_{вЛАx} = w_0 * k_n * c_{xЛА}(C) * S_{ЛА}$  ;

ВН подъемной силы на ЛА:

(10);  $F_{вЛАy} = w_0 * k_n * c_{yЛА}(C) * S_{ЛА}$

При оценке воздействия ВН на СК необходимо учитывать изменение скорости ветра по местности и по высоте, используя данные таблиц 1 и 2.

## Пл.8

Сосредоточенная сила ВН  $F_{всСК}$ , действующая на СК:

$$(11) \quad F_{всСК} = w_{мСК} * S_{СК} ;$$

$$(12) \quad \text{где: } S_{СК} = L_{СК} * D_{СК} \quad - \text{общая площадь СК.}$$

Здесь:  $L_{СК}$  – длина СК,  $D_{СК}$  – диаметр СК.

(13)

$$w_{мСК} = w_0 * c_{СК} * k_n(L_{СК})$$

где: при положении СК, близкому к вертикальному  $c_{СК} = 1,2$  [2], в полиноме  $k_n$   $z = L_{СК}$ , а полином  $k_n$  выбирается по указанным типам местности.

Статистически принимается, что сосредоточенная сила  $F_{всСК}$  расположена на расстоянии  $L_{СК} = 1/3$  от верхнего крепления СК [2].

Поскольку СК – гибкий элемент и его крепление к ЛА можно рассматривать как шарнир, момент, создаваемый

$F_{всСК}$ , на ЛА не передается, и реакция  $F_{всСК}$  на ЛА выражается только в натяжении СК.

Для оценочного расчета учитывая только ВН можно принять, что сила  $F_{всСК}$  образует условную геометрическую систему, показанную на рис.5, где  $F_{внСК}$  – верхняя сила натяжения СК и  $F_{ннСК}$  – нижняя сила натяжения СК.



## Пл.9

Решая силовую систему на рис.5:

$$(14) \quad \sum x = 0; \quad F_{\text{всСК}} - F_{\text{ннСК}} * \sin A - F_{\text{внСК}} * \sin B = 0$$

$$(15) \quad \sum y = 0; \quad F_{\text{ннСК}} * \cos A - F_{\text{внСК}} * \cos B = 0$$

$$(16) \quad F_{\text{ннСК}} = F_{\text{внСК}} * \frac{\cos B}{\cos A}$$

Здесь:  $A$  – нижний угол силовой системы (у земли),  $B$  – верхний угол (у ЛА).

Подставляя значение  $F_{\text{ннСК}}$  из (14) в (12):

$$(17) \quad F_{\text{всСК}} = F_{\text{внСК}} (\cos B * \tan A + \sin B)$$

Рассматривая общий треугольник схемы на рис.5 :

$$(18) \quad F_{\text{всСК}} = \frac{1}{3} L * \tan B$$

$$(19) \quad F_{\text{всСК}} = \frac{2}{3} L * \tan A$$

$$(20) \quad \tan A = 0,5 \tan B$$

Подставляя (18) в (15) получаем взаимосвязь верхней силы натяжения СК  $F_{\text{внСК}}$  и угла  $B$ :

$$(21) \quad F_{\text{внСК}} = F_{\text{всСК}} \frac{0,667}{\sin B}$$

В соответствии со схемой на рис.5 ввиду плавного изгиба СК угол  $B$  несколько больше рассчитанного, но учитывая вес СК кривая изгиба располагается максимум отклонения ниже и угол  $B$  становится меньше, так что для точного определения значения угла  $B$  необходимо учитывать распределенную ВН и распределенную нагрузку веса СК.

