

УДК 629.735.33:533.662.6

Влияние близости земли на аэродинамические характеристики летательного аппарата с несущей системой "винт в кольце"

В. И. Шайдаков

Аннотация

В статье дается метод расчета подъемной силы (тяги) дистанционно пилотируемого летательного аппарата (ДПЛА), испытывающего влияние экранного эффекта земли. Исследовано соотношение составляющих суммарной тяги (кольца, винта, днища) при различных расстояниях от земли.

Ключевые слова:

дистанционно-пилотируемый летательный аппарат, винт в кольце, влияние близости земли, аэродинамические характеристики.

Введение

В работах [1, 2] представлены материалы по экспериментальным исследованиям ДПЛА с системой "винт в кольце", являющимся аналогом экспериментального аппарата фирмы Сикорского США "Cyrpher". В рамках данной работы проведены теоретические и расчетные исследования аэродинамических характеристик аппарата этого типа.

Принятая в схеме ДПЛА конфигурация внутреннего канала включает в себя коллектор и диффузор, состоящий из цилиндрической и конической части. Конический диффузор с большим углом раствора (120°) на режимах работы вблизи земли при малых зазорах h между экраном (землей) и срезом выходного сечения диффузора позволяет рассматривать несущую систему как аппарат на воздушной подушке камерного типа. Известно, что подъемная эффективность такой системы проявляет себя при весьма малых расстояниях до земли. Однако с увеличением малого расстояния схема течения кардинально меняется. В зоне конической части диффузора образуется кольцевой вихрь, что приводит к

снижению давления и появлению отрицательной тяги, действующей на корпус аппарата. Схема течения для данного случая показана на левой половине рисунка 1.

Для устранения этого явления целесообразно организовать выходной канал из корпуса аппарата в виде кольцевого сопла (рис. 1, правая половина). В этом случае, вблизи земли, несущая способность аппарата увеличивается вследствие повышенного давления, действующего на днище. Такой тип аппарата на воздушной подушке с кольцевыми струями рассматривал В.И.Ханжонков [3]. Здесь используется предложенная им схема расчета и приведены рабочие формулы аэродинамических характеристик, полученные для исследуемого ДПЛА.

