

УДК 629.735.33:533.662.6

Аэродинамическое проектирование дистанционно-пилотируемого летательного аппарата с несущей системой «винт в кольце»

О. А Завалов, В. И. Шайдаков

Аннотация

Представлены результаты энергетического анализа дистанционно-пилотируемого летательного аппарата (ДПЛА) с несущей системой «винт в кольце» на режимах висения и горизонтального полета. Проведена оценка энергетических характеристик данного типа ДПЛА в зависимости от параметров его аэродинамической компоновки.

Ключевые слова

дистанционно пилотируемый летательный аппарат; винт в кольце, аэродинамическое проектирование.

Основные параметры ДПЛА

В задачу аэродинамического проектирования ДПЛА с несущей системой «винт в кольце» входит определение параметров кольцевого канала несущей системы и установленных в нем соосных винтов. На рис. 1 представлена схема аэродинамической компоновки ДПЛА с несущей системой «винт в кольце».

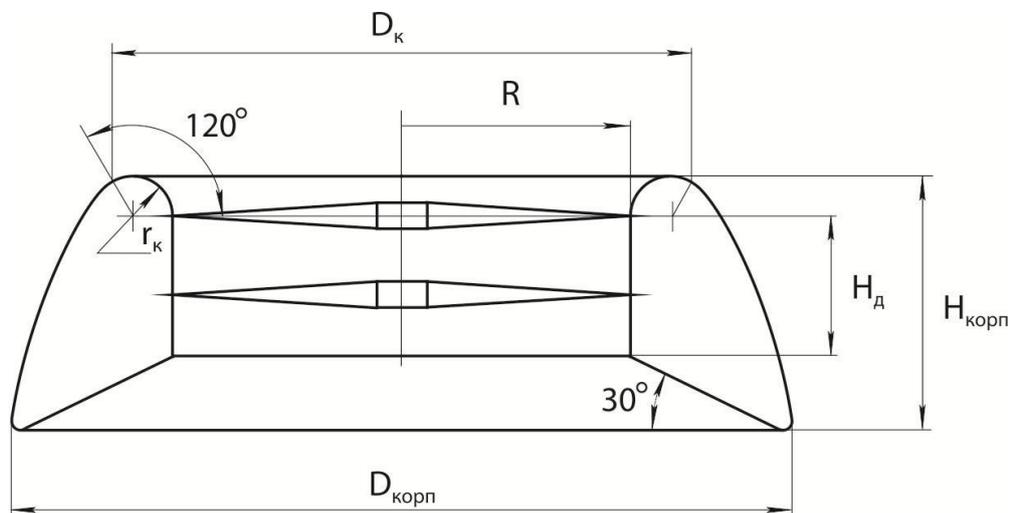


Рис. 1. Схема ДПЛА с указанием основных проектировочных параметров

Кольцевой канал состоит из коллектора и диффузора. Коллектор представляет собой кольцевую поверхность, образованную дугой окружности радиуса r_k с центральным углом 120° , определяющим габаритный размер кольца D_k . Диффузор выполнен в форме отрезка цилиндрической трубы постоянного сечения по длине.

Для определения геометрии кольцевого канала используют характерные размеры, отнесенные к радиусу винта: $\bar{r}_k = r_k / R$ - относительный радиус скругления входной кромки коллектора, $\bar{H}_d = H_d / R$ - относительная длина диффузора. Размерные параметры корпуса аппарата - диаметр $D_{\text{корп}}$ и высота $H_{\text{корп}}$ - зависят от размеров кольцевого канала. В частности, для определения величины $D_{\text{корп}}$ введем отношение $\tilde{D}_{\text{корп}} = D_{\text{корп}} / D_k$. Учитывая, что $D_k = 2R(1 + 1,5\bar{r}_k)$, получим выражение для определения диаметра корпуса аппарата при заданных значениях $\tilde{D}_{\text{корп}}$:

$$D_{\text{корп}} = 2R(1 + 1,5\bar{r}_k)\tilde{D}_{\text{корп}}.$$

Пренебрегая малой величиной радиуса скругления нижней кромки корпуса, его высоту будем определять соотношением

$$H_{\text{корп}} = H_d + r_k + \left(\frac{D_{\text{корп}}}{2} - R \right) \text{tg } 30^\circ = R \left\{ \bar{H}_d + \bar{r}_k + \left[(1 + 1,5\bar{r}_k)\tilde{D}_{\text{корп}} - 1 \right] \text{tg } 30^\circ \right\}.$$

Для исследуемого ДПЛА по аналогии с параметрами корпуса прототипа ("Cyrpher" фирмы Сикорский США [7]) величина $\tilde{D}_{\text{корп}}$ принята равной 1.3.

