

**ЭНЕРГЕТИКА ВОЗДУШНОГО ВИНТА
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**
(экспериментальные исследования, срывное течение)

Докт. физ.-мат. наук, проф. ГРЕЧИХИН Л. И.,
инженеры САХАРУК Д. А., СИВАШКО А. Б., ЦАНАВА А. А.

*Минский государственный высший авиационный колледж,
Военная академия Республики Беларусь*

На беспилотных летательных аппаратах используются воздушные винты высокоскоростные и малого размера. Поэтому их экспериментальные исследования усложняются тем, что в тыльной стороне винта на больших скоростях его вращения возникает срывное течение. В области срывного течения образуется зона разрежения воздуха. Эта зона заполняется воздухом со всех сторон. В результате возникают дополнительные силы торможения и тяговых усилий. В этой связи возникает цель: в экспериментальных исследованиях высокоскоростных винтов учесть воздействие окружающей среды в области срывного течения. Поставленная цель ставит следующие задачи:

- разработать модель взаимодействия окружающей среды с лопастями высокоскоростного воздушного винта при образовании срывного течения в тыльной стороне;
- экспериментально установить, когда образуется срывное течение и как оно влияет на работу высокоскоростного воздушного винта;
- опытным путем определить коэффициент преобразования потребляемой мощности в мощность тяговых усилий высокоскоростного винта.

На рис. 1 схематически изображены образование зоны разрежения в области срывного течения и его заполнение невозмущенным воздушным потоком. Заполнение зоны разрежения происходит вследствие хаотического движения молекул воздуха при температуре окружающей среды со скоростью звука. Общая методология взаимодействия воздушных потоков

с движущимися телами с молекулярно-кинетических позиций рассмотрена в [1, 2]. Столкновение двух встречных потоков приводит к образованию вихрей, которые своим действием резко уменьшают взаимодействие активной составляющей с лопастью винта. Активная составляющая – это та часть воздуха, которая возникает после взаимодействия винта с неподвижной окружающей средой. По мере увеличения скорости вращения винта кинетическая энергия встречного потока уменьшается, и это приводит

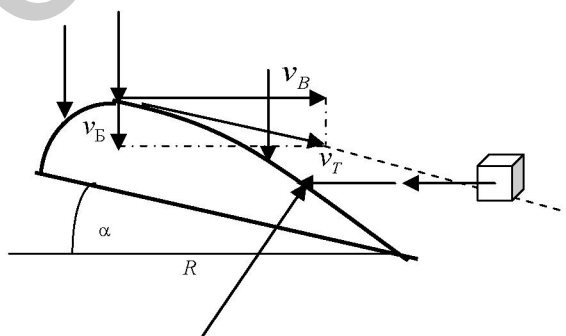


Рис. 1. Образование зоны разрежения за срывным течением и ее заполнение молекулами воздуха со скоростью звука

к возрастанию действия активной составляющей окружающей среды на выпуклую область верхней поверхности винта.

В срывном течении скорости по нормали и вдоль поверхности после взаимодействия с поверхностью винта обратного потока для областей $[x_{кр}, 0]$ и $[0, l_x - a]$ на каждом сечении равны соответственно [3]

$$\Delta v_n = (v_T - v_B) \sin[\alpha - \gamma(x)]; \quad \Delta v_\tau = (v_T - v_B) \cos[\alpha - \gamma(x)] \quad \text{при } x_{кр} \geq x \geq 0; \quad (1)$$

$$\Delta v_n = (v_T - v_B) \sin[\alpha + \sigma(x)]; \quad \Delta v_\tau = (v_T - v_B) \cos[\alpha + \sigma(x)] \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a,$$

где a – ширина лопасти винта.

Масса, которая взаимодействует с элементом поверхности $dzdy$:

$$dm = \rho_0 dzdy(v_{зв} - v_B)dt; \quad dt = dl / \Delta v_\tau. \quad (2)$$

На основании (1) и (2) для ударного воздействия вдоль осей X и Y в областях $[x_{кр}, 0]$ и $[0, l_x - a]$ получаем:

$$dF'_{уд,x} = 2\rho_0(v_{зв} - v_B)^2 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\sin^2[\alpha - \gamma(x)] \cos[\alpha - \gamma(x)]}{\cos[\gamma(x)]} dx \quad \text{при } x_{кр} \leq x \leq 0;$$

$$dF'_{уд,x} = 2\rho_0(v_{зв} - v_B)^2 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\sin^2[\alpha + \sigma(x)] \cos[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a; \quad (3)$$

$$dF'_{уд,y} = 2\rho_0(v_{зв} - v_B)^2 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\sin[\alpha - \gamma(x)] \cos^2[\alpha - \gamma(x)]}{\cos[\gamma(x)]} dx \quad \text{при } x_{кр} \leq x \leq 0;$$

$$dF'_{уд,y} = 2\rho_0(v_{зв} - v_B)^2 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\sin[\alpha + \sigma(x)] \cos^2[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a.$$

