

Д.И. Базов

Аэродинамика вертолетов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
Д11

Д11 **Д.И. Базов**
Аэродинамика вертолетов / Д.И. Базов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 196 с.

ISBN 978-5-458-43565-9

В книге изложены принципы полета вертолета, основные характеристики несущего винта и его работа на режимах самовращения, осевого и косого обтекания, режимы вертикального полета и горизонтальный полет, набор высоты и снижение, взлет и посадка, равновесие, устойчивость и управляемость вертолета и аэродинамические силы, действующие при этом.

ISBN 978-5-458-43565-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

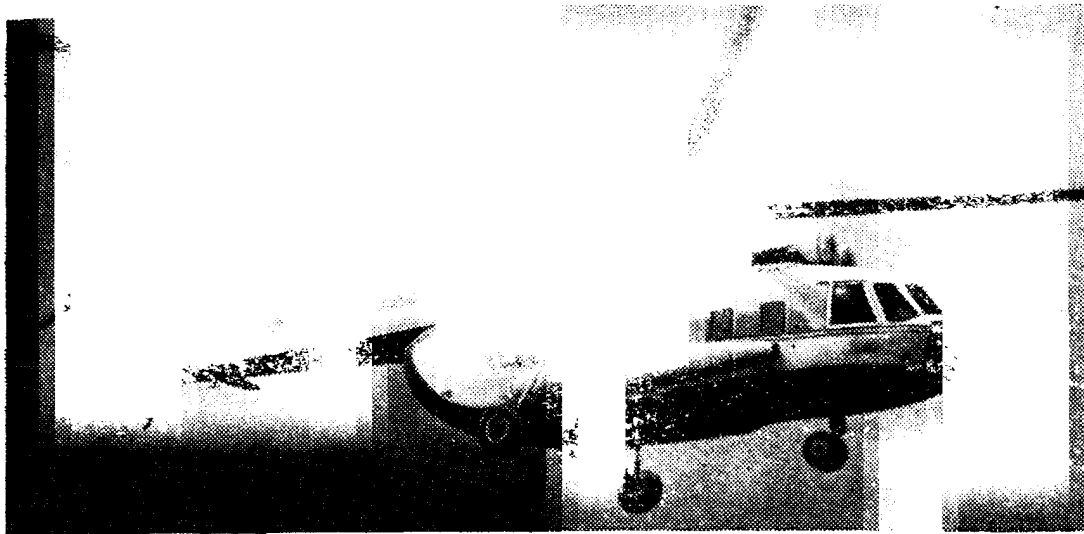


Рис. 3. Одновинтовой вертолет Ми-8

В 1958 г. построен тяжелый вертолет Ми-6, который и до настоящего времени не имеет себе равных за рубежом.

В 1961 г. построены вертолеты с газотурбинными двигателями Ми-2 и Ми-8 (рис. 3). В настоящее время они выпускаются серийно и постепенно будут заменять вертолеты Ми-1 и Ми-4.

Способность вертолета к вертикальному полету, возможность движения в любом направлении делают его очень маневренным летательным аппаратом, независимым от аэродромов, и значительно расширяют границы его использования.

В настоящее время вертолеты находят все более широкое применение в различных областях народного хозяйства. Они являются основным средством передвижения в местах, где нельзя использовать наземный транспорт и самолеты. Вертолеты используются при строительно-монтажных работах, для спасения людей и имущества во время различных стихийных бедствий. В последнее время вертолеты находят широкое применение в сельском хозяйстве. Перечисленными примерами далеко не исчерпываются возможности использования вертолетов как летательных аппаратов.

§ 2. Вертолет и его основные части

Принципы полета

Вертолет — летательный аппарат тяжелее воздуха, у которого подъемная сила создается несущим винтом по аэродинамическому принципу.