Полученные выражения позволяют вычислить относительную высоту корпуса в долях от среднего диаметра корпуса.

$$\bar{H}_{\text{корп}} = \frac{H_{\text{корп}}}{D_{\text{ср. корп}}}, \text{ где } D_{\text{ср. корп}} = \frac{D_{\text{корп}} + 2R(1 + 1,5\bar{r}_k)}{2} = R(1 + 1,5\bar{r}_k)(1 + \tilde{D}_{\text{корп}})$$

Параметры соосных винтов определяются величиной их суммарного заполнения и числом лопастей. Суммарное заполнение винтов является вычисляемой величиной. Она зависит от нагрузки на диск винта и окружной скорости вращения концов лопастей. Для выбора нагрузки на диск винта, окружной скорости вращения концов лопастей и числа лопастей недостаточно анализа аэродинамических характеристик аппарата. Дополнительно необходим весовой анализ конструкции агрегатов, учет конструктивно-компоновочных требований и ограничений, действующих при проектировании данного аппарата. По аналогии с прототи-

пом [7] число лопастей для всех рассматриваемых ниже решений принималось постоянным и равным четырем соответственно для нижнего и верхнего винтов.

В параметрических расчетах аэродинамических характеристик ДПЛА основными варьируемыми параметрами несущей системы «винт в кольце» являлись \bar{r}_k - относительный радиус закругления входной кромки канала и \bar{H}_d - относительная длина диффузора, взятые в долях от радиуса винта.

Для определения аэродинамических сил, действующих на корпус ДПЛА в горизонтальном полете при неработающем винте, использовались данные, полученные из испытаний модели ДПЛА в аэродинамической трубе [2]. На рис. 2 представлены графики изменения коэффициента сопротивления $C_{x_{\text{корп}}}$ и коэффициента подъемной силы $C_{y_{\text{корп}}}$ корпуса модели ДПЛА по углу атаки α (здесь коэффициенты $C_{x_{\text{корп}}}$ и $C_{y_{\text{корп}}}$ определены относительно площади $\pi D_{\text{корп}}^2/4$).