Центробежное ускорение, возникающее при обтекании искривленной верхней поверхности винта для областей $[x_{кр}, 0]$ и $[0, l_x - a]$, обуславливает возникновение сил вдоль осей X и Y . Эти силы определяются следующим образом:

$$dF'_{Ц,x} = (v_{зв} - v_B) \rho_0 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2} \sin[\alpha - \gamma(x)] \cos^2[\alpha - \gamma(x)]}{R(x) \cos[\gamma(x)]} dx$$

при $x_{кр} \leq x \leq 0$;

$$dF'_{Ц,x} = (v_{зв} - v_B) \rho_0 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2} \sin[\alpha + \sigma(x)] \cos^2[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx$$

при $0 \leq x \leq l_x - a$;

(4)

$$dF'_{Ц,y} = (v_{зв} - v_B) \rho_0 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2} \cos^3[\alpha - \gamma(x)]}{R(x) \cos[\gamma(x)]} dx \quad \text{при } x_{кр} \leq x \leq 0;$$

$$dF'_{Ц,y} = (v_{зв} - v_B) \rho_0 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\sqrt{dx^2 + dy^2} \cos^3[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a.$$

Аналогично для областей $[x_{кр}, 0]$ и $[0, l_x - a]$ определяются силы вдоль осей X и Y , возникающие под действием закона Бернулли, а именно:

$$\begin{aligned}
 dF_{Б,x}'' &= \frac{(v_T - v_B)^2}{2} \rho_0 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\cos^2[\alpha - \gamma(x)] \sin[\alpha - \gamma(x)]}{\cos[\gamma(x)]} dx \quad \text{при } x_{кр} \leq x \leq 0; \\
 dF_{Б,x}'' &= \frac{(v_T - v_B)^2}{2} \rho_0 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\cos^2[\alpha + \sigma(x)] \sin[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a; \\
 dF_{Б,y}'' &= \frac{(v_T - v_B)^2}{2} \rho_0 dz \int_{x_{кр}}^0 \frac{\cos^3[\alpha - \gamma(x)]}{\cos[\gamma(x)]} dx \quad \text{при } x_{кр} \leq x \leq 0; \\
 dF_{Б,y}'' &= \frac{(v_T - v_B)^2}{2} \rho_0 dz \int_0^{l_x - a} \frac{\cos^3[\alpha + \sigma(x)]}{\cos[\sigma(x)]} dx \quad \text{при } 0 \leq x \leq l_x - a.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Рассмотренная аэродинамика обтекания путем заполнения зоны разрежения вследствие хаотического движения частиц воздуха при заданной температуре T со скоростью звука имеет место только для дозвуковой скорости движения БЛА. При сверхзвуковом движении возникает вакуум в донной области, который заполняется на достаточно большом удалении от движущегося тела. Образующийся вакуум в донной области существенно увеличивает лобовое сопротивление движущегося тела в атмосфере Земли со сверхзвуковой скоростью.

Экспериментальные исследования были получены в закрытом помещении в зависимости от частоты вращения. Результаты приведены на рис. 2. На рис. 2 представлена также зависимость тяги винта без учета действия встречного потока и активной составляющей окружающей среды. Из экспериментальных данных получена зависимость вероятности включения активной составляющей окружающей среды от скорости вращения винта. При частотах вращения меньше 4000 об/мин срыва течения на выпуклой поверхности винта не образуется. В области вращения винта 5000–8500 об/мин образуется срывное течение, в котором вероятность включения активной составляющей заметно уменьшилась. По мере дальнейшего возрастания скорости вращения вероятность включения действия активной составляющей окружающей среды постепенно возрастает. При приближении скорости вращения винта к скорости звука вероятность действия активной составляющей среды стремится к единице, что и подтверждается экспериментальными данными.

Из зависимости вероятности участия активной составляющей окружающей среды в формировании лобового сопротивления и тяговых усилий от скорости вращения винта следует, что при скоростях движения меньших 4000 об/мин, срывное течение на выпуклой поверхности не образуется. Происходит обычное ламинарное течение по выпуклой и вогнутой поверхностям винта, которое рассмотрено в предыдущей статье. Срывное течение полностью формируется при скорости вращения винта 4500 об/мин. Поэтому в этой зоне следует учитывать заполнение зоны раз-

режения обратным воздушным потоком. При частотах вращения винта выше 12000 об/мин обратный поток настолько мощный, что практически полностью отсекает ламинарное обтекание воздуха вдоль выпуклой поверхности.

