

# Эксплуатация винтокрылых летательных аппаратов

## Глава 2

1. Общие сведения о вертолетах
- 2. Основы аэродинамики**
3. Аэродинамика полета
4. Органы управления вертолетом
5. Системы вертолета
6. Руководство по летной эксплуатации вертолета
7. Вес и центровка
8. Летные характеристики
9. Основные летные маневры
10. Маневры повышенной трудности
11. Аварийные ситуации на вертолете
12. Полет по приборам
13. Маневры в темное время суток
14. Принятие летных решений
15. Общие сведения об автожирах
16. Аэродинамика автожира
17. Органы управления автожира
18. Системы автожира
19. Руководство по летной эксплуатации автожира
20. Летные маневры
21. Аварийные ситуации на автожире
22. Принятие летных решений на автожире

*Версия 1.0 от 19 февраля 2012 г.*

*Данная книга является переводом учебника «Rotorcraft Flying Handbook», издаваемого  
Федеральной авиационной администрацией США.*

Оригинал текста находится по адресу

<http://www.faa.gov/library/manuals/aircraft/media/faa-h-8083-21.pdf>

Перевод выполнен коллективом сайта AvRussia.ru и предназначен для бесплатного распространения при условии сохранения авторского форматирования, в том числе логотипа и адреса сайта.

Замечания, пожелания и вопросы будут приняты с благодарностью на форуме по адресу  
<http://avrussia.ru/forum/showthread.php?t=137>

# Основы аэродинамики

Во время полета на вертолет действуют четыре силы. Это подъемная сила, вес, тяга и сопротивление. [Рисунок 2-1] Подъемная сила направлена вверх; она создается воздушным потоком, обтекающим аэродинамический профиль. Подъемной силе противодействует сила веса; она создается притяжением Земли и направлена вниз. Тяга - это сила, приводящая вертолет в движение в воздухе. Подъемной силе и тяге противодействует сопротивление, представляющее собой тормозящую силу, которая возникает при развитии подъемной силы и при движении объекта в воздухе.

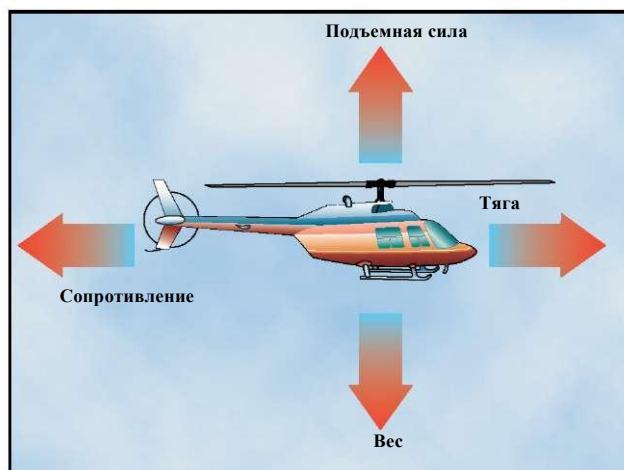


Рисунок 2-1. Во время полета вперед на вертолет действуют четыре силы.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

Перед рассмотрением подъемной силы необходимо ввести некоторые термины, относящиеся к аэродинамике и описывающие аэродинамический профиль и его взаимодействие с воздушным потоком.

Аэродинамический поверхность - это поверхность, например, крыло самолета или лопасть винта вертолета, которая при взаимодействии с движущимся потоком воздуха создает аэродинамическую силу. Хотя существует много разных конструкций аэродинамической поверхности лопасти винта, в обычных условиях полета вертолета все аэродинамические поверхности работают одинаково.

Создатели первых вертолетов строили относительно толстые аэродинамические поверхности из-за их конструктивных характеристик. Поскольку лопасти винта были очень длинными и тонкими, нужно было придавать им дополнительную жесткость. Таким образом предотвращалось чрезмерное опускание лопастей на малых оборотах винтовой системы и минимизировалась закрутка лопастей во время полета. Аэродинамические поверхности были симметричными, то есть верхняя и нижняя поверхности имели одинаковую кривизну.