Основными частями вертолета являются:

несущий винт, приводимый в движение силовой установкой (двигателем);

фюзеляж, предназначенный для размещения экипажа, пассажиров, оборудования и грузов;

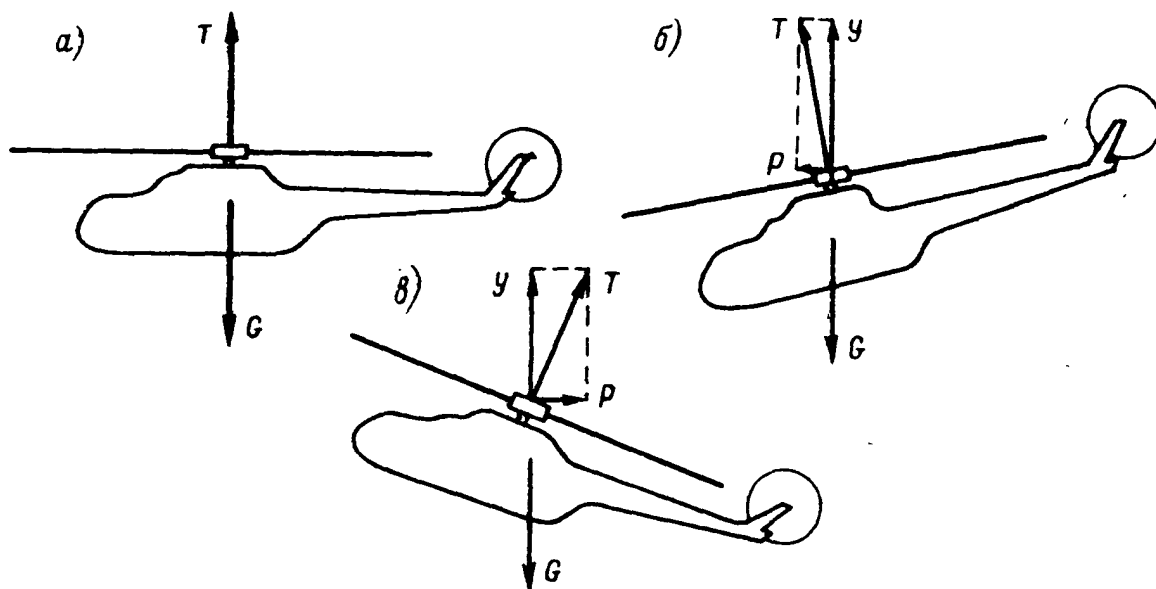


Рис. 4. Принцип управления полетом вертолета:

a — вертикальный полет; $б$ — горизонтальный полет вперед; $в$ — горизонтальный полет назад

шасси, т. е. устройство, предназначенное для передвижения по земле и для стоянки;

рулевой винт, обеспечивающий путевое равновесие и путевое управление вертолетом;

силовая установка, которая приводит в движение несущий и рулевой винты и вспомогательные агрегаты;

трансмиссия, передающая крутящий момент от силовой установки к несущему и рулевому винтам.

Все части вертолета крепятся к фюзеляжу или располагаются в нем.

Полет летательного аппарата становится возможным при наличии подъемной силы, уравнивающей его вес. Подъемную силу у вертолета создает несущий винт. При вращении несущего винта в воздухе сила тяги направлена перпендикулярно к плоскости вращения винта. Если несущий винт вращается в горизонтальной плоскости, то его сила тяги T направлена вертикально вверх (рис. 4, a), т. е. возможен вертикальный полет. Характер полета будет определяться соотношением между силой тяги несущего винта и весом вертолета. Если сила тяги равна весу вертолета, то он будет неподвижно висеть в воздухе; если же сила тяги больше веса — вертолет перейдет от висения к вертикальному набору высоты; при силе тяги меньше веса вертолета — последний будет вертикально снижаться.

Плоскость вращения несущего винта относительно горизонта может отклоняться в любом направлении (рис. 4, $б$, $в$). В этом случае тяга несущего винта будет выполнять двойную функцию; ее вертикальная составляющая Y будет являться подъемной силой, а горизонтальная составляющая P — движущей силой. Под

действием этой силы вертолет движется поступательно в сторону полета.

При отклонении плоскости вращения несущего винта назад вертолет будет двигаться назад (рис. 4, в). Отклонение плоскости вращения вправо или влево вызовет движение вертолета в соответствующую сторону.

§ 3. Классификация вертолетов

Основной признак, по которому подразделяются вертолеты, это количество несущих винтов и их расположение. По количеству несущих винтов вертолеты можно разделить на одновинтовые, двухвинтовые, многовинтовые.