1. Расчетная схема несущей системы «вент в кольцо», работающей вблизи земли

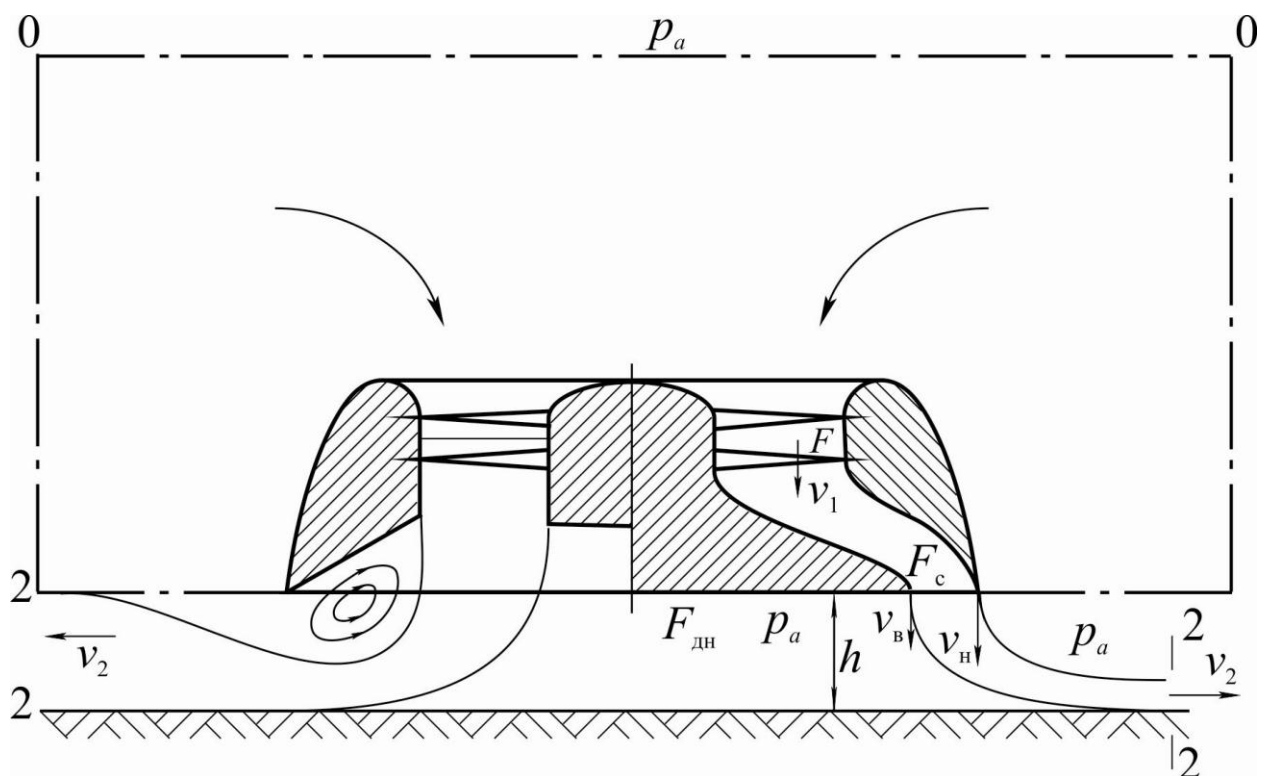


Рис. 1. Расчетная схема несущей системы «вент в кольцо» вблизи экрана

На правой половине рисунка 1 изображена расчетная схема рассматриваемой несущей системы, в которой приняты следующие условные обозначения:

h и $\bar{h} = \frac{h}{R}$ - абсолютное и относительное расстояние днища аппарата от земли;

$p_{в}$ - давление со стороны внутренней части истекающей струи (под днищем аппарата);

$p_{н} = p_a$ - наружное давление в истекающей струе, равное атмосферному давлению;

$F_{дн}$ - площадь днища аппарата, испытывающая действие воздушной подушки;

v_2 - средняя скорость течения в истекающей струе, стелющейся по земле;

v_B, v_H – внутренняя и наружная скорости истечения струи на срезе сопла.

В рассматриваемой схеме течения приняты следующие допущения:

1. Скорости в плоскости диска винта (v_1) и по сечению уходящей струи (v_2) постоянны.
2. Течение в свободной струе соответствует модели идеальной несжимаемой сплошной среды.
3. Течение в канале происходит с гидравлическими потерями.
4. Выполняется условие неразрывности течения.

2. Подъемная сила системы в условиях работы вблизи земли

Для определения суммарной подъемной силы, действующей на аппарат, применим к системе теорему импульсов. На рис.1 пунктирной линией обозначена контрольная поверхность, проходящая по нижней поверхности корпуса аппарата (днищу), а боковая и верхняя поверхности выбраны на большом удалении от корпуса, где давления равны атмосферному, а скорости течения отсутствуют. Уравнение импульсов для принятой контрольной поверхности запишется в следующем виде (рис.1, 2):

$$T = \rho \int v_x^2 dF_c + \int (p_x - p_a) dF_c + (p_B - p_a) F_{\text{дн}}. \quad (1)$$

Первый член уравнения представляет собой количество движения истекающей струи, второй – интеграл давлений по срезу сопла, третий – интеграл давлений по днищу аппарата.

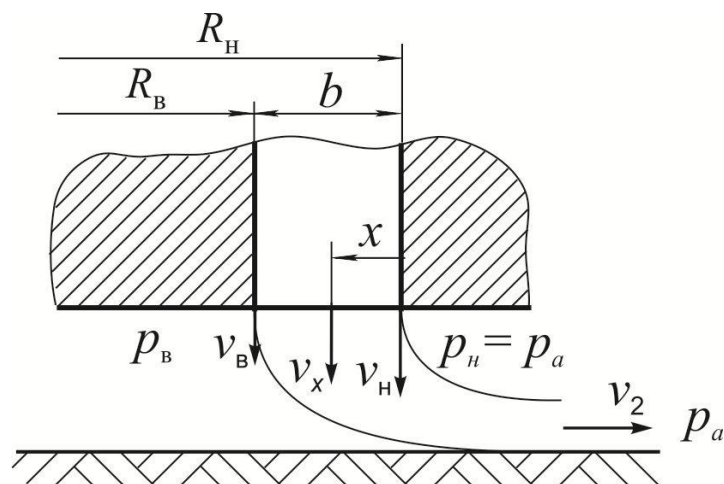


Рис.2. Схема течения в кольцевой струе в условиях близости земли

Следуя В.И. Ханжонкову [3, стр. 93, формула (50)], примем экспоненциальный закон скоростей на срезе сопла (рис. 2)*

*) В более строгой постановке этот закон требует введения константы в степени экспоненты, величина которой может быть найдена путем вихревого моделирования истечения на экран воздуха из кольцевого сопла.

$$\frac{v_x}{v_H} = e^{-\frac{x}{h}} = e^{-\frac{\bar{x}}{\bar{h}}}, \text{ где } \bar{x} = \frac{x}{R_H}, \bar{h} = \frac{h}{R_H}. \quad (2)$$

Отсюда следует отношение скоростей на внутренней и наружной кромках сопла

$$\frac{v_B}{v_H} = e^{-\frac{b}{h}} = e^{-\frac{\bar{b}}{\bar{h}}}, \text{ где } b = R_H - R_B, \bar{b} = 1 - \bar{R}_B, \bar{b} = \frac{b}{R_H}, \bar{R}_B = \frac{R_B}{R_H}. \quad (3)$$