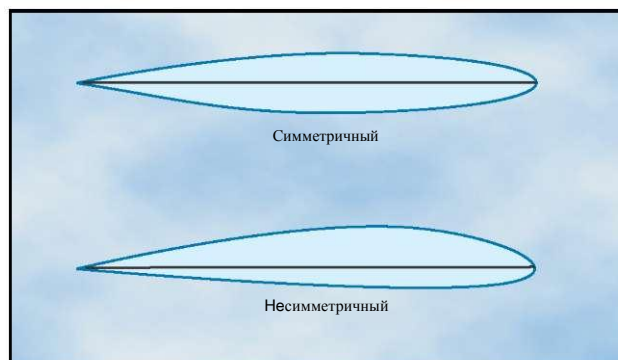


Рисунок 2-2. Верхняя и нижняя поверхности у симметричного аэродинамического профиля одинаковые, а у несимметричного - разные.

Симметричные лопасти очень устойчивы, и это помогает минимизировать закрутку лопастей и необходимое усилие, прикладываемое к органам управления полетом. [Рисунок 2-2] Такая устойчивость достигается путем удерживания центра давления виртуально неизменным при изменениях угла атаки. Центр давления - это воображаемая точка на линии хорды, в которой концентрируется результирующая сила действия всех аэродинамических сил.

Сегодня конструкторы используют более тонкие аэродинамические профили, а необходимая прочность обеспечивается за счет использования композитных материалов. К тому же аэродинамические поверхности несимметричны по своей конструкции, то есть верхняя и нижняя поверхности имеют разную кривизну. Обычно эти аэродинамические поверхности менее устойчивые, но эту ситуацию можно исправить изгибом задней кромки крыла и получить такие же характеристики, что и у симметричных аэродинамических поверхностей. Это называется "отражением". При использовании такого типа лопастей винт способен работать с более высокой скоростью.

Одна из причин меньшей устойчивости несимметричной лопасти винта заключается в том, что при изменении угла атаки центр давления перемещается. Если центр действия подъемной силы находится за осью поворота лопасти винта, он стремится заставить плоскость вращения винта кабрировать. Когда угол атаки увеличивается, центр давления перемещается вперед. Если он перемещается в положение перед осью поворота, угол тангажа плоскости вращения винта уменьшается. Поскольку угол атаки лопастей винта в течение каждого оборота все время меняется, лопасти еще сильнее стремятся совершать маховые движения, флюгировать, быть ведущими и ведомыми.

Если речь идет об аэродинамической поверхности, размах - это расстояние от втулки винта до законцовки лопасти. Крутка лопасти - это изменение линии хорды от корня лопасти до ее законцовки.



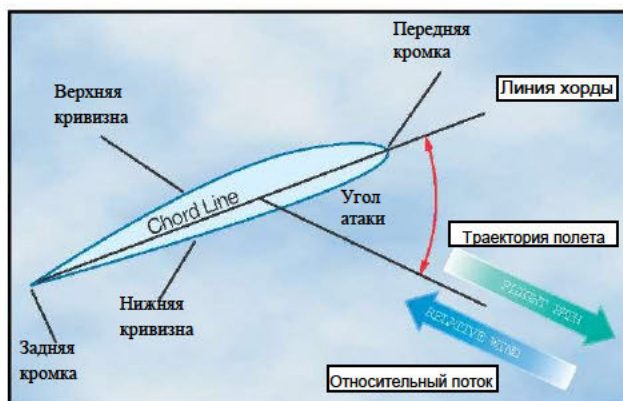


Рисунок 2-3. Аэродинамические параметры поверхности.

Благодаря крутке лопасти винта увеличивается подъемная сила, действующая по размаху лопасти. Это необходимо, так как в направлении от корня к законцовке угловая скорость растет. Передняя кромка лопасти сталкивается со встречным воздушным потоком первой. [Рисунок 2-3] Задняя кромка - это задняя часть лопасти, на которой воздушный поток, проходящий над верхней поверхностью, соединяется с потоком, идущим под нижней поверхностью. Линия хорды - это воображаемая прямая, идущая от передней до задней кромки. Кривизна - это криволинейность верхней и нижней поверхностей аэродинамической поверхности. Относительный поток - это воздушный поток, в котором движется аэродинамическая поверхность. Направление этого потока зависит от тангажа, или положения, аэродинамической поверхности, а его направление может быть только параллельным, противоположным траектории полета аэродинамической поверхности или совпадать с ним. Угол атаки - это угол между линией хорды лопасти и направлением относительного потока.

### ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОТОК

Относительный поток создается за счет движения аэродинамической поверхности в воздухе, движения воздуха мимо аэродинамической поверхности или за счет их комбинации. На относительный поток может влиять целый ряд факторов, в том числе вращение лопастей винта, горизонтальное перемещение вертолета, маховые движения лопастей винта, а также скорость и направление ветра.

Для вертолета относительный поток представляет собой движение воздуха относительно лопастей винта. Если винт неподвижен, относительный поток может создаваться ветром, дующим на лопасти. Если вертолет висит, и ветра нет, относительный поток создается движением лопастей несущего винта в воздухе. Если вертолет висит, и ветер имеется, относительный поток будет представлять собой комбинацию ветра и движения лопастей винта в воздухе. Если вертолет выполняет горизонтальный полет, относительный поток будет представлять собой комбинацию вращения лопастей винта и горизонтальной скорости вертолета.

Ось вращения—Воображаемая линия, вокруг которой вращается винт. Это линия, проходящая через центр плоскости вращения концов лопастей перпендикулярно этой плоскости.

Плоскость вращения законцовок лопастей - Воображаемая плоскость окружности, которую описывают законцовки лопастей винта за один оборот.

### УГОЛ ТАНГАЖА ЛОПАСТИ

Угол тангажа лопасти винта - это угол между его линией хорды и базовой плоскостью, проходящей через втулку винта. [Рисунок 2-4] Угол тангажа лопастей контролируется органами управления полетом. Общий шаг меняет тангаж всех лопастей винта, независимо от того, где они расположены в плоскости вращения винта, и используется для управления тягой несущего винта. Рычаг управления циклическим шагом меняет тангаж отдельной лопасти в зависимости от ее расположения в плоскости вращения. Это позволяет балансировать вертолет по тангажу и по крену во время горизонтального полета и при выполнении маневров в любых летных условиях.

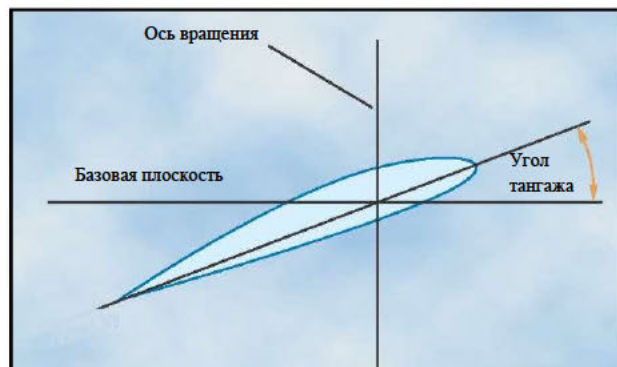


Рисунок 2-4. Не путайте ось вращения с колонкой винта. Они совпадают, только когда плоскость вращения концов лопастей перпендикулярна колонке винта.

### УГОЛ АТАКИ

Когда угол атаки увеличивается, воздушный поток, проходящий над аэродинамической поверхностью, отклоняется на большее расстояние, что приводит к увеличению скорости потока и подъемной силы. Если угол атаки продолжает увеличиваться, воздуху становится все труднее плавно проходить над аэродинамической поверхностью. В этой точке воздушный поток отделяется от аэродинамической поверхности, и происходит срыв потока, или турбулентность. Турбулентность приводит к сильному повышению сопротивления и потере подъемной силы в той области, где она происходит. Увеличение угла атаки увеличивает подъемную силу до тех пор, пока не будет достигнут критический угол атаки. Любое дальнейшее увеличение угла атаки после этой точки вызывает срыв и резкое сокращение подъемной силы. (Рисунок 2-5)

Угол атаки не нужно путать с углом тангажа. Угол тангажа определяется направлением относительного потока. Можно изменить угол атаки, поменяв угол тангажа с помощью органов управления вертолетом. Если угол тангажа увеличивается, угол атаки тоже растет, а если угол тангажа уменьшается, угол атаки уменьшается вместе с ним. (Рисунок 2-6)

Тангаж вертолета - Движение вертолета вокруг поперечной оси. Смещение рычага циклического шага на себя или от себя заставляет нос вертолета подниматься и опускаться.