Одновинтовые вертолеты являются самой распространенной разновидностью. Вертолет одновинтовой схемы имеет несущий винт, расположенный на основной части фюзеляжа, и рулевой винт — на хвостовой балке (см. рис. 3). Эту схему, которая была разработана Б. Н. Юрьевым в 1911 г., можно назвать классической.

Основными достоинствами одновинтовых вертолетов являются простота конструкции и системы управления. По одновинтовой схеме строятся самые легкие вертолеты (полетный вес около 500 кг) и самые тяжелые (полетный вес более 40 т). Недостатками одновинтовых вертолетов являются:

- большая длина фюзеляжа;
- значительные потери мощности на привод рулевого винта (7—10% от полной мощности двигателя);
- ограниченный диапазон допустимых центровок;
- повышенный уровень вибраций (длинные валы трансмиссии, проходящие в хвостовой балке, являются дополнительным источником колебаний).

Двухвинтовые вертолеты имеют несколько компоновочных схем:

- с продольным расположением винтов; это наиболее распространенная схема (рис. 5, а);
- с поперечным расположением винтов (рис. 5, б);
- с перекрещивающимися винтами (рис. 5, в);
- с соосным расположением винтов (рис. 5, г).

Основные достоинства вертолетов с продольным расположением винтов:

- более широкий диапазон допустимых центровок;
- большой объем фюзеляжа, позволяющий вмещать крупногабаритные грузы;
- увеличенная продольная устойчивость;
- большой коэффициент весовой отдачи.

На вертолетах продольной схемы может быть один или два двигателя, которые располагаются в носовой и хвостовой частях фюзеляжа. Эти вертолеты имеют и серьезные недостатки:

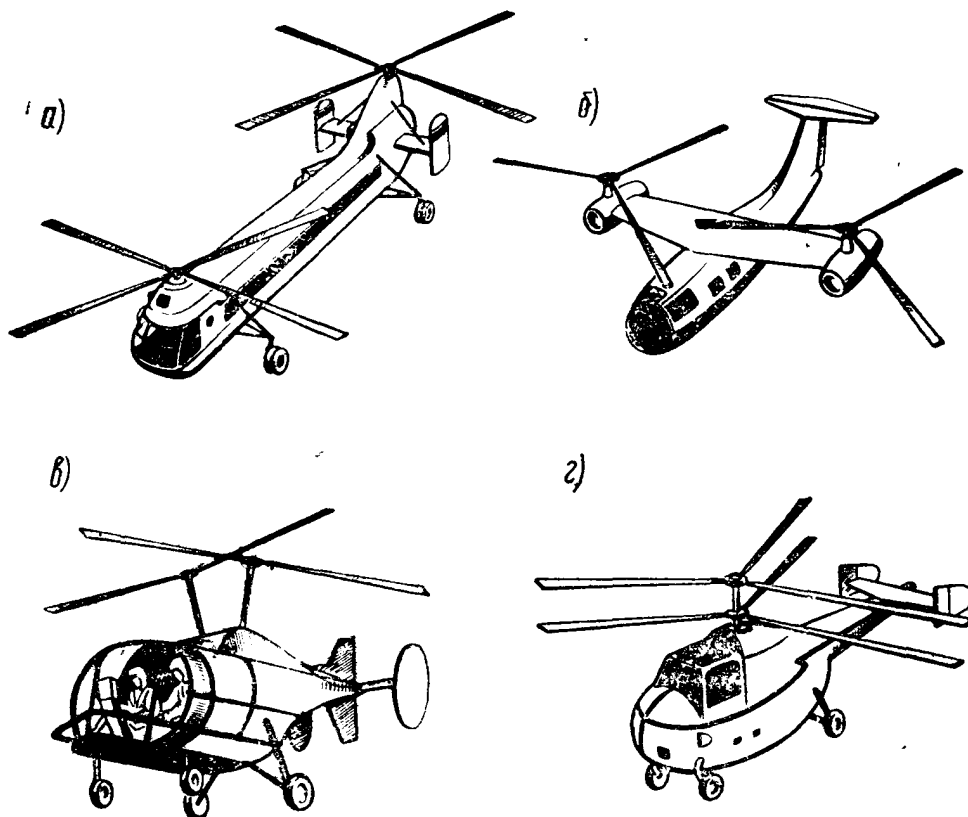


Рис. 5. Двухвинтовые вертолеты

сложную систему трансмиссии и управления;
 вредное взаимное влияние несущих винтов, вызывающее дополнительные потери мощности;
 сложную технику посадки на режиме самовращения несущих винтов.