Будем полагать, что в свободной струе и на срезе сопла течение потенциальное. Запишем уравнение Бернулли для наружной струйки и струйки, текущей на расстоянии x от наружной кромки сопла

$$p_a + \frac{\rho v_H^2}{2} = p_x + \frac{\rho v_x^2}{2},$$

откуда

$$p_x - p_a = \frac{\rho v_H^2}{2} - \frac{\rho v_x^2}{2} = \frac{\rho v_H^2}{2} \left(1 - \frac{v_x^2}{v_H^2} \right). \quad (4)$$

Отсюда избыточное давление на внутренней кромке сопла и под днищем будет

$$p_B - p_a = \frac{\rho v_H^2}{2} \left(1 - \frac{v_B^2}{v_H^2} \right). \quad (5)$$

Запишем теперь уравнение Бернулли для наружной струйки для двух сечений: на срезе сопла и в уходящей струе, где давление атмосферное, а скорость v_2 по сечению струи – постоянна.

$$p_H + \frac{\rho v_H^2}{2} = p_a + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

Учитывая, что $p_H = p_a$, находим

$$v_H = v_2. \quad (6)$$

Подставим (4) и (5) в (1) и после преобразований получим

$$T = \frac{\rho v_H^2}{2} \left[\int \left(1 + \frac{v_x^2}{v_H^2} \right) dF_c + \left(1 - \frac{v_B^2}{v_H^2} \right) F_{дн} \right]. \quad (7)$$

Подставим (2), (3), (6) в (7). Тогда получим

$$T = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[\int \left(1 + e^{-2\frac{x}{h}} \right) dF_c + \left(1 - e^{-2\frac{b}{h}} \right) F_{дн} \right]$$

или

$$T = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[\left(1 - e^{-2\frac{b}{h}} \right) F_{дн} + F_c + \int e^{-2\frac{x}{h}} dF_c \right] \quad (8)$$

Получим теперь выражения для входящих в (8) площадей:

$$dF_c = 2\pi(R_H - x)dx, \quad F_c = \pi R_H^2 - \pi R_B^2,$$

и перейдем к относительным величинам

$$dF_c = 2\pi R_H^2(1 - \bar{x})d\bar{x}, \quad F_c = \pi R_H^2(1 - \bar{R}_B^2),$$

$$\bar{R}_B = 1 - \bar{b}, \quad \bar{R}_B^2 = (1 - \bar{b})^2, \quad 1 - \bar{R}_B^2 = \bar{b}(2 - \bar{b}),$$

$$dF_c = F_c \frac{2}{1 - \bar{R}_B^2}(1 - \bar{x})d\bar{x} = F_c \frac{2}{\bar{b}(2 - \bar{b})}(1 - \bar{x})d\bar{x}. \quad (9)$$

Вычислим теперь входящий в (8) интеграл

$$J_1 = \int e^{-2\frac{x}{h}} dF_c = \frac{2F_c}{\bar{b}(2 - \bar{b})} \int_0^{\bar{b}} e^{-2\frac{\bar{x}}{h}} (1 - \bar{x})d\bar{x}.$$

Выполнив интегрирование по частям, получим

$$J_1 = F_c \frac{\bar{h}}{\bar{b}(2 - \bar{b})} \left[\left(1 - \frac{\bar{h}}{2}\right) \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{h}}\right) + \bar{b} e^{-2\frac{\bar{b}}{h}} \right]. \quad (10)$$

Подставим (10) в (8) и получим выражение для тяги системы «винт в кольце» в зависимости от относительного расстояния до земли

$$T = \frac{\rho v_2^2}{2} \left\{ \left[1 + \frac{\bar{h}}{\bar{b}(2 - \bar{b})} \left(\bar{b} e^{-2\frac{\bar{b}}{h}} - \left(\frac{\bar{h}}{2} - 1\right) \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{h}}\right) \right) \right] F_c + \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{h}}\right) F_{\text{дн}} \right\}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в фигурных скобках соответствует реактивной тяге сопла (T_p), второе – статической подъемной силе от воздушной подушки под днищем аппарата ($T_{\text{дн}}$). Следовательно,

$$T_p = \frac{\rho v_2^2}{2} F_c \left[1 + \frac{\bar{h}}{\bar{b}(2 - \bar{b})} \left(\bar{b} e^{-2\frac{\bar{b}}{h}} - \left(\frac{\bar{h}}{2} - 1\right) \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{h}}\right) \right) \right], \quad (12)$$

$$T_{\text{дн}} = \frac{\rho v_2^2}{2} F_{\text{дн}} \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{h}}\right) \quad (13)$$

Реактивная тяга сопла представляется в виде распределенных давлений на коллекторе и канале, которое реализуется как тяга кольца T_k , и в тяге винта T_B

$$T_p = T_k + T_B. \quad (14)$$

Относительная подъемная сила днища, вычисленная в долях от суммарной тяги несущей системы, будет

$$\bar{T}_{\text{дн}} = \frac{T_{\text{дн}}}{T} = \frac{T_{\text{дн}}}{T_{\text{p}} + T_{\text{дн}}} = \frac{1}{\left(T_{\text{p}}/T_{\text{дн}}\right) + 1}, \quad (15)$$

где

$$\frac{T_{\text{p}}}{T_{\text{дн}}} = \frac{F_{\text{c}}}{F_{\text{дн}}} \frac{1 + \frac{\bar{h}}{\bar{b}(2-\bar{b})} \left(\bar{b} e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} - \left(\frac{\bar{h}}{2} - 1 \right) \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} \right) \right)}{1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}}}. \quad (16)$$

Соответствующие доли тяги, приходящиеся на кольцо и винт, будут вычислены в следующем разделе.