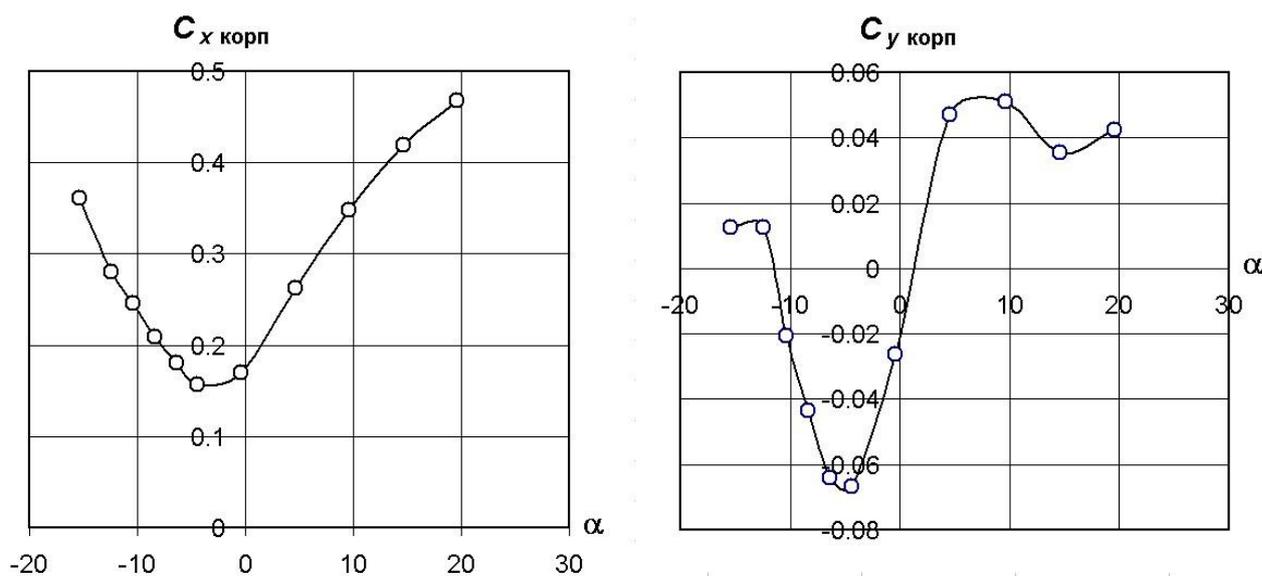


Рис. 2 Экспериментальные зависимости аэродинамических коэффициентов корпуса ДПЛА по углу атаки α

Для оценки влияния относительной высоты корпуса (при изменении длины диффузора системы «винт в кольце») на его сопротивление в эти экспериментальные данные были введены соответствующие поправки. Коэффициент сопротивления корпуса представлялся в виде $C_{x_{\text{корп}}} = C_{x0} + \Delta C_x(\alpha)$, где C_{x0} – коэффициент сопротивления корпуса при нулевом угле атаки, $\Delta C_x(\alpha)$ – величина изменения коэффициента сопротивления корпуса по углу атаки. Для оценки влияния относительной высоты корпуса на величину C_{x0} использовались данные

о сопротивлении цилиндров конечного удлинения [1] как тела, наиболее близкого по форме к корпусу ДПЛА. Зависимость коэффициента сопротивления цилиндра (на нулевом угле атаки) от его относительной высоты представлена на рис. 3. На эту зависимость нанесена точка, соответствующая коэффициенту сопротивления корпуса модели ДПЛА и его относительной высоте ($C_{x0} = 0,38$, $\bar{H}_{\text{корп}} = 0,32$). Здесь коэффициенты сопротивлений цилиндра и корпуса определены относительно характерных площадей S , показанных на рис. 3.

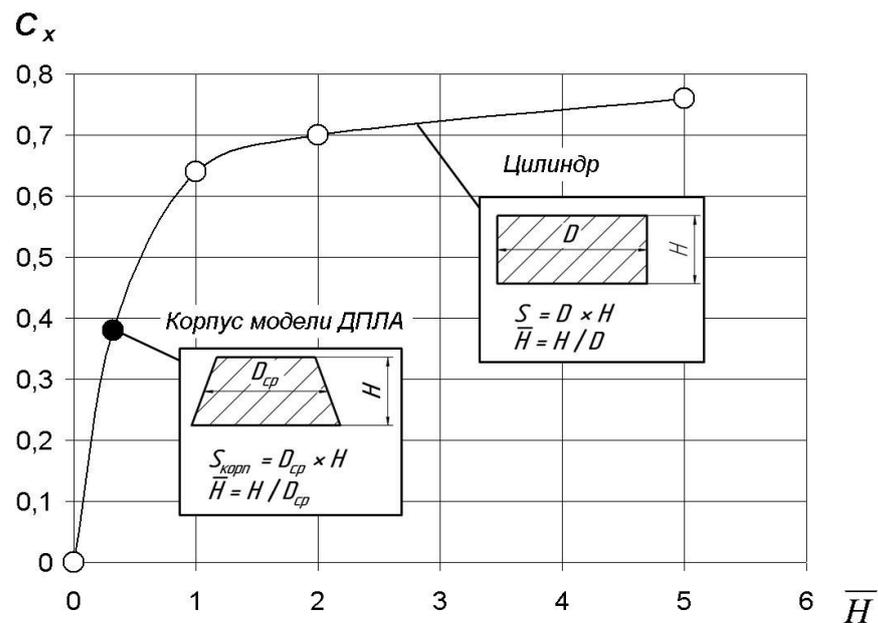


Рис. 3. Аэродинамический коэффициент сопротивления цилиндра при обдувке по нормали к его оси в зависимости от относительной высоты

В диапазоне реальных значений относительных высот корпуса $\bar{H}_{\text{корп}} = H_{\text{корп}} / D_{\text{корп}} = 0 \dots 1$ график зависимости $C_{x0} = f(\bar{H}_{\text{корп}})$ с достаточной точностью аппроксимируется зависимостью $C_{x0} = 1,445\bar{H}_{\text{корп}} - 0,805\bar{H}_{\text{корп}}^2$.