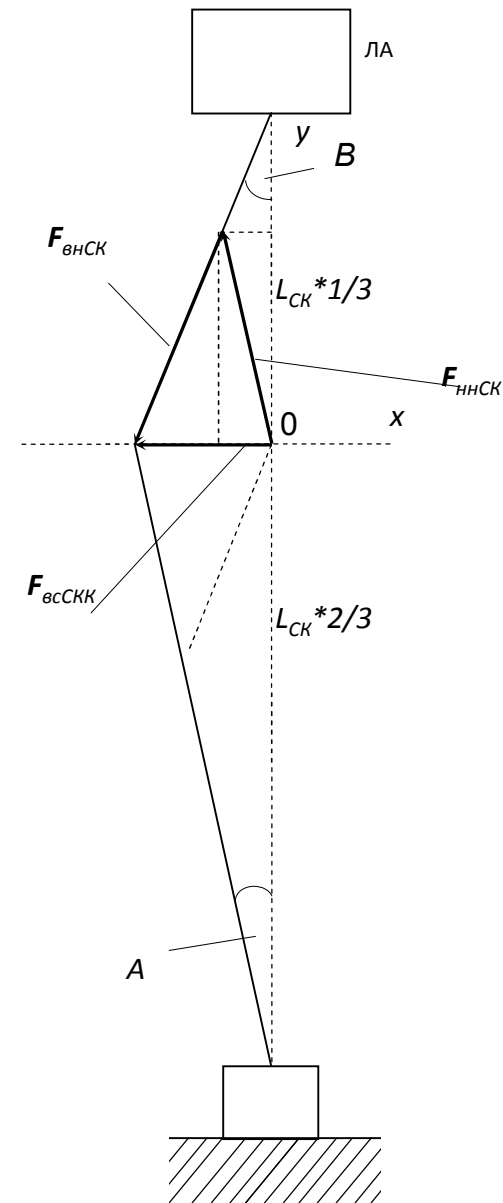


Рис.5

## Пл.10

Независимо от величины угла  $B$ , при  $B \rightarrow 0$  при увеличении вектора подъемной силы ЛА  $F_{\text{пЛА}}$ , вектор  $F_{\text{внСК}} \rightarrow \infty$ , но при любой величине  $F_{\text{пЛА}}$  не должен превышать разрывного усилия СК  $F_{\text{ртСК}}$ :

$$(22) \quad F_{\text{ртСК}} > k_{\text{зтСК}} * F_{\text{нСК}}$$

где:  $k_{\text{зтСК}}$  – коэффициент запаса разрывного усилия СК (можно принять  $k_{\text{зтСК}} = 1,1$  [2]); сила натяжения СК;  
 $F_{\text{тСК}}$  – сила тяжести СК в точке крепления СК к ЛА.

$$F_{\text{тСК}} = L * P_{\text{мСК}};$$

где:  $P_{\text{мСК}}$  – вес погонного метра СК.

## Пл.11

Для решения статической силовой системы применительно к многовинтовому коптеру, включающей ЛА и СК, рассмотрим силовую схему на рис.6.

Для сопротивления ВН при сохранении геостационарности коптер должен наклониться навстречу ВН под углом  $C$ , если у винтов отсутствуют автоматы перекоса (в этом случае передающая антенна радиоэлектронного устройства должна быть снабжена гироскопической следящей системой). При наклоне ЛА моменты от винтов уравновешены, и подъемную силу винтов можно свести к одному вектору  $F_{\text{пЛА}}$ . Для оценочного расчета моменты, создаваемые  $F_{\text{вЛА}}$  не учитываются.

$$(23) \quad \sum x = 0; \quad F_{\text{пЛА}x} * \sin C - F_{\text{вЛА}} - F_{\text{НСК}} * \sin B = 0$$

где:  $F_{\text{НСК}} = F_{\text{НвСК}} + F_{\text{ТСК}}$

Компонента подъемной силы по x:

$$(24) \quad F_{\text{пЛА}x} = (F_{\text{вЛА}x} + F_{\text{НСК}} * \sin B) / \sin C;$$

$$(25) \quad \sum y = 0; \quad F_{\text{пЛА}y} * \cos C - F_{\text{ТЛА}} - F_{\text{НСК}} * \cos B = 0$$

Компонента подъемной силы по y:

$$(26) \quad F_{\text{пЛА}y} = (F_{\text{вЛА}y} + F_{\text{ТЛА}} + F_{\text{НСК}} * \cos B) / \cos C;$$

Полная подъемная сила:

$$(27) \quad F_{\text{пЛА}} = \sqrt{F_{\text{пЛА}x}^2 + F_{\text{пЛА}y}^2}$$

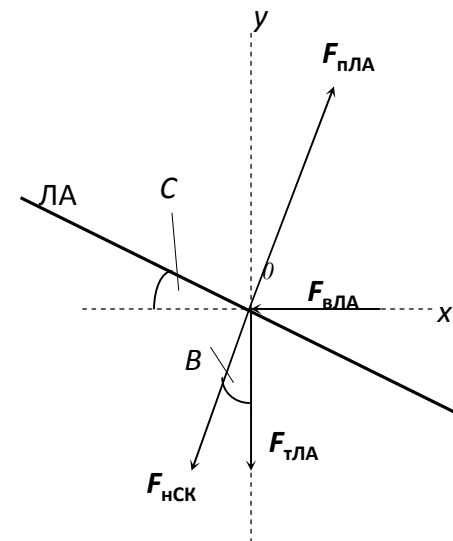


Рис.6

## Пл.12

По уравнениям (24) и (26) можно провести оценочный расчет статической силовой системы многовинтового коптера при ветровой нагрузке. Поскольку заранее неизвестны величины углов  $B$  и  $C$ , зависящих от возможной величины  $c_{xЛА}(C)$  а также величин  $k_{пв}$  и  $k_{пб}$ , которые не удалось получить, включая основного производителя коптеров фирмы DJI, возможно построить оценочные номограммы с приданием неизвестным величинам диапазонов реальных значений.

Оценочные расчетные уравнения можно вычислить по следующим выражениям:

Компонента подъемной силы по  $x$ :

$$(28) F_{пЛА,x} = [w_0 * k_{пв} * c_{xЛА}(C) * S_{ЛА} + 0,667 * w_0 * c_{СК} * k_{пв}(L_{СК}) * L_{СК} * D_{СК} + L_{СК} * P_{мСК} * \sin B] / \sin C$$

Компонента подъемной силы по  $y$ :

$$(29) F_{пЛА,y} = [w_0 * k_{пв} * c_{yЛА}(C) * S_{ЛА} + F_{тЛА} + 0,667 * w_0 * c_{СК} * k_{пв}(L_{СК}) * L_{СК} * D_{СК} * \cot B + L_{СК} * P_{мСК} * \cos B] / \cos C$$

На рис.7, полученном в пакете MatLab, приведены графики со следующими значениями составляющих, ориентировочно соответствующих 8-ми роторному коптеру DJI

Сам коптер представляется моделью в виде круглого диска с вертикальной осью диаметром 1м и толщиной 0,1м. Весовая нагрузка на коптер  $F_{тЛА} = 200Н$

Поскольку на территории России основными ветровыми районами являются зоны 1а, 1 и 2, принимаю  $w_{02}=420Па$  и среднее значение  $k_B$  характеристики поверхности категории В.

$$B=30\text{град}; C=5\div 30\text{град}; c_{xЛА}(C) = 1,5 * \frac{30}{90} + 0,5; c_{yЛА}(C) = 1,5 * 30/90$$

При положении СК, близкому к вертикальному –  $c_{СК} \approx 1,2$ ;  $k_{пв} = 1,6$ ;  $S_{ЛА} = 0,1м^2$ ;  $D_{СК} = 0,006м$ ;  $P_{мСК} = 0,4Н$ ;

Поскольку величина  $k$  меняется по высоте, а равнодействующая ветровой нагрузки на СК находится на высоте 0,667 от поверхности,  $k_{пв}$  приблизительно определяется по полиному  $B$  на высоте 66,7 (67)м –  $k_{пв}(67) = 1,35$  при  $L=100м$ .