Крен вертолета - Перемещение вертолета вокруг продольной оси, идущей от носа к хвосту. Перемещение рычага циклического шага вправо или влево заставляет вертолет наклоняться в соответствующем направлении.



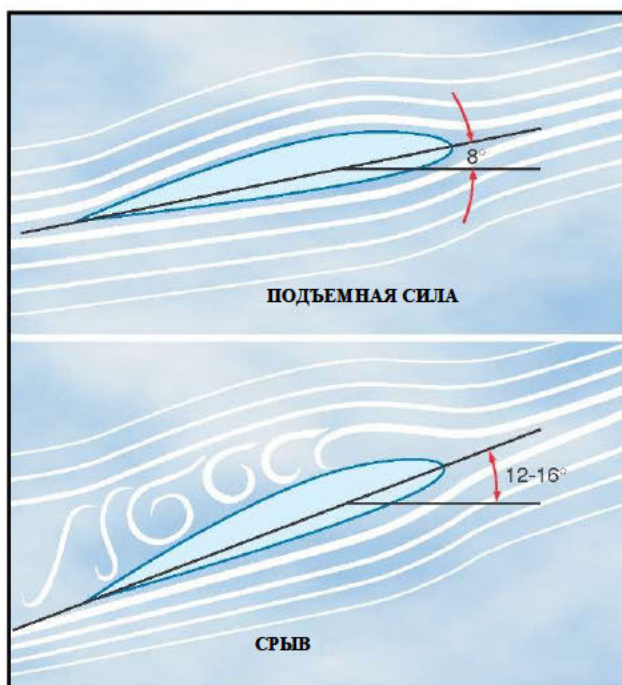


Рисунок 2-5. Если угол атаки увеличивается, точка отрыва, лежащая возле задней кромки аэродинамической поверхности, начинает двигаться вперед. В конце концов аэродинамическая поверхность теряет подъемную силу и происходит срыв.

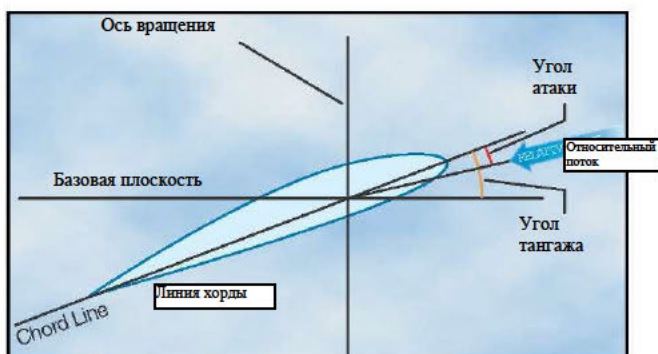


Рисунок 2-6. Угол атаки может быть больше, меньше или равным углу тангажа.

## ПОДЪЕМНАЯ СИЛА

### ЭФФЕКТ МАГНУСА

Объяснить действие подъемной силы проще всего, если рассмотреть цилиндр, вращающийся в воздушном потоке. Скорость в точке возле цилиндра складывается из скорости воздушного потока и угловой скорости вращения цилиндра, которая уменьшается с удалением от цилиндра. Если цилиндр вращается так, что площадь верхней поверхности вращается в том же направлении, что и воздушный поток, скорость в точке возле поверхности будет высокой сверху и низкой внизу.

Как видно из рисунка 2-7, в точке "А" существует область остановки потока, в которой струя воздушного потока, сталикиваясь с поверхностью, разделяется; часть потока идет поверху, а часть - понизу. В точке "В" есть еще одна область остановки потока, в которой две струи воссоединяются и продолжают двигаться с одинаковыми скоростями.