Энергетический анализ ДПЛА на режиме висения.

Для режима висения ДПЛА был проведен анализ влияния на энергетические характеристики аппарата основных параметров его несущей системы: относительного радиуса скругления коллектора \bar{r}_k и относительной длины диффузора \bar{H}_d . Для оценки влияния параметра \bar{r}_k и выбора его величины решалась следующая задача. Для заданного размера кольцевого канала несущей системы D_k , в пределах которого создается тяга на коллекторе системы «винт в кольце», определялось такое сочетание величин радиуса винта, и радиуса скругления поверхности коллектора, при которых несущая система аппарата на режиме ви-

сения при заданной мощности N развивает наибольшую тягу T . Или наоборот, при заданной величине тяги требует наименьших затрат мощности. Исходя из этого положения, в качестве показателя энергетического совершенства несущей системы аппарата была принята величина нагрузки на единицу мощности, подводимой к соосным винтам.

$$q = T/N \quad (1)$$

В соответствии с методом аэродинамического расчета системы «винт в кольце» на режиме работы на месте, изложенным в [3], мощность, необходимая на привод винта ДПЛА, определяется выражением

$$T = K_{\text{нс}} \left(1,39\sqrt{\Delta} D_{\text{к}} N \eta_0 \right)^{2/3}. \quad (2)$$

Здесь $K_{\text{нс}}$ - качество несущей системы «винт в кольце», показывающее во сколько раз при равных подводимых мощностях и значениях коэффициента полезного действия η_0 тяга несущей системы «винт в кольце» будет больше тяги изолированного винта, диаметр которого равен диаметру кольца $D_{\text{к}}$ (см. рис. 1).

$$K_{\text{нс}} = \sqrt[3]{\frac{K_{\text{в}}}{2(1+1,5\bar{r}_{\text{к}})^2 \bar{T}_{\text{в}}^2}}. \quad (3)$$

Здесь $K_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий степень поджатия струи на выходе из диффузора ограниченной длины, $\bar{T}_{\text{в}} = T_{\text{в}}/T$ - относительная тяга винта (см. [4]).

Выражение для определения величины относительного коэффициента полезного действия соосных винтов несущей системы «винт в кольце» имеет вид:

$$\eta_0 = \frac{\kappa^{1/2}}{J_{\text{в}} + 1,837\sqrt{\bar{T}_{\text{в}}} K_{\text{в}} \frac{k_p}{k_T^{3/2}} \mu_{\text{э}} \frac{1}{\sqrt{\sigma_7}}} \quad (4)$$

Определение входящих в эти выражения величин и описание их физического смысла дано в [3]. С учетом (2) и (3) выражение для определения величины q преобразуется к виду

$$q = \frac{E}{\sqrt{p/\Delta}}, \quad \text{где } E = 1,57 K_{\text{нс}}^{3/2} \eta_0 \quad (5)$$

Здесь q определена в размерности $\frac{\text{Ньютон}}{\text{вт}}$ - энергетическое качество системы (по

Юрьеву [6]), $p = \frac{4mg}{\pi D_{\text{к}}^2}$ - удельная нагрузка на площадь несущей системы «винт в кольце», m

– масса аппарата. Отсюда следует, что при заданных значениях диаметра кольцевого канала $D_{\text{к}}$, удельной нагрузки p и потребляемой мощности N максимальная сила тяги несущей си-

стемы ДПЛА соответствует таким размерным параметрам соосных винтов и кольца, при которых достигается максимум величины энергетического качества E .

Полученная в расчетах зависимость относительной тяги кольца $\bar{T}_k = T_k / T$ от величины относительного радиуса скругления входной кромки коллектора \bar{r}_k и относительной длины диффузора \bar{H}_d представлена на рис. 4. Откуда следует, что наиболее существенный градиент роста \bar{T}_k наблюдается в диапазоне $\bar{r}_k = 0 \dots 0,15$.

На рис. 5 представлена зависимость качества несущей системы ДПЛА $K_{нс}$ на режиме висения в функции от величин \bar{r}_k и \bar{H}_d . Наибольшее качество несущей системы соответствует значениям $\bar{r}_k = 0,1 \dots 0,15$. Из графиков видно, что величина \bar{H}_d в значительно меньшей степени влияет на $K_{нс}$, чем \bar{r}_k . Как следует из графика на рис. 6, относительный коэффициент полезного действия винта η_0 увеличивается с ростом \bar{r}_k и \bar{H}_d .