Вычислим теперь среднюю скорость v_{cp} на срезе сопла

$$v_{\text{cp}} = \frac{1}{F_{\text{c}}} \int_{F_{\text{c}}} v_x dF_{\text{c}} = v_{\text{H}} \int_{F_{\text{c}}} \frac{v_x}{v_{\text{H}}} \frac{dF_{\text{c}}}{F_{\text{c}}}, \quad \text{где } v_{\text{H}} = v_2 - \text{см. (6)}$$

Учитывая (2), (6) и (9), получим

$$\frac{v_{\text{cp}}}{v_2} = \frac{2}{\bar{b}(2-\bar{b})} \int_0^{\bar{b}} (1-\bar{x}) e^{-\frac{\bar{x}}{\bar{h}}} d\bar{x} = \frac{2}{\bar{b}(2-\bar{b})} J_2, \quad J_2 = \int_0^{\bar{b}} (1-\bar{x}) e^{-\frac{\bar{x}}{\bar{h}}} d\bar{x}.$$

Выполнив интегрирование по частям, получим

$$\frac{v_{\text{cp}}}{v_2} = \frac{2\bar{h}}{\bar{b}(2-\bar{b})} \left[\bar{b} e^{-\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} - (\bar{h}-1) \left(1 - e^{-\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} \right) \right]. \quad (17)$$

Относительная ширина сопла \bar{b} может варьироваться в широких пределах: от малых значений до единицы, что соответствует прямому истечению из диффузора на экран.

При большом удалении от экрана ($h = \infty$) эффект его влияния исчезает и тогда тяга всей несущей системы в соответствии с уравнением импульсов будет

$$T_{\infty} = m v_{\text{cp}}, \quad (18)$$

где $m = \rho F_{\text{c}} v_{\text{cp}}$ - секундный массовый расход воздуха на срезе сопла.

В соответствии с уравнением расходов $m = \text{const}$ по сечениям истекающей струи и тогда

$$m = \rho F_{\text{c}} v_{\text{cp}} = \rho F v_1 = \rho F_2 v_2. \quad (19)$$

Перепишем выражение (11) для тяги системы T_h в форме (18), оценивая экранный эффект с помощью специального коэффициента $K_{\text{э}} = T_h/T_{\infty}$,

$$T_h = mv_{cp}K_9 = \rho F_c v_{cp}^2 K_9. \quad (20)$$

Здесь для суммарной тяги системы в условиях близости земли введен индекс h .

Отсюда $K_9 = \frac{T_h}{\rho F_c v_{cp}^2}$. Подставляя сюда выражение для тяги (11), получаем

$$K_9 = \left(\frac{v_2}{v_{cp}} \right)^2 \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\bar{h}}{\bar{b}(2-\bar{b})} \left(\bar{b} e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} - \left(\frac{\bar{h}}{2} - 1 \right) \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} \right) \right) + \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} \right) \frac{F_{дн}}{F_c} \right] \quad (21)$$

Здесь $\frac{v_2}{v_{cp}} = \frac{1}{\frac{v_{cp}}{v_2}}$ берется из выражения (17).

Из экспериментов воздушных винтов известно, что эффект воздушной подушки при $\bar{h} = h/R \geq 3$ практически исчезает [4]. Для сопловых устройств это расстояние равно 1...2 калибрам ширины сопла b .

Следовательно, при $\bar{h} > (1...2)\bar{b}$ экраный эффект проявлять себя не будет. В этом случае скорость истечения становится постоянной по срезу сопла $v_n = v_b$ и, следовательно, избыточное давление под днищем отсутствует. Предельное расстояние, при котором исчезает эффект земной подушки, обозначим через $h_{пр}$. Будем вводить в расчет нормированную скорость. Тогда, учитывая формулу (2), получим

$$v_{h_{расч}} = \frac{v}{v_{h_{пр}}} = e^{-\bar{x} \left(\frac{1}{\bar{h}} - \frac{1}{\bar{h}_{пр}} \right)} = e^{-\frac{\bar{x}}{\bar{h}_{расч}}}.$$

Из соотношения $1/\bar{h}_{расч} = 1/\bar{h} - 1/\bar{h}_{пр}$ следует формула для расчетной высоты

$$\bar{h}_{расч} = \bar{h} k_h; \quad k_h = \frac{\bar{h}_{пр}}{\bar{h}_{пр} - \bar{h}}. \quad (22)$$

Таким образом, для введения указанной поправки необходимо во всех вышеприведенных формулах брать расчетную высоту по формуле (22).