Рисунок 2-7. Эффект Магнуса заключается в том, что вращающийся цилиндр создает разность давлений и вызывает подъемную силу. Благодаря тому же эффекту делается крученый мяч в бейсболе или резанный удар в гольфе.

Теперь мы имеем снос потока вверх перед вращающимся цилиндром и снос потока вниз за ним.

Разность поверхностных скоростей вызывает разность давлений, причем давление сверху ниже, чем давление снизу. Область низкого давления создает направленную вверх силу, известную как эффект Магнуса. Эта механически индуцированная циркуляция показывает взаимосвязь циркуляции и подъемной силы.

Аэродинамическая поверхность с положительным углом атаки создает циркуляцию воздуха, поскольку острая задняя кромка заставляет заднюю точку остановки потока оставаться сзади задней кромки, в то время как передняя точка остановки потока находится ниже передней кромки. (Рисунок 2-8)

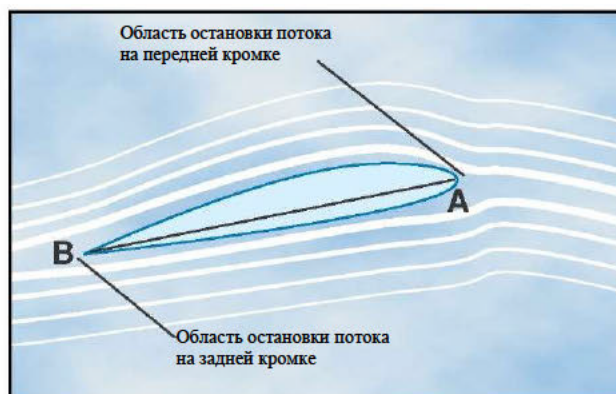


Рисунок 2-8. Циркуляция воздуха вокруг аэродинамической поверхности происходит, когда передняя точка остановки потока находится ниже передней кромки, а задняя точка остановки потока располагается за задней кромкой.

### ЗАКОН БЕРНУЛЛИ

Воздух, проходящий над верхней поверхностью, ускоряется. Теперь на аэродинамической поверхности действует закон Бернулли и его следствие, эффект Вентури. Поскольку скорость воздуха, проходящего через ограниченную часть трубки Вентури, повышается, давление падает.



Рисунок 2-9. Верхняя поверхность аэродинамического профиля аналогична препятствию в трубке Вентури.

Сравните верхнюю поверхность аэродинамического профиля с препятствием в трубке Вентури, которая сужается посередине. (Рисунок 2-9)

Верхней половиной трубки Вентури могут служить слои невозмущенного воздуха. Таким образом, когда воздух проходит над верхней поверхностью аэродинамического профиля, кривизна аэродинамической поверхности вызывает повышение скорости воздушного потока. Повышение скорости воздушного потока приводит к понижению давления на верхней поверхности аэродинамического профиля. В то же время, воздух протекает вдоль нижней поверхности аэродинамического профиля, создавая давление. Сочетание пониженного давления на верхней поверхности и повышенного давления на нижней поверхности и есть подъемная сила. (Рисунок 2-10)

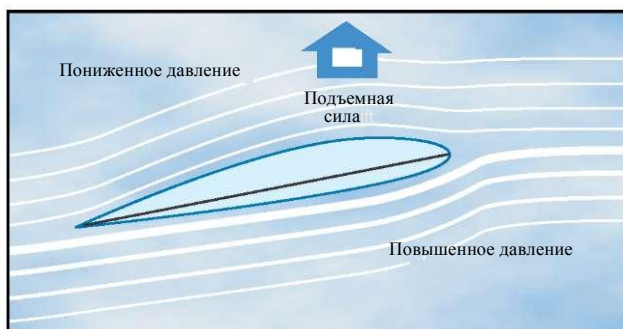


Рисунок 2-10. Подъемная сила возникает, когда имеется пониженное давление над аэродинамической поверхностью и повышенное давление под ней.

