

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

ПЛАНИРОВАНИЕ САМОЛЕТА

Прямолинейное и равномерное движение самолета по наклонной вниз траектории называется **планированием или установившимся снижением**.

Угол, образованный траекторией планирования и линией горизонта, называется **углом планирования** $\theta_{пл}$.

Снижение может производиться как при наличии тяги, так и при ее отсутствии.

Планирование есть частный случай снижения самолета, при котором самолет снижается с выключенным двигателем или двигателем, работающим на малых оборотах, с тягой, практически равной нулю. Планирование самолетов производится с целью уменьшения высоты полета и для полета к месту посадки.

Для планеров планирование является основным режимом полета. Планирование с углами $\theta_{пл}$, превышающими 30° , называется пикированием.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА САМОЛЕТ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ

При планировании на самолет действуют сила веса самолета G , и полная аэродинамическая сила R . Так как движение самолета осуществляется по наклонной вниз траектории, то силы действуют следующим образом.

1. Сила веса G направлена вертикально вниз и раскладывается на две составляющие: в направлении, перпендикулярном траектории движения - $G_1 = G \cdot \cos \theta_{пл}$, и в направлении движения самолета - $G_2 = G \cdot \sin \theta_{пл}$.

2. Полная аэродинамическая сила R раскладывается на:

- подъемную силу Y , уравновешивающую силу G_1 , чем обеспечивается прямолинейность движения;
- силу лобового сопротивления, уравновешивающую силу G_2 , что обеспечивает постоянство скорости движения по траектории.

Поскольку планирование рассматривается как плоское поступательное установившееся движение самолета, то линии действия всех сил, действующих на самолет, пересекаются в его центре тяжести.

Так как при планировании самолет движется прямолинейно и равномерно, то все силы должны быть взаимно уравновешены, и самолет в этом случае будет двигаться по инерции.

Для того чтобы движение самолета было прямолинейным, необходимо равновесие сил, действующих перпендикулярно траектории движения.

Условие прямолинейности движения является равенство сил Y и G_1

$$Y = G_1 = G \cdot \cos \theta_{пл}. \quad (6.1)$$

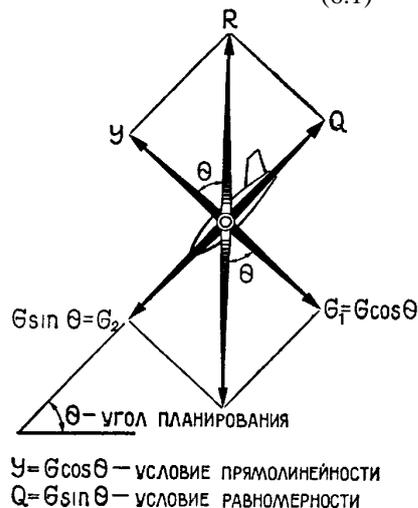


Рис. 1 Схема сил, действующих на самолет при планировании

Для того чтобы самолет двигался равномерно, необходимо силы, действующие вдоль траектории, взаимно уравновесить. Условие равномерности движения является равенство сил G_2 и Q

$$Q = G_2 = G \cdot \sin \theta_{пл}. \quad (6.2)$$

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

Следовательно, при отсутствии тяги уравнения движения центра тяжести самолета при планировании будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} Y &= G \cdot \cos \theta_{пл} \\ Q &= G \cdot \sin \theta_{пл} \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

Эти два уравнения тесно связаны между собой и при нарушении одного из них нарушается и другое.

Равнодействующая сил Y и Q , т. е. полная аэродинамическая сила R , при планировании всегда направлена вверх и равна полетному весу самолета.

$$R = G. \quad (6.4)$$

Из уравнений движения при планировании можно сделать следующие выводы:

1. Подъемная сила при планировании меньше, чем в горизонтальном полете на том же угле атаки, так как она уравновешивает только часть силы веса G_1 . С увеличением угла планирования составляющая силы веса G_1 уменьшается, следовательно, должна уменьшаться и подъемная сила Y .