Относительная подъемная сила днища может быть вычислена через коэффициент K_9 , если выражение (13) поделить на (20)

$$\bar{T}_{дн} = \frac{T_{дн}}{T_h} = \left(\frac{v_2}{v_{cp}} \right)^2 \frac{1}{2K_9} \left(1 - e^{-2\frac{\bar{b}}{\bar{h}}} \right) \frac{F_{дн}}{F_c}. \quad (23)$$

Зависимость относительной подъемной силы днища $\bar{T}_{дн} = f(\bar{h})$ представлена на рис. 4.

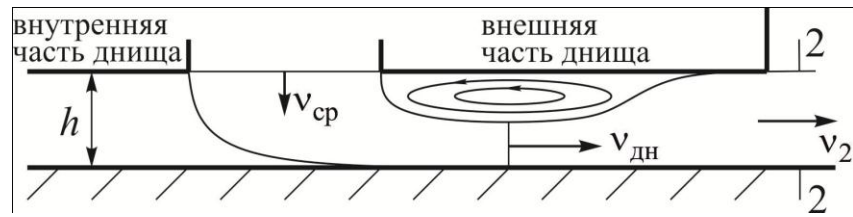


Рис. 3. Эффект "подсасывания" на внешней части диска при малых расстояниях h

Напомним, что найденные зависимости, определяющие эффект воздушной подушки, получены в предположении, что характер истекающей струи такой, каким он изображен на правой половине рис.1, когда на срезе сопла с внешней стороны струи будет острая кромка в сечении корпуса. В том случае, когда с внешней стороны истекающей струи днище аппарата имеет свое продолжение (рис.2, 3) характер течения при малых относительных расстояниях до экрана ($\bar{h} \ll \bar{b}$) резко меняется. Наружная часть днища аппарата начинает оказывать подсасывающее действие и струя прилипает к днищу. Тогда на выходе из под днища в сечении струи 2-2 давление равно атмосферному, а скорость и высота сечения струи равны v_2 и h . В наиболее узком сечении струи, под днищем, в соответствии с уравнением расходов, скорость $v_{дн}$ больше скорости v_2 . Записав уравнение Бернулли для указанных сечений струи, получаем

$$p_{дн} + \frac{\rho v_{дн}^2}{2} = p_a + \frac{\rho v_2^2}{2}; \quad \Delta p = p_{дн} - p_a = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_{дн}^2) < 0.$$

Таким образом, под днищем аппарата возникает разрежение и эффект «воздушной подушки» становится отрицательным. Эффект подсасывания усиливается вследствие неизбежного возникновения под днищем с внешней стороны струи области циркуляционных течений с пониженным давлением (рис. 3).

В этом случае для устранения отрицательных эффектов воздушной подушки необходимо увеличить расстояние между донной частью корпуса и землей, поэтому на ДПЛА, выполненном, в частности, по левой схеме (рис.1), должно быть достаточно высокое шасси.

3. Тяга и мощность подъемного винта вблизи земли

Очевидно, что вследствие торможения потока, натекающего на экран, несущая способность коллектора будет ухудшаться, следовательно, тяга кольца будет падать, а тяга винта увеличиваться.

Для оценки этих эффектов запишем уравнение Бернулли в расчетных сечениях струи 0-0 и 2-2 (рис.1). Гидравлические потери в рассматриваемой воздушной сети будем относить к скоростному напору потока, протекающего через диск винта. Вводимая в по-

ток энергия от винта учитывается как вентиляторный напор p , представляющий собой скачок давлений на диске винта

$$P_a = P_a + \frac{\rho v_2^2}{2} - p + \xi_{\text{вх}} \frac{\rho v_1^2}{2} + \xi_{\text{кан}} \frac{\rho v_1^2}{2}$$

Здесь $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент потерь на входе в канал; $\xi_{\text{кан}}$ – коэффициент потерь напора в канале.

Из уравнения следует формула для напора p

$$p = \frac{\rho v_2^2}{2} \left[1 + (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{кан}}) \frac{v_1^2}{v_2^2} \right], \quad (24)$$

Выражение (24) совпадает с формулой для случая висения аппарата вне экрана. Следовательно, и формула для вычисления силы тяги винта $T_{\text{в}}$, будет совпадать с выражением, полученным для висения вне экрана [5]

$$T_{\text{в}} = \frac{\rho}{2} F v_2^2 \left[1 + (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{кан}}) \frac{v_1^2}{v_2^2} \right]. \quad (25)$$