Когда угол атаки увеличивается, подъемная сила растет. Перед аэродинамической поверхностью образуется более сильный скошенный вверх поток, поскольку область остановки потока у передней кромки перемещается под переднюю кромку, а за задней кромкой образуется более сильный скошенный вниз поток. Суммарная подъемная сила перпендикулярна относительному потоку. Итак, создание подъемной силы основано на возникновении циркуляции воздушного потока, создаваемой аэродинамической поверхностью (эффект Магнуса), и создании разности давлений на аэродинамическую поверхность.

### ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Нижняя поверхность лопасти винта создает дополнительную подъемную силу, так как воздух, ударяющий в нее снизу,

отражается и идет вниз. Согласно третьему закону Ньютона, любое действие вызывает равное по силе противодействие, и воздух, отраженный вниз, также создает силу противодействия, направленную вверх.

Поскольку воздух во многом подобен воде, объяснение этого источника подъемной силы можно сравнить с эффектом глиссирования водных лыж. Подъемная сила, удерживающая водные лыжи (и самого лыжника) - это сила, вызванная действием давления и отражением воды от нижних поверхностей лыж.

Чаще всего летные условия таковы, что скоростной напор и отражение воздушного потока от нижней поверхности лопасти винта вносят относительно малый вклад в суммарную подъемную силу. Основная часть подъемной силы возникает как результат пониженного давления над лопастью, а не как результат повышенного давления под ней.

### ВЕС

Обычно вес является известной, фиксированной величиной, например, вес вертолета, топлива или пассажиров. Чтобы поднять вертолет с земли вертикально вверх, несущему винту нужно создать достаточную подъемную силу, чтобы преодолеть или компенсировать суммарный вес вертолета с пассажирами. Это достигается путем увеличения угла тангажа лопастей несущего винта.

На вес вертолета могут влиять аэродинамические нагрузки. Если наклонить вертолет, поддерживая постоянную высоту, возникнет перегрузка. Коэффициент перегрузки - это отношение нагрузки, выдерживаемой несущим винтом, к фактическому весу вертолета и его содержимого. При стабильном полете коэффициент перегрузки вертолета равен единице, а это значит, что система несущего винта поддерживает фактический суммарный вес вертолета. Если увеличить крен до 60°, продолжая удерживать постоянную высоту, коэффициент перегрузки увеличивается вдвое. В этом случае несущий винт должен выдерживать удвоенный вес вертолета и его содержимого. (Рисунок 2-11)

Нагрузка на диск вертолета - это отношение веса к суммарной площади ометаемого несущим винтом диска. Она рассчитывается путем деления суммарного веса вертолета на площадь плоскости вращения винта, которая равна площади, ометаемой лопастями винта. Чтобы найти площадь ометаемого диска, необходимо взять размах одной лопасти винта за радиус окружности, а затем рассчитать площадь, которую проходят лопасти за полный оборот. Когда вертолет маневрирует, нагрузка на диск меняется. Чем выше нагрузка, тем больше мощности нужно, чтобы поддерживать скорость винта.

Стабильный полет—Состояние, при котором летательный аппарат выполняет горизонтальный полет по прямой без ускорения, и все действующие силы уравновешиваются





Рисунок 2-11. Диаграмма коэффициента перегрузки позволяет рассчитать величину приложенной перегрузки при разных углах крена.

## ТЯГА

Тяга, как и подъемная сила, создается благодаря вращению несущего винта. У вертолета тяга может быть прямой, обратной (задней), боковой или вертикальной. Направление движения вертолета определяется результирующей подъемной силы и силы тяги.

Покрытие винта - это отношение суммарной площади лопастей винта, складывающейся из площадей всех лопастей несущего винта, к суммарной площади ометаемого винтом диска. Это отношение позволяет измерить потенциальную тягу, которую может развить система винта.

Хвостовой винт также создает тягу. Величиной его тяги можно управлять с помощью педалей компенсации реактивного момента, чтобы контролировать **рыскание** вертолета.