2. Составляющая силы веса G_2 при планировании выполняет роль тяги. Если угол планирования увеличивается, то сила G_2 тоже увеличивается, что вызывает увеличение скорости движения по траектории, а это в свою очередь вызовет увеличение силы лобового сопротивления Q , которая уравновесит G_2 , и движение снова станет равномерным.

ПОТРЕБНАЯ СКОРОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ.

ПРЕДЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ САМОЛЕТА

Потребной скоростью планирования называется скорость по траектории, необходимая для создания подъемной силы, равной нормальной составляющей веса самолета $G \cos \theta$ на данном угле атаки:

$$G \cos \theta = Y = C_y \frac{\rho V_{пл}^2}{2} S,$$

откуда

$$V_{пл} = \sqrt{\frac{2G}{C_y \rho S} \cos \theta} = V_{пл} \sqrt{\cos \theta}. \quad (6.5)$$

Максимальная скорость планирования может превышать максимальную скорость горизонтального полета.

Так, например, при крутом или отвесном пикировании, когда самолет летит на очень малых углах атаки, можно получить большие скорости по сравнению с горизонтальным полетом.

Предельная скорость полета самолета на планировании - это скорость установившегося пикирования на угле атаки нулевой подъемной силы. Эта скорость определяется из равенства $X=G$. Подставив значение развернутой формулы лобового сопротивления и решив уравнение относительно $V_{пред}^2$, получим (в м/с)

$$V_{пред} = \sqrt{\frac{2G}{C_x \rho S}}. \quad (6.6)$$

Предельная скорость планирования при отвесном пикировании самолетов Як-52 и Як-55 превышает максимальную скорость горизонтального полета почти в 3 раза. На практике ее достичь невозможно из-за ограничения прочности самолетов.

УГОЛ ПЛАНИРОВАНИЯ САМОЛЕТА

Для определения угла планирования запишем уравнение движения самолета в следующем виде

$$G \sin \theta = X,$$

$$G \cos \theta = Y.$$

Разделив первое равенство на второе, получим

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X}{Y} = \frac{1}{K}. \quad (6.7)$$

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

Из полученной формулы видно, что угол планирования зависит только от аэродинамического качества самолета. Следовательно,

$$\operatorname{tg}\theta_{\text{МИН}} = \frac{1}{K_{\text{МАКС}}}.$$

Минимальный угол планирования достигается при наивыгоднейшем угле атаки, когда аэродинамическое качество самолета достигает максимального значения:

Для самолета Як-52 - $\theta_{\text{МИН}} = 5^\circ$ (с убранными шасси и посадочными щитками при нулевой тяге двигателя).

Для самолета Як-55 - $\theta_{\text{МИН}} = 6^\circ$ (при нулевой тяге двигателя).

При планировании с работающим двигателем угол планирования можно подсчитать по формуле

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{1}{K} - \frac{P}{G}. \quad (6.8)$$

При выпуске шасси и посадочных щитков на самолете Як-52 аэродинамическое качество уменьшается, а угол планирования увеличивается.

Угол планирования можно определить графически по поляре самолета (если она построена в одинаковых масштабах для C_y и C_x), проведя из начала координат вектор к соответствующей точке кривой (Рис. 2, а, б). Угол, образованный вектором и осью C_y , покажет величину угла планирования.

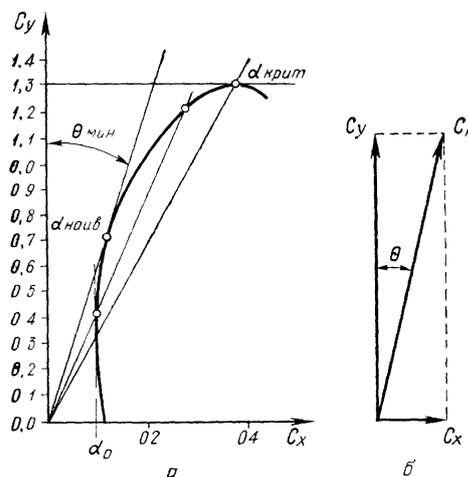


Рис. 2 Примерный вид поляры самолета в одинаковых масштабах для C_y и C_x

Минимальный угол планирования $\theta_{\text{МИН}}$ получим, проведя касательную к кривой из начала координат.