Представляя выражение для тяги винта в виде зависимости $T_{\text{в}} = m v_{\text{ср}} K_{\text{в}} = \rho F v_1 v_{\text{ср}} K_{\text{в}}$, найдем с учетом (25) выражение для коэффициента тяги винта в канале

$$K_{\text{в}} = \frac{1}{2} \left[\frac{v_2^2}{v_{\text{ср}}^2} \frac{v_{\text{ср}}}{v_1} + (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{кан}}) \frac{v_1}{v_{\text{ср}}} \right] \quad (26)$$

После подстановки в (26) соотношения $\frac{v_1}{v_{\text{ср}}} = \frac{F_{\text{с}}}{F} = n$, определяемого из уравнения расходов, получим

$$K_{\text{в}} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{v_2}{v_{\text{ср}}} \right)^2 \frac{1}{n} + (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{кан}}) n \right]. \quad (27)$$

Здесь n – степень диффузорного расширения потока на выходе из днища аппарата.

Входящая в (27) величина $\frac{v_2}{v_{\text{ср}}} = \frac{1}{v_{\text{ср}}/v_2}$ находится по формуле (17).

Потери напора на входе в канал и в канале рассчитываются при выборе параметров несущей системы аппарата (см. [5, 6]).

Таким образом, тяга винта зависит как от потерь напора в местных сопротивлениях канала, так и от расстояния днища аппарата до экрана. Относительные тяги \bar{T}_B и \bar{T}_K найдутся из выражений

$$\bar{T}_B = \frac{T_B}{T_h} = \frac{mv_{cp}K_B}{mv_{cp}K_3} = \frac{K_B}{K_3} = \frac{(27)}{(21)}, \quad \bar{T}_K = \frac{T_K}{T_h} = 1 - (\bar{T}_B + \bar{T}_{дн}) \quad (28)$$

Относительные тяги винта, кольца и днища представлены на рис. 4.

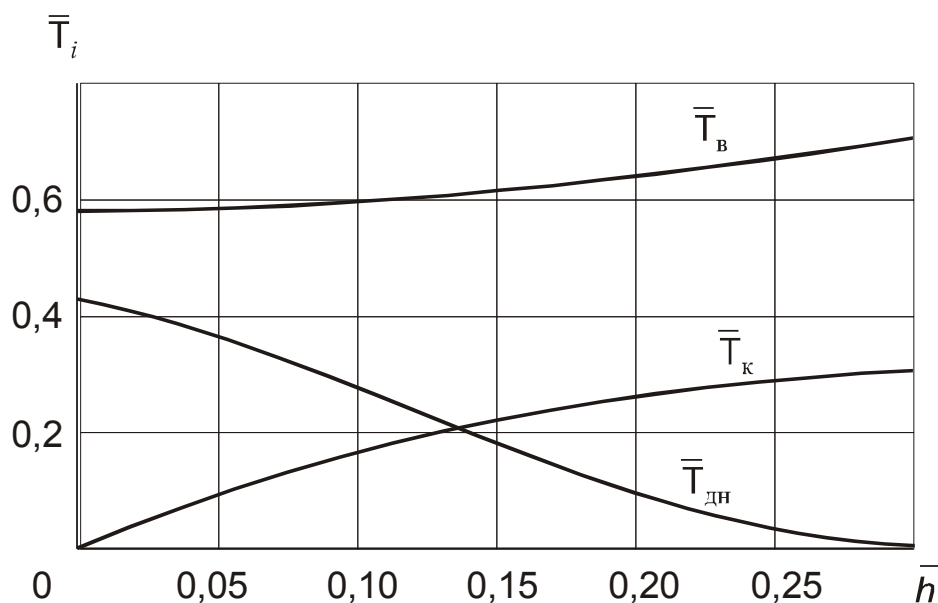


Рис. 4. Зависимость относительных тяг винта, кольца и днища аппарата от относительного расстояния днища до земли

Анализ относительных тяг показывает, что вне влияния земли на долю винта приходится больше половины тяги всей системы. Его относительная тяга меняется в зависимости от относительного расстояния $\bar{h} = h/R_u$. Другая часть тяги на висении в удалении от земли создается коллектором. По мере приближения к земле относительная тяга на коллекторе падает, а относительная подъемная сила днища растет. Абсолютные значения тяг названных частей аппарата определяются в соответствии с подводимой к винту мощностью.

Полная тяга в условиях близости земли может быть выражена через скорости протекания воздуха через диск винта из (20) с учетом уравнения расходов

$$T_h = \frac{v_{cp}}{v_1} mv_1 K_3 = \frac{1}{n} K_3 m v_1, \quad (29)$$

где $m = \rho F v_1$, и следовательно,

$$T_h = \frac{1}{n} K_3 \rho F v_1^2. \quad (30)$$

Тяга винта будет равна

$$T_B = \bar{T}_B T_h = \bar{T}_B \frac{K_э}{n} \rho F v_1^2 = \frac{K_B}{n} \rho F v_1^2. \quad (31)$$

Отсюда найдутся формулы для скорости в плоскости диска винта:

$$v_1 = \sqrt{\frac{n}{K_э} \frac{T_h}{\rho F}} = \sqrt{\frac{n}{K_э \bar{T}_B} \frac{\bar{T}_B T_h}{\rho F}} = \sqrt{\frac{n}{K_B} \frac{T_B}{\bar{T}_B \rho F}}. \quad (32)$$

Представим формулы (32) в виде

$$v_1 = a \sqrt{\frac{T_B}{2\rho F}}, \quad a = \sqrt{\frac{2n}{K_э \bar{T}_B}} = \sqrt{\frac{2n}{K_B}}. \quad (33)$$

Коэффициент a учитывает степень повышения индуктивной скорости для винта, работающего в канале, по сравнению с винтом изолированным.