К преимуществам вертолетов с поперечным расположением винтов следует отнести:

удобное использование всего объема фюзеляжа для экипажа и пассажиров, так как двигатели находятся вне фюзеляжа;
 отсутствие вредного влияния винтов друг на друга;
 повышенная поперечная устойчивость и управляемость вертолета;

наличие вспомогательного крыла, на котором расположены двигатели и несущие винты, позволяет вертолету развивать большую скорость.

Недостатками этих вертолетов являются:

сложная система управления и трансмиссии;
 увеличенные габариты и вес конструкции из-за наличия вспомогательного крыла.

Двухвинтовые вертолеты с перекрещивающимися винтами имеют значительное преимущество перед вертолетами поперечной схемы: у них отсутствует вспомогательное крыло, что уменьшает габариты и вес конструкции. Но одновременно с этим преи-

муществом появляется и недостаток — сложная трансмиссия и система управления.

В Советском Союзе эти вертолеты не производятся. За рубежом они встречаются редко.

Основное преимущество двухвинтовых вертолетов с соосными винтами — малые габариты конструкции. Их недостатки:

- сложность конструкции;
- недостаточная путевая устойчивость;
- опасность столкновения лопастей винтов;
- значительные вибрации.

По этой схеме строятся легкие вертолеты только в Советском Союзе.

Многовинтовые вертолеты распространения не получили ввиду сложности конструкции.

У всех двухвинтовых вертолетов несущие винты вращаются в разные стороны. Этим взаимно уравниваются их реактивные моменты, отпадает необходимость иметь рулевой винт и уменьшается непроизводительная затрата мощности двигателя.

Глава

II

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА

§ 4. Общая характеристика

Несущий винт (НВ) является основной частью вертолета. Он предназначен для создания подъемной и движущей сил и управления вертолетом.

Основные части несущего винта — втулка и лопасти.

Лопастки создают силу тяги, необходимую для полета. Втулка соединяет все лопасти и служит для крепления несущего винта к валу, который вращает винт.

По конструктивным признакам несущие винты можно подразделить на три типа:

- с жестким креплением лопастей;
- с шарнирной подвеской лопастей;
- на кардане.

Несущий винт с жестким креплением лопастей (рис. 6) является наиболее простой конструкцией, в этом его основное преимущество. Но этому винту присущи и серьезные недостатки, которые будут рассмотрены в главе IV. Поэтому подобные винты не нашли применения на современных вертолетах. Правда, в настоящее время на некоторых легких вертолетах, например на американских вертолетах Хьюз УН-6А, Хиллер ЕН-1100 и других, применяются несущие винты с рессорным креплением лопастей. Эти винты

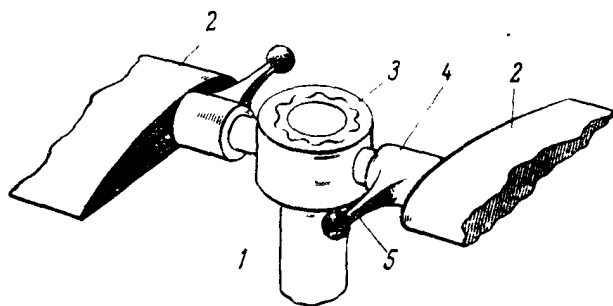


Рис. 6. Несущий винт с жестким креплением лопастей:

1 — вал несущего винта; 2 — лопасть; 3 — втулка; 4 — осевой шарнир; 5 — поводок лопасти

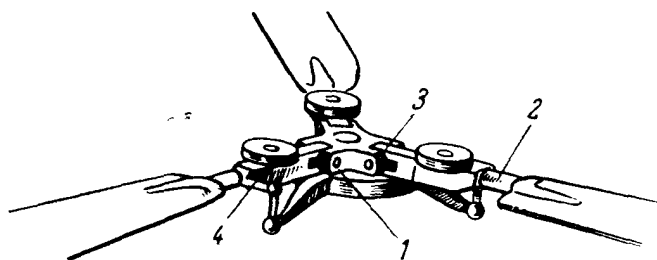


Рис. 7. Несущий винт с шарнирной подвеской лопастей:

1 — втулка; 2 — осевой шарнир; 3 — горизонтальный шарнир; 4 — вертикальный шарнир

можно считать разновидностью винтов с жесткими лопастями.