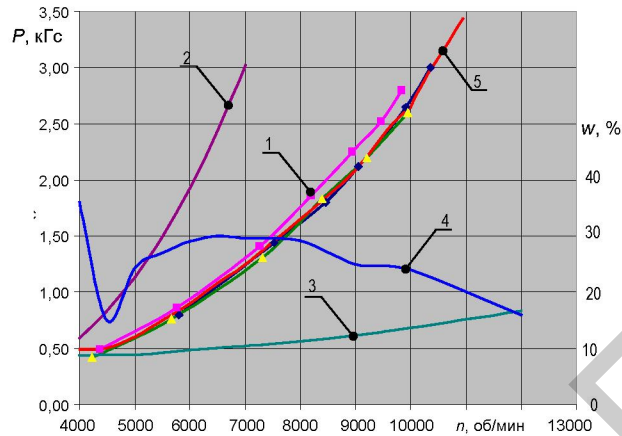


Рис. 2. Зависимость силы тяги винта от скорости вращения: 1 – экспериментальные результаты; 2 – теоретический расчет активной составляющей без учета обратного потока в зоне срывного течения; 3 – то же без учета активной составляющей в зоне срывного течения; 4 – вероятность участия активной составляющей окружающей среды в зоне срывного течения при совместном действии с обратным потоком; 5 – результирующая сила тяги при совместном действии активной составляющей и обратного потока

Тяга винта преимущественно реализуется вследствие возникновения активной составляющей окружающей среды. Отношение мощности, затрачиваемой окружающей средой в стационарных условиях на поддержание скорости движения БЛА, к мощности преодоления лобового сопротивления является коэффициентом преобразования, а не коэффициентом полезного действия. По существу в данном случае реализуется тепловой насос, для которого коэффициент преобразования

$$\eta = \frac{F_{\text{тяги}} v_{\text{Б}}}{F_{\text{ЛС}} \pi n L}. \quad (6)$$

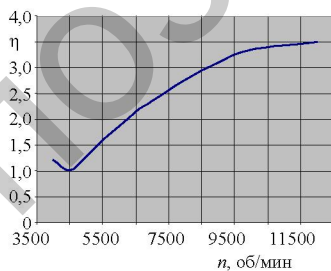


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от частоты вращения винта

Конкретно для рассматриваемого винта при его вращении в закрытом помещении, когда он обтекается потоком воздуха, на рис. 3 приведена зависимость коэффициента преобразования от скорости вращения винта. При этом данный коэффициент формируется самим винтом.

Коэффициент преобразования начиная с 4500 об/мин возрастает. Исследуемый винт является высокоскоростным. На частотах выше 14000 об/мин для данного винта ламинарный поток по выпуклой поверхности полностью отсекается обратным потоком воздуха. При этом тяговые усилия уменьшаются до 1 кГс, т. е. почти на два порядка.

Так как коэффициент преобразования больше единицы, то в соответствии с законом сохранения энергии в системе «БЛА – окружающая среда» для работающего винта дополнительная энергия к винту приходит из окружающей среды. Это значит, что работающий воздушный винт представляет собой тепловой насос. Для тепловых насосов коэффициенты преобразования достигли значений более 10. По этому параметру рассмотренный винт не является оптимальным.

Изменяя конструкцию винта, можно получить коэффициент преобразования при соответствующем угле атаки 10 и более. В этой связи проблема создания новых конструкций воздушных тяговых винтов с более эффективным коэффициентом преобразования по-прежнему является актуальной. Например, более эффективными оказались саблевидные лопасти воздушных винтов. Авторы [4] предложили воздушный винт двойной саблевидности, лопасти которого построены из спиральных участков в виде трех полуколец с поверхностью Мёбиуса. В результате такой винт позволил увеличить тягу как минимум в два и более раза по сравнению с традиционным трехлопастным винтом такого же диаметра.

ВЫВОД

Общая модель работы высокоскоростного винта БЛА определяется возникновением активной составляющей окружающей среды работающего воздушного винта, которая обеспечивает принцип преобразования энергии типа вихревого теплового насоса. При разработке воздушных винтов необходимо руководствоваться уже достигнутыми результатами по их конструированию, но решительным образом отказаться от ранее бытовавших представлений о вихревом характере возникновения тяговых усилий с определением коэффициента полезного действия как несоответствующих современному уровню знаний в этой области. Экспериментальную аэродинамику следует использовать только для уточнения модели характера взаимодействия воздушного винта с окружающей неподвижной атмосферой, а в последующем перейти на полное компьютерное моделирование при создании новых типов винтомоторных беспилотных летательных аппаратов различного назначения. Для этого необходимо разработать аэродинамику винтомоторного БЛА с учетом всех его конструктивных элементов от винта до хвостового оперения на новых физических принципах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р е ч и х и н, Л. И. Аэродинамика летающего крыла / Л. И. Гречихин, А. Б. Сивашко // Матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА-2009». – Київ: НАУ, 2009. – Т. 1. – С. 4.15–4.23.
2. Г р е ч и х и н, Л. И. Статистическая аэродинамика / Л. И. Гречихин // Матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. конф. «АВІА-2009». – Київ: НАУ, 2009. – Т. 1. – С. 4.9–4.14.
3. Э н е р г е т и к а воздушного винта беспилотного летательного аппарата / Л. И. Гречихин [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений). – 2010. – № 4. – С. 59–67.
4. Ш п а д и, А. Л. Невинтовые пропеллеры: проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: материалы междунар. науч.-практ. конф. 20–21 нояб. 2008 г. / А. Л. Шпади, В. Ф. Тимофеев; под ред. Н. У. Ушакова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. – С. 40–43.

Представлена кафедрой организации
упаковочного производства БНТУ

Поступила 10.03.2010