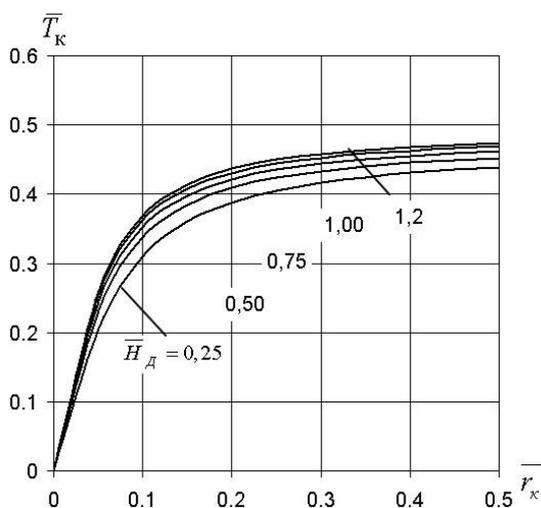


Рис. 4. Зависимость относительной тяги «кольца» \bar{T}_k от относительных параметров \bar{r}_k (радиус кривизны коллектора) и \bar{H}_d (высота диффузора)

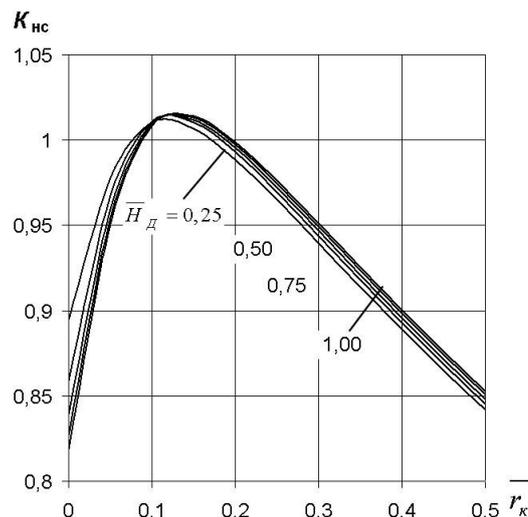


Рис. 5. Качество несущей системы ДПЛА в зависимости от \bar{r}_k и \bar{H}_d

Характер зависимостей $K_{нс} = f(\bar{r}_k, \bar{H}_d)$ и $\eta_0 = f(\bar{r}_k, \bar{H}_d)$ в итоге определяют характер изменения величины q – удельной нагрузки на 1 кВт, мощности, подводимой к винтам несущей системы «винт в кольцо» (рис. 7). Наибольшие удельные нагрузки q соответствуют значениям $\bar{r}_k = 0,13 \dots 0,14$, которые являются оптимальными для данной несущей системы.

Относительная длина диффузора в значительно меньшей степени влияет на величину q . Так, изменение величины \bar{H}_d от 0,25 до 1 дает прирост величины q на 4%.

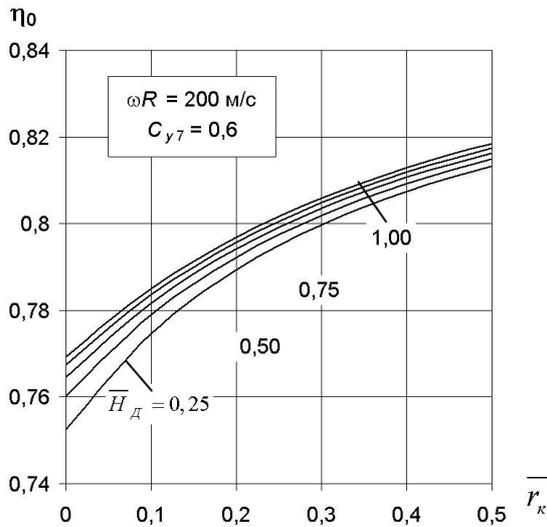


Рис. 6. Относительный КПД соосных винтов ДПЛА в зависимости от параметров \bar{r}_k и \bar{H}_d