Найдем теперь соотношение между тягой несущей системы, работающей вблизи земли, и потребляемой мощностью.

Рассмотрим сначала идеальный винт, не имеющий профильных потерь. В этом случае потребляемая винтом мощность определяется следующим образом:

$$L_{и} = T_B v_1 = a \frac{T_B^{3/2}}{\sqrt{2\rho F}} = \sqrt{\frac{2n}{K_B}} \frac{T_B^{3/2}}{\sqrt{2\rho F}}. \quad (34)$$

Тяга идеального винта выражается через суммарную тягу идеальной системы

$$T_B = T_{и} \bar{T}_B = \frac{K_B}{K_э} T_{и}.$$

Следовательно,

$$L_{и} = \bar{T}_B \sqrt{\frac{2n}{K_э}} \frac{T_{и}^{3/2}}{\sqrt{2\rho F}}. \quad (35)$$

Отсюда найдем идеальную тягу

$$T_{и} = \sqrt[3]{\frac{K_э}{2n \bar{T}_B^2}} (\sqrt{2\rho F} L_{и})^{2/3} = K_э \sqrt[3]{\frac{1}{2n K_B^2}} (\sqrt{2\rho F} L_{и})^{2/3}. \quad (36)$$

Реальные затраты мощности кроме индуктивных потерь включают в себя профильные потери, а также потери, связанные с неравномерностью скоростей по диску винта и с перетеканием воздуха в зазорах между концами лопастей и стенками канала. Эти потери оцениваются с помощью относительного к.п.д.

$$\eta_0 = \frac{L_{и}}{L} = \frac{a T_B^{3/2}}{L \sqrt{2\rho F}}, \quad (37)$$

или

$$\eta_0 = \frac{aC_T^{3/2}}{2m_k} = \sqrt{\frac{2n}{K_3\bar{T}_B}} \frac{C_T^{3/2}}{2m_k} = \sqrt{\frac{2n}{K_B}} \frac{C_T^{3/2}}{2m_k}. \quad (38)$$

Ранее отмечалось (см. [5]), что установка винта в канале повышает к.п.д. по сравнению с изолированным винтом, т.к. $a > 1$. С уменьшением расстояния от днища аппарата до земли к.п.д. падает, из-за уменьшения a (формула 33).

Вычисление аэродинамических коэффициентов C_T , m_k и к.п.д. проводится по формулам теории винта в канале, изложенной в [5, 6].

Учет влияния экрана и коллектора проводится путем введения коэффициента a (формула 33) в формулы для вычисления относительного к.п.д. и индуктивной скорости

$$v_1 \approx \sqrt{\frac{2n}{K_3\bar{T}_B}} \sqrt{\bar{\Gamma}_r(1-\bar{\Gamma}_r)}, \quad (39)$$

где $\bar{\Gamma}_r$ - относительная циркуляция в текущем сечении лопасти.

Величины входящих в (38) и (39) коэффициента K_3 и относительной силы тяги \bar{T}_B определяются по формулам (21) и (28).

Подставив в (36) $L_{\text{и}} = \eta_0 L$, получим формулу для расчета реальной несущей системы

$$T_h = \sqrt[3]{\frac{K_3}{2n\bar{T}_B^2}} (\sqrt{2\rho F} L \eta_0)^{2/3} = K_3 \sqrt[3]{\frac{1}{2nK_B^2}} (\sqrt{2\rho F} \eta_0 L)^{2/3}. \quad (40)$$

Исследуем теперь, как изменяется тяга несущей системы по мере приближения к земле при условии постоянства мощности на валу винта. Параметры несущей системы, работающей на большом удалении от земли, будем обозначать индексом ∞ . Найдем отношение

$$\frac{T_h}{T_\infty} = K_3^{1/3} \left(\frac{\bar{T}_{B\infty}}{\bar{T}_B} \right)^{2/3} \left(\frac{\eta_0}{\eta_{0\infty}} \right)^{2/3}. \quad (41)$$

Учитывая, что относительная величина $\frac{1}{\bar{T}_B}$ с уменьшением \bar{h} слабо растет, а к.п.д. падает, заключаем, что тяга системы растет в меньшей степени, чем $\sqrt[3]{K_3}$.