Втулка несущего винта с жесткими лопастями имеет осевые шарниры, которые позволяют лопастям поворачиваться относительно продольной оси, что необходимо для управления несущим винтом.

Несущий винт с шарнирной подвеской лопастей является наиболее распространенным (рис. 7). Его втулка имеет три шарнира для каждой лопасти: осевой, горизонтальный и вертикальный. Несущий винт на кардане употребляется редко. Его устройство в книге не рассматривается.

Втулки несущих винтов выполняют из легированной стали. Лопасты могут быть металлическими, деревянными и смешанной конструкции, а также из синтетических материалов.

§ 5. Геометрические характеристики

Несущий винт характеризуется определенными геометрическими параметрами: диаметром, формой лопасти в плане, формой профиля, установочным углом лопастей, ометаемой площадью, удельной нагрузкой, коэффициентом заполнения.

Диаметр несущего винта — диаметр окружности, по которой движутся концы лопастей, его принято обозначать буквой D , радиус — R , радиус элемента лопасти — r (рис. 8, а). Относительным радиусом элемента лопасти называется отношение радиуса элемента к радиусу винта:

$$\bar{r} = \frac{r}{R},$$

откуда $r = \bar{r}R$.

Форма лопасти в плане может быть прямоугольная, трапециевидная и смешанная (рис. 8, б).

По форме лопасть похожа на крыло самолета. Передняя кромка лопасти называется ребром атаки, задняя — ребром обтекания.

Трапецевидная лопасть имеет наиболее равномерное распределение аэродинамических сил по длине лопасти. Прямоугольная лопасть проще по конструкции, но имеет несколько худшие аэродинамические характеристики. Наиболее распространенные лопасти — трапецевидные и прямоугольные.

Профиль лопасти — форма сечения лопасти плоскостью, перпендикулярной к продольной оси. Профиль лопасти похож на профиль крыла. Чаще всего применяются двояковыпуклые несимметричные профили (рис. 8, в).

Требования к профилю лопасти:

высокое аэродинамическое качество ($K = \frac{C_y}{C_x}$);

небольшое перемещение центра давления при изменении угла атаки;

способность к самовращению при значительном диапазоне углов атаки.

Профиль лопасти характеризуется относительной толщиной $\bar{c} = \frac{c}{b}$ и относительной кривизной $\bar{f} = \frac{f}{b}$ (рис. 9).

По относительной толщине профили подразделяются на тонкие ($\bar{c} < 8\%$), средние ($\bar{c} = 8 \div 12\%$) и толстые ($\bar{c} > 12\%$). У большинства лопастей относительная толщина $\bar{c} > 12\%$. Применение толстых профилей позволяет увеличивать прочность силовых элементов и жесткость лопасти. Кроме того, аэродинамическое качество меньше зависит от угла атаки при толстых профилях. Эта их особенность улучшает свойства лопасти на режиме самовращения. Обычно у концевых элементов лопасти относительная толщина больше, чем у корневых.