## СОПРОТИВЛЕНИЕ

Соппротивлением называется сила, противодействующая движению вертолета в воздухе и возникающая вместе с подъемной силой. Соппротивление всегда действует параллельно относительному потоку. Суммарное сопротивление складывается из трех типов сопротивления: профильного, индуктивного и паразитного.

### ПРОФИЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Профильное сопротивление создается в результате трения лопастей, рассекающих воздух. Оно не меняется сколько-нибудь значительно с изменением угла атаки аэродинамической поверхности, но умеренно повышается при увеличении приборной скорости. Профильное сопротивление складывается из сопротивления формы и трения обшивки.

Сопротивление формы происходит из-за турбулентной спутной струи, возникающей при отрыве воздушного потока от поверхности конструкции. Величина сопротивления зависит от размера и формы конструкции, рассекающей относительный поток. (Рисунок 2-12)

Трение обшивки вызвано неровностями поверхности. Даже если поверхность кажется абсолютно гладкой, под микроскопом на ней всегда можно найти неровности. Тонкий слой воздуха цепляется за неровности поверхности и создает маленькие завихрения, которые и составляют сопротивление.

### ИНДУЦИРОВАННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Индуктивное сопротивление создается благодаря вращению воздушного потока вокруг лопасти винта, создающей подъемную силу. На задней кромке и законцовках лопасти область высокого давления под лопастью соединяется с воздухом низкого давления над лопастью. Это вызывает спиральный, или вихревой поток, который возникает за каждой лопастью, как только появляется подъемная сила. Эти завихрения отклоняют воздушный поток вниз от лопасти, таким образом усиливая скошенный вниз поток. Поэтому лопасть работает в усредненном относительном потоке, проходящем возле лопасти вниз и назад. Поскольку подъемная сила, создаваемая лопастью, перпендикулярна

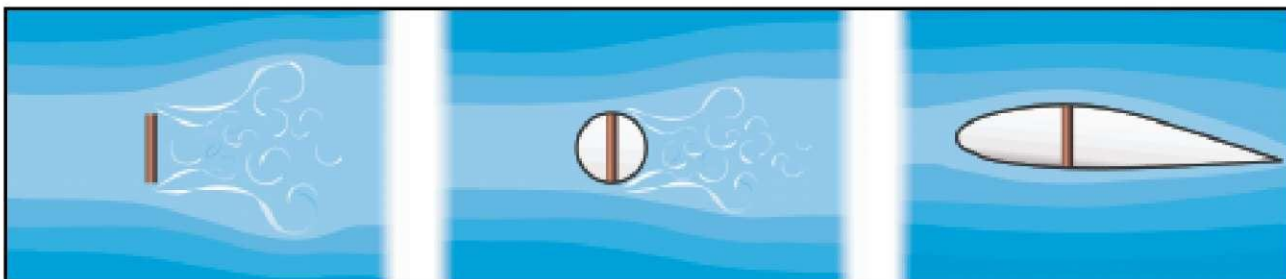


Рисунок 2-12. Возникновение сопротивления формы легко визуализировать, если представить воздушный поток вокруг плоской пластины. Прямой курс уменьшает сопротивление формы, ослабляя отрыв воздушного потока.

**Рыскание вертолета -**  
Перемещение вертолета вокруг вертикальной оси.

относительному потоку, подъемная сила направлена в такой же степени назад. Компонента подъемной силы, направленная назад - это индуцированное сопротивление. (Рисунок 2-13)

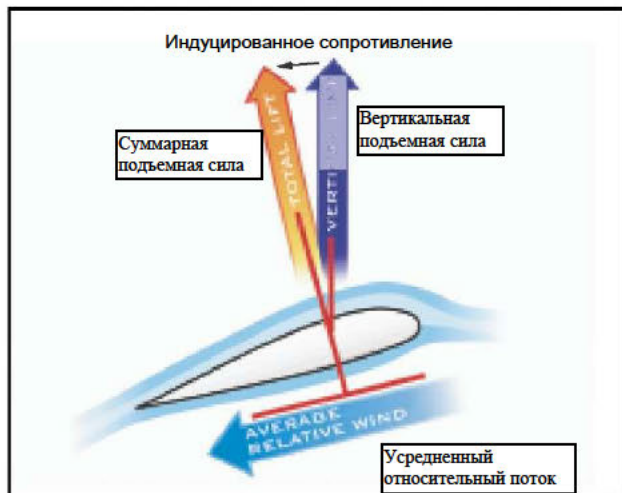


Рисунок 2-13. Возникновение индуцированного сопротивления связано с отклонением воздушного потока вниз возле лопасти винта.