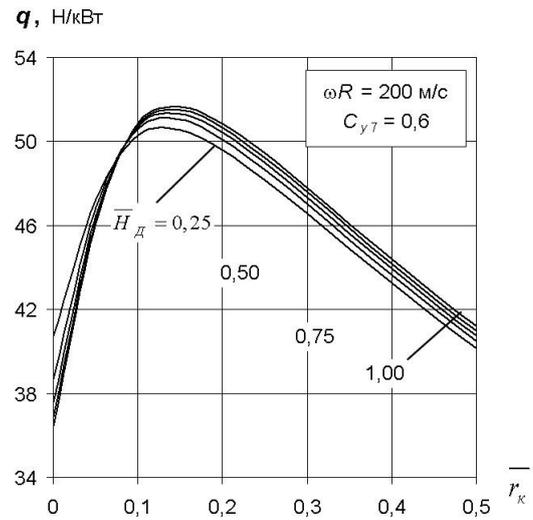


Рис. 7. Зависимость удельной нагрузки на единицу мощности q от параметров \bar{r}_k и \bar{H}_d

Энергетический анализ ДПЛА на режиме горизонтального полета

На рис. 8 дана схема сил, действующих на ДПЛА в установившемся режиме горизонтального полета. Аппарат рассматривается как материальная точка, движущаяся под действием приложенных к ней сил. На рисунке T – сила тяги несущей системы «винт в кольце», $Q_{\text{имп}}$ – импульсное сопротивление, $Q_{\text{корп}}$ – аэродинамическое сопротивление корпуса, $Y_{\text{корп}}$ – подъемная сила корпуса, α_n – угол атаки, равный углу тангажа аппарата. В режиме горизонтального полета $\alpha_n < 0$.

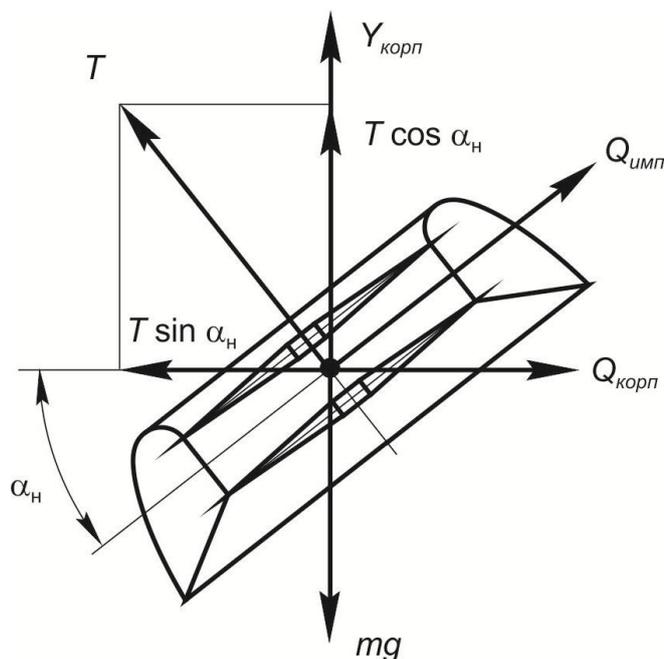


Рис. 8. Схема сил, действующих на ДПЛА,
в установившемся режиме горизонтального полета

В соответствии с принятой схемой уравнения продольной балансировки сил, действующих на аппарат, имеют вид

$$T \cos \alpha_H + Y_{\text{корп}} = mg, \quad (6)$$

$$-T \sin \alpha_H = Q_{\text{имп}} \cos \alpha_H + Q_{\text{корп}}. \quad (7)$$

Из этих уравнений определим требуемую силу тяги несущей системы

$$T = \frac{mg - Y_{\text{корп}}}{\cos \alpha_H}, \quad (8)$$

и угол атаки аппарата

$$-\text{tg} \alpha_H = \frac{Q_{\text{имп}}}{T} + \frac{Q_{\text{корп}}}{T \cos \alpha_H} = \frac{1}{K} + \frac{Q_{\text{корп}}}{T \cos \alpha_H}. \quad (9)$$

Здесь $K = \frac{T}{Q_{\text{имп}}}$ - качество несущей системы «винт в кольце» на режиме горизонтального полета. Поскольку искомая величина α_H также входит в правую часть последнего уравнения, вычисление угла атаки аппарата должно проводиться методом последовательных приближений.

Определим полезную мощность, идущую на перемещение аппарата как $N = QV$, где V – скорость горизонтального полета аппарата. Мощность затрачиваемая, на создание подъемной и пропульсивной сил будет несколько большей вследствие наличия профильных потерь на винте.