# Пл.13

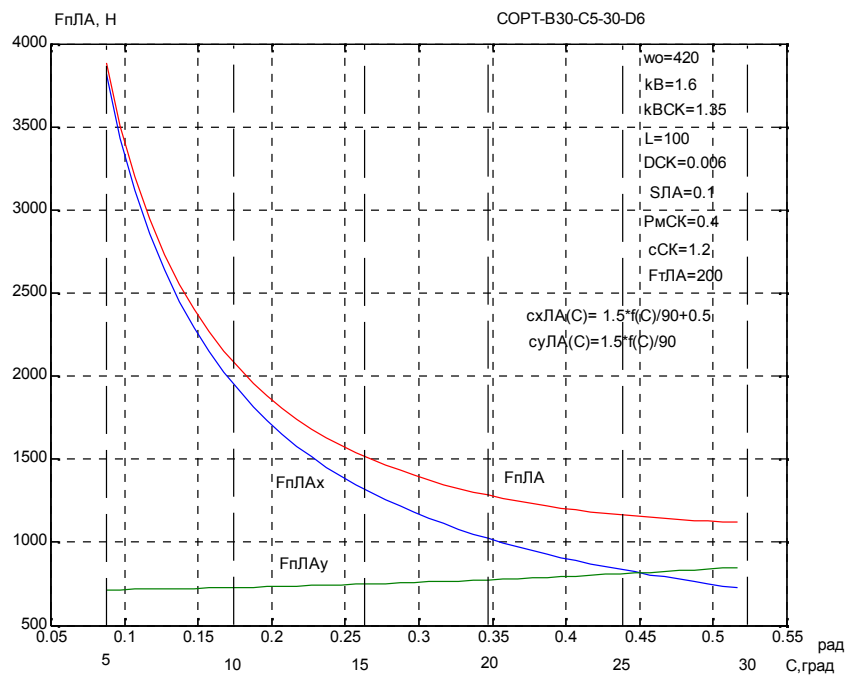


Рис.7

На графиках видно соответствие величин  $F_{пЛАx}$ ,  $F_{пЛАy}$ ,  $F_{пЛА}$  при изменении угла  $C$  от 5 до 30 градусов, причем при  $C \rightarrow 0$   $F_{пЛА} \rightarrow \infty$ , а при  $C \rightarrow 30$   $F_{пЛА}$  стремиться к оптимальному значению. При  $C=30$ град  $F_{пЛА}=1200$ Н, так что с учетом к.п.д. винтов коптера необходимая электрическая мощность, подаваемая к коптеру, может достигать значительных величин. При увеличении рабочей высоты  $z$  коптера ветровая нагрузка существенно увеличивается (см. таблицу 2), что требует увеличения  $F_{пЛА}$ .

## Пл.14

Другим существенным фактором, влияющим на  $F_{\text{ПЛА}}$ , является угол  $B$  между соединительным кабелем и вертикалью при наличии ВН. На рис.8 показан график  $F_{\text{ПСК}}=f(B)$  при исключении ВН на ЛА и  $F_{\text{ТЛА}}$ . На графике видно, что при уменьшении угла отклонения  $B$  СК сила натяжения по  $u$  достигает относительного оптимума при угле  $B=40$ град, а при  $B \rightarrow 0$   $F_{\text{ПСК}} \rightarrow \infty$ . Таким образом, при увеличении ВН плоскость коптера должна все больше наклоняться навстречу ВН, а СК, отклоняясь, одновременно уменьшает нагрузку на коптер и уменьшает общую высоту коптера.

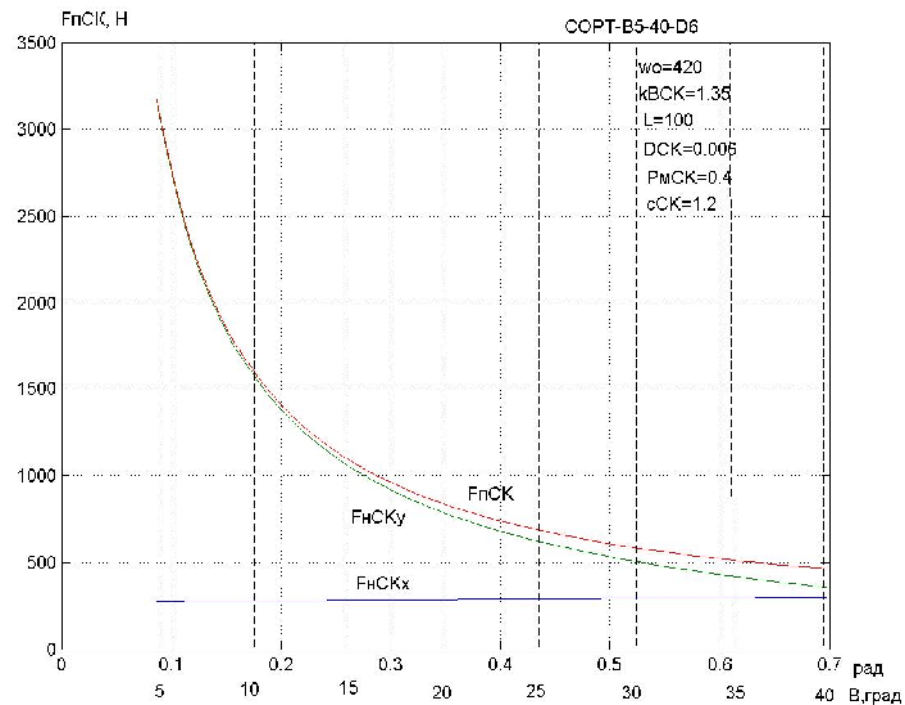


Рис.8

## Пл.15

Существует возможность увеличения подъемной силы ЛА по мере увеличения ветровой нагрузки с помощью аэродинамических характеристик ЛА. Так, уже применяется устройство, представляющее собой симбиоз кайта и гелиевого баллона – Хеликайт. На рис.9 показан Хеликайт с двузвенным кайтом и гелиевым баллоном, расположенным непосредственно на кайте, используемый фирмой Bird Control Systems [5]. Аналогичное устройство, «Колибри», разработано и в ОСКБЭС МАИ, которое показано на рис.10.