Аналогичные отношения получим для тяги винта:

$$\frac{T_B}{T_{B\infty}} = \frac{T_h}{T_\infty} \frac{\bar{T}_B}{\bar{T}_{B\infty}} = K_3^{1/3} \left(\frac{\bar{T}_B}{\bar{T}_{B\infty}} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta_0}{\eta_{0\infty}} \right)^{2/3}, \quad (42)$$

для подъемной силы днища:

$$\frac{T_{\text{дн}}}{T_{\infty}} = \frac{T_h}{T_{\infty}} \bar{T}_{\text{дн}} = K_9^{1/3} \bar{T}_{\text{дн}} \left(\frac{\bar{T}_{\text{В}\infty}}{\bar{T}_{\text{В}}} \right)^{2/3} \left(\frac{\eta_0}{\eta_{0\infty}} \right)^{2/3}, \quad (43)$$

для подъемной силы коллектора (кольца):

$$\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{к}\infty}} = \frac{T_h}{T_{\infty}} \frac{\bar{T}_{\text{к}}}{\bar{T}_{\text{к}\infty}} = K_9^{1/3} \frac{\bar{T}_{\text{к}}}{\bar{T}_{\text{к}\infty}} \left(\frac{\bar{T}_{\text{В}\infty}}{\bar{T}_{\text{В}}} \right)^{2/3} \left(\frac{\eta_0}{\eta_{0\infty}} \right)^{2/3}. \quad (44)$$

Входящие в формулы (41), (42), (43), (44) относительные тяги винта, кольца и днища находятся по формулам (28) и (23) (рис. 4).

На рис. 5 представлены зависимости $T_{\text{в}}/T_{\text{в}\infty}$, $T_{\text{дн}}/T_{\infty}$, $T_{\text{к}}/T_{\text{к}\infty}$ в функции от (\bar{h}) . Как видим, заметный рост тяги наблюдается при сравнительно малых расстояниях $\bar{h} < 0,1$. Начиная с $\bar{h} = 0,15$ интенсивно нарастает подъемная сила днища и падает подъемная сила коллектора. Тяга винта растет, что влечет за собой увеличение углов атаки сечений лопасти.

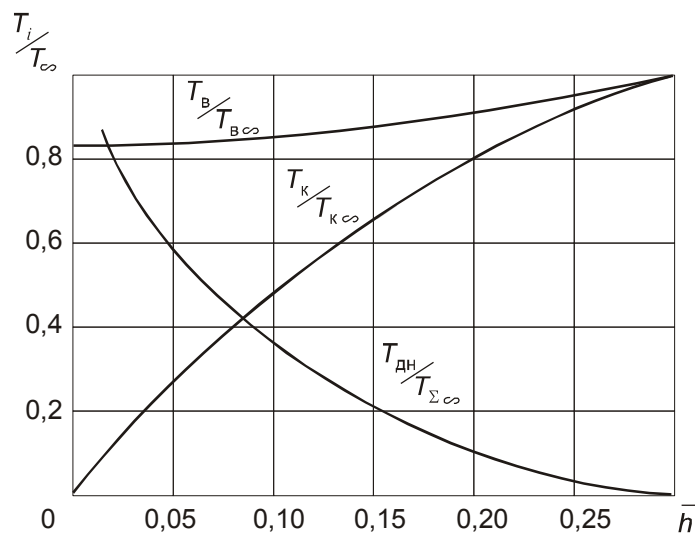


Рис. 5. Зависимости отношений сил тяги винта, кольца и днища

к соответствующим силам тяги системы на большом удалении аппарата от земли в условиях постоянной мощности, потребляемой винтом

Таким образом, полученные результаты по изучению экранного эффекта земли объясняют физическую картину изменения аэродинамических характеристик кольца, винта и днища аппарата в условиях близости земли и могут оказаться полезными при проектировании посадочного устройства ДПЛА.

Библиографический список

1. Мойzych Е.И., Завалов О.А., Кузнецов А.В. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик дистанционно-пилотируемого летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце», Электронный журнал «Труды МАИ», 2011, вып. 48.
2. Завалов О.А., Шайдаков В.И., Мойzych Е.И. Аэродинамическое проектирование дистанционно-пилотируемого летательного аппарата с системой «винт в кольце», Электронный журнал «Труды МАИ», 2011, вып. 48.
3. Ханжонков В.И. Аэродинамика аппаратов на воздушной подушке, М. Машиностроение, 1972.
4. Шайдаков В.И. Влияние близости земли на аэродинамические характеристики (винта вертолета при висении и вертикальной посадке на режиме авторотации. - В кн. Аэродинамика вертолета М.: МАИ, 1972.
5. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце. М. : МАИ, 1996.
6. Шайдаков В.И., Завалов О.А. Аэродинамическое проектирование фенестрона. М. : МАИ, 1980.

Сведения об авторе

ШАЙДАКОВ Владимир Иванович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел. (499) 158-44-74, e-mail: k102@mai.ru