Для анализа совершенства ДПЛА на режиме горизонтального полета используем величину эквивалентного качества аппарата, определяемого соотношением

$$K_э = \frac{Y}{X_{\text{усл}}}, \quad \text{где } Y = mg \text{ - подъемная сила аппарата, определяемая из уравнения (6),}$$

$X_{\text{усл}} = N_{\text{п}}/V$ - условная сила сопротивления аппарата. $N_{\text{п}}$ – необходимая мощность, подводимая к валу винтов.

Расчеты мощности, необходимой на привод винтов и преодоление импульсного сопротивления $Q_{\text{имп}}$, действующего на стенки канала ДПЛА, проводились в соответствии с методом аэродинамического расчета системы «винт в кольце» в режиме обтекания горизонтальным потоком, изложенным в [5].

Основная цель параметрических расчетов характеристик ДПЛА в горизонтальном полете заключалась в определении влияния на характеристики аппарата относительной длины диффузора несущей системы «винт в кольце». Влияние длины диффузора на характеристики аппарата оценивалось в диапазоне $\bar{H}_d = 0,25...1$.

На рис. 9 представлена полученная в расчетах зависимость относительной тяги кольца несущей системы «винт в кольце» в функции от скорости полета V . С увеличением скорости полета относительная тяга кольца падает и соответственно увеличивается доля тяги, создаваемой винтом. При этом увеличивается импульсное сопротивление аппарата, величина которого определяет качество системы «винт в кольце» в горизонтальном полете ($K = T/Q_{имп}$). Как видно из рис. 10, при скорости полета $V > 50$ км/ч у аппарата с $\bar{H}_d = 0,5$ импульсное сопротивление $Q_{имп}$ составляет более 30% от суммарной тяги, создаваемой несущей системой.

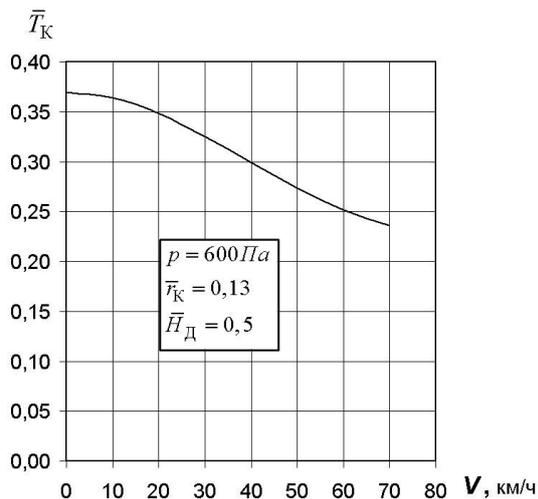


Рис. 9. Относительная тяга «кольца» в зависимости от скорости полета ДПЛА

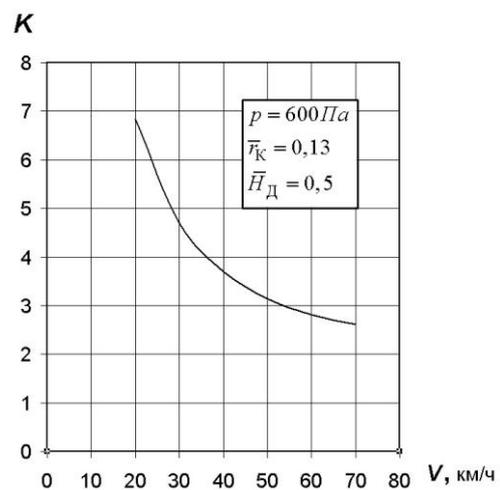


Рис. 10. Кривая качества несущей системы «винт в кольце» ($K = T/Q_{имп}$) в зависимости от скорости полета

Поскольку кроме импульсного сопротивления ДПЛА испытывает значительное внешнее сопротивление корпуса, величина эквивалентного качества K , аппарата невелика и для короткого диффузора ($\bar{H}_d = 0,25$) не превышает значения 0,5. Причем в противоположность качеству несущей системы эквивалентное качество в рассматриваемом диапазоне режимов горизонтального полета растет с увеличением скорости (рис. 11), поскольку с ростом скорости падает условное сопротивление. На импульсное сопротивление аппарата и на внешнее сопротивление корпуса существенное влияние оказывает длина диффузора. Причем с увеличением \bar{H}_d возрастают обе эти величины, вследствие чего на больших скоростях па-

дает качество несущей системы «винт в кольце» и эквивалентное качество аппарата (рис. 11). Соответственно возрастает потребная мощность аппарата (рис. 12).