Основной недостаток таких устройств заключается в том, что хотя кайт создает дополнительную подъемную силу, ветровая нагрузка на гелиевый баллон и соединительный кабель вызывает большое отклонение по ветру, причем хеликайт всегда должен быть расположен навстречу ветру, что создает дополнительные неудобства для работы радиоаппаратуры



Рис.9



Рис.10

## Пл.15

Возможно использовать свойство конструкции в виде плоско-выпуклого диска наподобие сегмента шара с плоскостью внизу, у которого за счет разности скоростей при обтекании диска при ветровой нагрузке создается подъемная сила. Известны аналогичные аэродинамические профили [6], например, профиль 35А, имеющий  $c_y=0,42$ , а  $c_x=0,03$ . В работе [7] (стр.59) приводятся экспериментальные данные по величине  $c_y$  для профиля такого типа, которая при разных числах  $Re$  может достигать  $c_y=0,55$  (см. рис.11). Взяв за основу сегмент шара можно оценить характеристики соотношения подъемной силы и ветровой нагрузки.

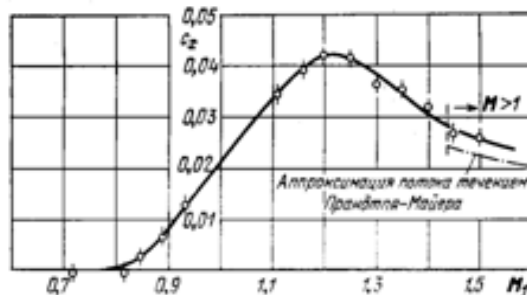


Рис. 10.37. Зависимость коэффициента сопротивления от числа  $M_1$  для чечевицеобразного сверхзвукового профиля ( $\bar{z} = 8,8\%$ ) на нулевом угле атаки

Некоторое уменьшение расчетной величины  $c_x$  по сравнению с его опытным значением связано с неучитываемым в расчете сопротивлением трения.

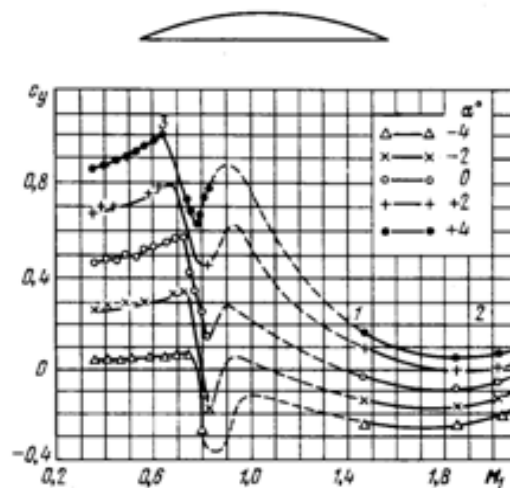


Рис. 10.38. Экспериментальные зависимости коэффициента подъемной силы плоско-выпуклого профиля с относительной толщиной  $\bar{z} = 10\%$  от числа Маха при различных углах атаки



## Пл.16

- Предположим, что для сегмента шара  $c_y=0,35$ , что соответствует высоте сегмента  $h_c=0,20\div 0,30r_c$ , где  $r_c$  – радиус сечения сектора. При этом лобовое сопротивление может не превышать  $c_x=0,03$ . Тогда подъемная сила от наличия аэродинамического крыла:
- (30)  $F_{\pi} = c_y * S_{кр} * \rho * V^2 / 2$
- где характерная площадь крыла:  $S_{кр} = 2r_c^2$ .
- или подъемная сила выбранного объекта, соответствующая типу местности и высоте ЛА :
- (31)  $F_{\pi ЛА} = 2w_0 * k_{\pi} * c_{y ЛА} * r_c^2$ .
- Так при высоте ЛА 100м, при ветровой зоне 2 ( $w_{02}=420\text{Па}$ ) и характеристики территории В ( $k_B=1,6$ ) при  $r_c=0,5\div 1,5$  м имеем следующее соотношение (рис.12):