Поскольку разность давления воздуха растет с ростом угла атаки, образуются более сильные завихрения, и индуцированное сопротивление растет. Поскольку угол атаки лопасти обычно ниже на более высокой приборной скорости и выше при более низкой скорости, индуцированное сопротивление уменьшается с ростом приборной скорости и увеличивается при снижении приборной скорости. Индуцированное сопротивление - главная причина сопротивления на низких приборных скоростях.

#### ПАРАЗИТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Паразитное сопротивление присутствует все время, пока вертолет перемещается в воздухе. Этот тип сопротивления растет с ростом приборной скорости. Не создающие подъемной силы компоненты вертолета - кабина, колонка винта, хвост и шасси, вносят свой вклад в паразитное сопротивление. Любое снижение кинетической энергии воздушного потока из-за таких факторов, как, например, отверстия для охлаждения двигателя, создает дополнительное паразитное сопротивление. Из-за быстрого

нарастания паразитного сопротивления с ростом приборной скорости паразитное сопротивление является главной причиной сопротивления на высоких приборных скоростях. Паразитное сопротивление меняется пропорционально квадрату скорости. При удвоении приборной скорости паразитное сопротивление увеличивается в четыре раза.

#### СУММАРНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Суммарное сопротивление вертолета является суммой трех видов сил сопротивления. [Рисунок 2-14] С ростом приборной скорости паразитное сопротивление усиливается, а индуцированное падает. Профильное сопротивление остается относительно постоянным во всем диапазоне скоростей и незначительно усиливается на более высоких приборных скоростях. Все силы сопротивления, сложенные вместе, дают кривую суммарного сопротивления. Нижняя точка кривой суммарного сопротивления показывает приборную скорость, на которой сопротивление минимальное. Это точка максимального отношения подъемной силы к сопротивлению, которая называется  $L/D_{max}$ . На этой скорости наблюдается самое предпочтительное соотношение суммарной подъемной силы вертолета и его суммарного сопротивления. Это важный параметр вертолета.

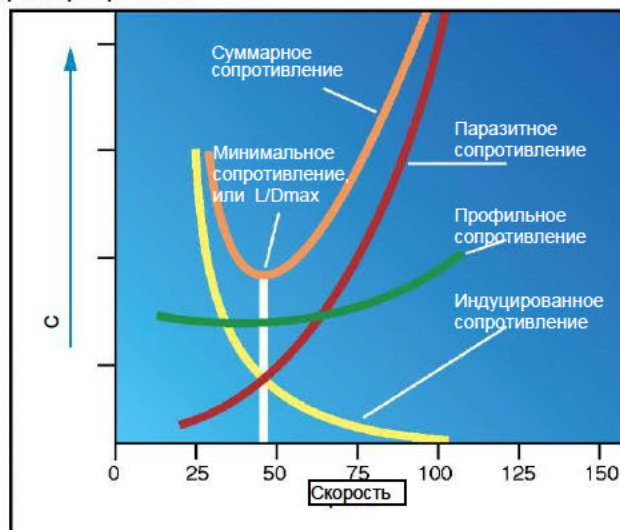


Рисунок 2-14. Кривая суммарного сопротивления показывает сумму сил паразитного, профильного и индуцированного сопротивления. Она показывает зависимость сопротивления от приборной скорости.

$L/D_{max}$  — Максимальное отношение суммарной подъемной силы ( $L$ ) к суммарному сопротивлению ( $D$ ). В этой точке обеспечивается наименьшая скорость планирования. Любое отклонение от наименьшей скорости планирования усиливает сопротивление и сокращает дальность планирования.