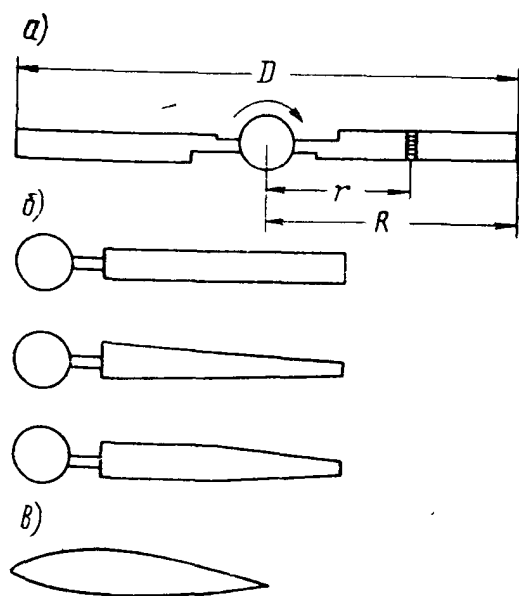


Рис. 8. Параметры несущего винта

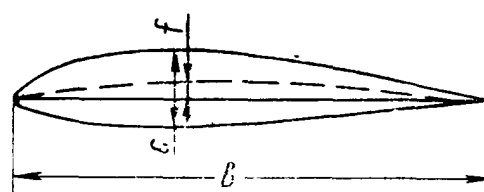


Рис. 9. Параметры профиля лопасти

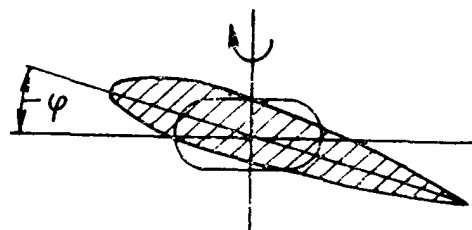


Рис. 10. Установочный угол лопасти

Относительная кривизна лопасти $f=2 \div 3\%$ и приближает форму профиля к симметричной, что способствует уменьшению перемещения центра давления при изменении угла атаки.

Установочным углом элемента лопасти называется угол φ , образованный хордой элемента и плоскостью вращения втулки несущего винта (рис. 10). Установочный угол часто называют шагом элемента лопасти. Это название условное. В более строгом определении шагом элемента лопасти называют расстояние H , которое проходит элемент лопасти за один оборот несущего винта, если элемент движется параллельно хорде

$$H = 2\pi r \operatorname{tg} \varphi.$$

Так как у данного элемента лопасти шаг зависит только от установочного угла φ , то в дальнейшем мы будем отождествлять

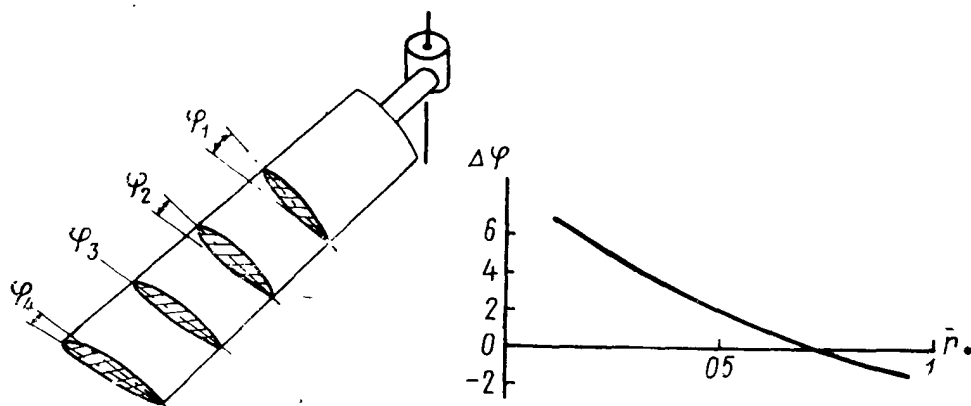


Рис. 11. Геометрическая крутка лопасти

понятие «установочный угол» с понятием «шаг элемента лопасти». У различных элементов лопасти установочные углы будут разными.

За шаг лопасти принимается установочный угол, или шаг элемента лопасти, относительный радиус которого $\bar{r}=0,7$. Этот же угол принимается за установочный угол (шаг) несущего винта.

При повороте лопасти относительно ее продольной оси установочный угол изменяется. Такой поворот возможен благодаря наличию осевого шарнира. Следовательно, осевые шарниры лопастей несущего винта предназначены для изменения шага.

Геометрической круткой лопасти называется изменение шага элементов лопасти по радиусу несущего винта.

У корневых элементов лопасти установочные углы наибольшие, у концевых — наименьшие (рис. 11). Геометрическая крутка улучшает условия работы разных элементов лопасти: углы атаки приближаются к наивыгоднейшим. Это приводит к увеличению силы тяги несущего винта на 5—7%, поэтому геометрическая крутка дает увеличение полезной нагрузки вертолета при постоянной мощности двигателя.

Вследствие геометрической крутки достигается более равномерное распределение нагрузки на силовые элементы лопасти и увеличивается скорость, при которой возникает срыв потока с отступающей лопасти. У большинства лопастей геометрическая крутка не превышает 5—7°.