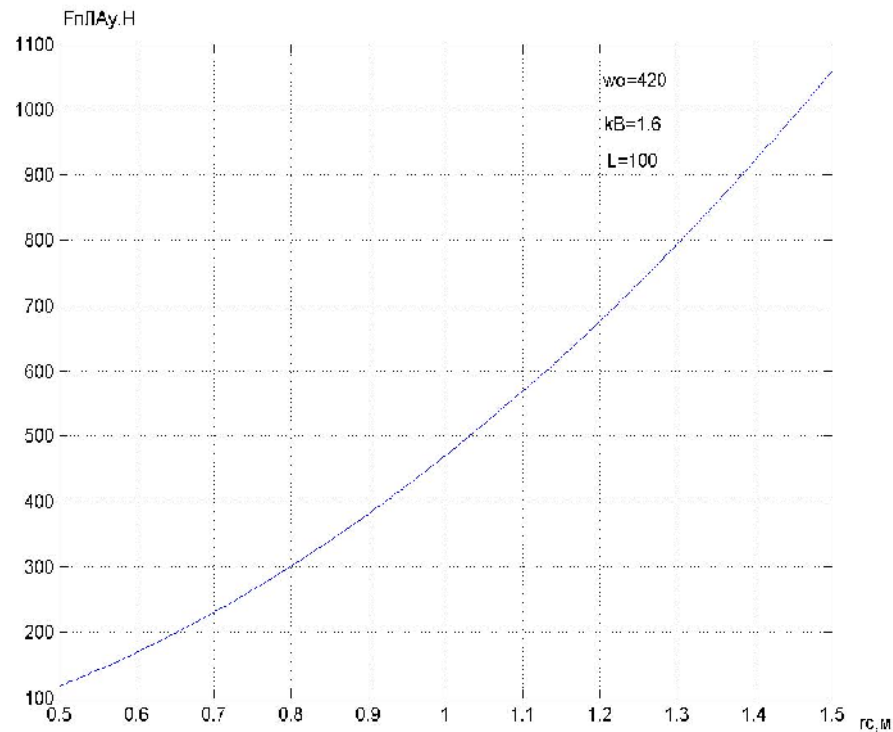


Рис.12

## Пл.16

- 1 – дискообразная конструкция с плоской нижней и выпуклой верхней частью
- 2 – винты коптера,
- 3 – автоматы перекоса,
- 4 – агрегаты и системы коптера, элементы системы телекоммутационной платформы,
- 5 – воздушные мешки с воздушным насосом и автоматом перепада давления (последние на чертеже не показаны),
- 6 – соединительный кабель,
- 7 – подъемное устройство,
- 8 – поверхность расположения привязного коптера,
- 9 – ветровая нагрузка.

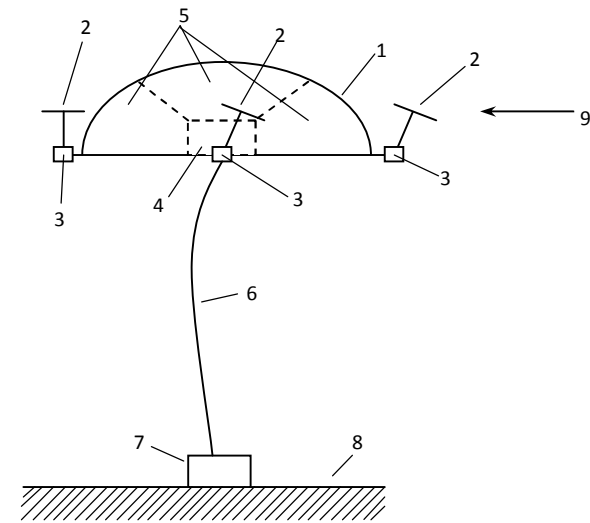


Рис.13

### Литература

1. Вишневецкий В.М., Терещенко Б.Н., Шабает В.И. Способ формирования беспроводных сетей передачи информации и высотная винтокрылая платформа для его реализации. RU №2319319 С1, 10.03.2008.
2. Строительные нормы и правила нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85\*. Министерство строительства Российской Федерации. Разработаны ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР.
3. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика. М.: Высшая школа, 1970, с.424.
4. Машиностроение. Энциклопедический справочник. М.: ГНТИМЛ, 1947, т.1, кн.1, с.427.
5. Kite stability and weight. Patent US 6 016 998, 25.01.2000.
6. Авиационные профили. [Kipla.kai.ru/liter/Spravochnik-avia-profiley.pdf](http://Kipla.kai.ru/liter/Spravochnik-avia-profiley.pdf)
7. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. [Nato2015.narod.ru/sol/3/42.html](http://Nato2015.narod.ru/sol/3/42.html)