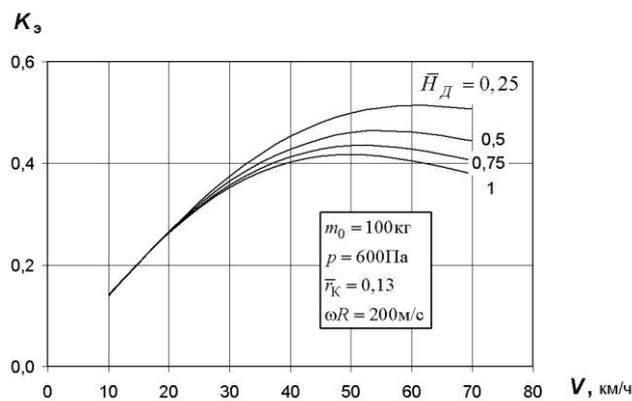


Рис. 11. Кривые эквивалентного качества ДПЛА $K_э = mg/X_{усл}$ в зависимости от скорости полета

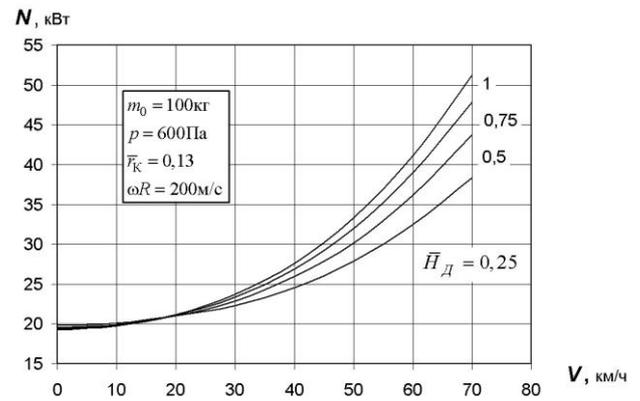


Рис. 12. Кривые потребной мощности ДПЛА в зависимости от относительной высоты диффузора и скорости полета

Для того, чтобы снизить затраты мощности на режиме горизонтального полета, необходимо делать аппарат с наименьшей длиной диффузора, поскольку энергетический проигрыш в режиме висения в этом случае будет существенно меньше того положительного эффекта, который может быть получен в горизонтальном полете. Например, для аппарата с полетной массой 100 кг и нагрузкой $p = 600$ Па уменьшение относительной длины диффузора от 1 до 0,25 дает увеличение потребной мощности в режиме висения всего лишь на 2%. При этом в горизонтальном полете со скоростью $V > 50$ км/ч потребная мощность аппарата уменьшается на 12,5%. Таким образом, диффузор несущей системы ДПЛА рекомендуется делать как можно короче с тем, чтобы по возможности уменьшить относительную высоту корпуса аппарата. В этом случае длина диффузора будет определяться минимально возможным конструктивным разнесом соосных винтов и предельными размерами корпуса, в котором должны разместиться полезная нагрузка, силовая установка, различные системы и оборудование аппарата.

Таким образом, проведенные параметрические расчеты позволяют спроектировать ДПЛА с наилучшими аэродинамическими и летно-техническими характеристиками.

Библиографический список

1. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970.
2. 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.
3. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце. - М.: Изд-во МАИ, 1996.
 4. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце с коллектором и цилиндрическим диффузором ограниченной длины. Труды третьего форума Российского вертолетного общества, 1998.
 5. Шайдаков В.И. Аэродинамика винта в кольце в условиях обтекания осевым и горизонтальным потоком. – Труды Третьего форума Российского вертолетного общества, М., МАИ, 1998.
 6. Юрьев Б.Н. Аэродинамический расчет вертолета. Избранные труды, т.1. –М.: АН СССР, 1961.
 7. James P. Cycon. Sikorsky Aircraft UAV Program. Vertiflite. May/June, 1992.

Сведения об авторах

ЗАВАЛОВ Олег Анатольевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

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

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

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