Под жесткостью понимают способность лопасти сохранять свою форму. При большой жесткости даже сильные нагрузки не способны деформировать конструкцию и внешний вид лопасти. При малой жесткости лопасть становится гибкой и легко поддается деформации, т. е. сильно изгибается и скручивается. Слишком большая гибкость не позволяет придать лопасти наивыгоднейшую крутку. Это ведет к ухудшению аэродинамических характеристик несущего винта.

Для получения большой жесткости необходимо увеличивать габариты силовых элементов, что приводит к увеличению веса лопасти. Излишне большая жесткость приводит к возрастанию вибраций несущего винта.

Наибольшей жесткостью обладают металлические и сплошные деревянные лопасти, но последние имеют большой вес, поэтому применяются только на легких вертолетах.

Площадь, ометаемая несущим винтом, — это площадь круга, который описывают концы лопастей

$$F = \pi R^2 = \pi \frac{D^2}{4}.$$

Эта характеристика несущего винта имеет примерно такое же значение, как площадь крыла самолета, т. е. она подобна площади несущей поверхности.

Удельная нагрузка на ометаемую площадь определяется как отношение веса вертолета к площади, ометаемой несущим винтом

$$P = \frac{G}{F},$$

где P — удельная нагрузка, $\text{кг}/\text{м}^2$;

G — вес вертолета, кг ;

F — ометаемая площадь, м^2 .

У современных вертолетов удельная нагрузка изменяется от 12 до 25 $\text{кг}/\text{м}^2$ (или 120—150 $\text{н}/\text{м}^2$).

Коэффициент заполнения равен отношению суммарной площади лопастей к площади, ометаемой несущим винтом,

$$\sigma = \frac{S_{\text{л}} k}{F},$$

где $S_{\text{л}}$ — площадь одной лопасти, м^2 ;

k — количество лопастей.

У современных несущих винтов количество лопастей может быть от 2 до 6. Чаще всего бывает 3—4 лопасти у легких вертолетов и 5—6 — у тяжелых.

Коэффициент заполнения имеет величину от 0,04 до 0,07. Это значит, что 4—7% площади, ометаемой винтом, занимают лопасти. Чем больше коэффициент заполнения в указанных пределах, тем больше тяга, развиваемая винтом. Но если коэффициент заполнения превышает 0,07, то растут силы сопротивления вращению и снижается к. п. д. несущего винта.

§ 6. Основные режимы работы

Условия работы несущего винта или его режим работы определяются положением несущего винта в потоке воздуха. В зависимости от положения различают два основных режима работы: осевого обтекания и косого.

Режимом осевого обтекания называются такие условия работы несущего винта, при которых ось его втулки расположена параллельно набегающему невозмущенному потоку. На режиме осевого обтекания невозмущенный поток набегаёт перпендикулярно плоскости вращения втулки несущего винта (рис. 12, а). В этом режиме несущий винт работает на стоянке, при висении, при вертикальном наборе высоты и при вертикальном снижении вертолета. Существенной особенностью режима осевого обтекания является то, что положение лопасти вращающегося несущего винта относительно потока, набегающего на винт, не меняется, следовательно, не меняются аэродинамические силы при движении лопасти по кругу.

Режимом косого обтекания называются такие условия работы несущего винта, при которых поток воздуха набегаёт на винт непараллельно оси втулки. Существенное отличие этого режима заключается в том, что при движении лопасти по кругу непрерывно изменяется её положение относительно потока, набегающего на винт. Следствием этого будет изменение скорости обтекания каждого элемента и аэродинамических сил лопасти. Режим косого обтекания имеет место при горизонтальном полёте вертолета и при полёте по наклонной траектории вверх и вниз.

Из определения режимов работы видно, что положение несущего винта в потоке воздуха имеет существенное значение. Это положение определяется углом атаки несущего винта.

Углом атаки несущего винта называется угол A , образованный плоскостью вращения втулки и вектором скорости полёта или невозмущенного потока, набегающего на винт. Угол атаки положителен, если поток набегаёт на винт снизу (рис. 12, б). Если поток набегаёт на винт сверху — угол атаки отрицательный (рис. 12, в). Если же поток воздуха набегаёт на винт параллельно плоскости вращения втулки, угол атаки равен нулю (рис. 12, г).

Нетрудно заметить связь между режимом работы несущего винта и углом атаки:

на режиме осевого обтекания угол атаки несущего винта $A = \pm 90^\circ$;