Из рисунка видно, что каждая прямая, кроме касательной, проведенная к кривой из начала координат, пересекает эту кривую в двух точках, отмечая два угла с одинаковым качеством. Следовательно, один и тот же угол планирования может быть при малом угле атаки и большой скорости, и при большом угле атаки и при малой скорости.

Так как качество самолета зависит только от угла атаки, то, следовательно, угол планирования от высоты полета и веса самолета, при условии, что вес самолета увеличен без прироста C_x , не зависит.

ПОЛЯРА СКОРОСТЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ

График, показывающий зависимость вертикальной скорости снижения от поступательной скорости на различных углах атаки, называется **полярной скоростью планирования или указательницей глиссад планирования**.

Для построения поляры скоростей планирования необходимо иметь поляру самолета (планера). Расчет поляры скоростей планирования производят с помощью таблицы для нескольких высот полета.

Задавшись рядом значений углов атаки, определяем величины коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления.

Определив C_y и C_x и зная полетный вес самолета (планера) и высоту полета, рассчитывают, как показано в таблице, значения аэродинамического качества, угла планирования, скорости планирования, скорости снижения для каждого угла атаки.

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

По расчетным данным строят поляру скоростей планирования (Рис. 3). По поляре скоростей планирования можно определить ряд характерных скоростей и режимов планирования.

1. Экономическая скорость планирования и соответствующий ей экономический угол атаки определяются проведением параллельно оси абсцисс касательной к поляре скоростей. В точке касания находится экономический угол атаки, а перпендикуляр, восстановленный из точки касания на ось скоростей планирования, обозначит экономическую скорость планирования. Планирование на экономической скорости будет происходить с наименьшей скоростью снижения $V_{y\text{мин}}$.

2. Наивыгоднейшую скорость планирования и наивыгоднейший угол атаки $\alpha_{\text{наив}}$ можно найти проведением касательной из начала координат к поляре скоростей. В точке касания находим угол атаки, в точке пересечения перпендикуляра, восстановленного из точки касания с осью скорости, - наивыгоднейшую скорость. На этой скорости угол снижения θ минимальный, а дальность планирования - максимальная.

3. Два угла атаки (α_1 и α_2) при одинаковом угле снижения находятся, если из начала координат провести секущую к поляре скоростей. Так же как на поляре самолета ($C_y = f(C_x, \alpha)$), на поляре скоростей планирования определяются два режима планирования I и II, границей раздела которых является наивыгоднейшая скорость полета.

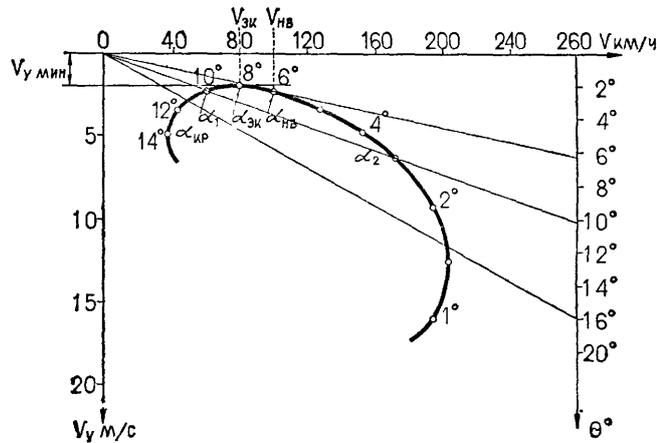


Рис. 3 Поляра скоростей планирования

Наибольшее применение поляры скоростей планирования имеет в планеризме; она более удобна для практического использования, чем обычная поляра планера, так как на ней нанесены характеристики, непосредственно измеряемые в полете. Для планериста важно: зная фактический диапазон скоростей полета планера, выбрать такие значения горизонтальных скоростей, которые удовлетворяли бы заданному режиму снижения ($V_{\text{усн}}$).

ДАЛЬНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ

Расстояние, проходимое самолетом (планером) относительно земли за время планирования с данной высоты, называется дальностью планирования. Она является одной из важнейших характеристик самолета и особенно планера.

Найдем, какое расстояние пролетит самолет с высоты H , если угол планирования его равен $\theta_{\text{пл}}$.

Из Рис. 4 видно, что $L_{\text{пл}}$ - это расстояние, проходимое самолетом относительно земли, которое называется дальностью планирования.

Из Рис. 4 определим

$$\text{tg} \theta_{\text{пл}} = \frac{H}{L_{\text{пл}}}. \quad (6.9)$$

Но так как при планировании

$$\text{tg} \theta = \frac{1}{k},$$

то получим

$$\frac{H}{L_{\text{пл}}} = \frac{1}{k}, \quad (6.10)$$

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

откуда находим

$$L_{пл} = H \cdot k. \quad (6.11)$$

Из формулы (6.11) следует, что дальность планирования увеличивается с увеличением высоты полета и аэродинамического качества самолета. Наибольшая дальность может быть достигнута при полете на наивыгоднейшем угле атаки, так как в этом случае аэродинамическое качество имеет максимальную величину.

Скорость, при которой достигается наибольшая дальность планирования, называется скоростью наибольшей дальности планирования. Эта скорость по своей величине близка к наивыгоднейшей скорости горизонтального полета.

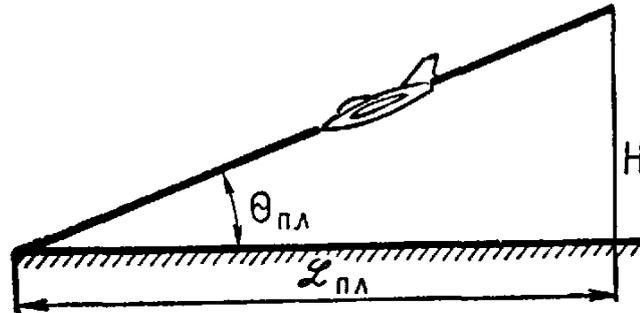


Рис. 4 К определению дальности планирования

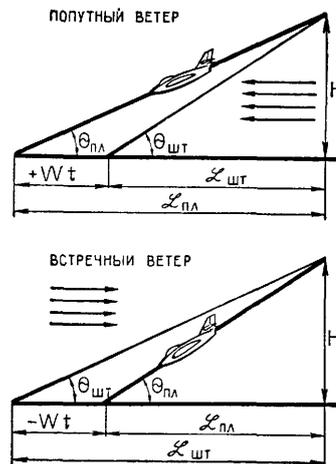


Рис. 5 Влияние ветра на дальность планирования

Рассмотрим факторы, влияющие на дальность планирования.

1. Вес самолета, как можно заключить из формулы (6.11), на дальность планирования влияния не оказывает. Изменение веса самолета сказывается только на скорости планирования. Эти выводы верны при полете в штиль.

2. При наличии ветра дальность полета изменяется так, как изменяется путевая скорость. Движение самолета при наличии ветра состоит из движения его относительно воздуха и перемещения его воздухом относительно земли со скоростью ветра.

Дальность планирования в этом случае определяется по формулам:

$$\begin{aligned} L_{пл} &= H \cdot k + W \cdot t \text{ — при попутном ветре} \\ L_{пл} &= H \cdot k - W \cdot t \text{ — при встречном ветре} \end{aligned} \quad (6.12)$$

где t - время планирования, с;

W - скорость ветра, м/с.

При наличии ветра вес самолета оказывает некоторое влияние на дальность планирования, так как с увеличением веса самолет планирует с большей скоростью (на том же угле атаки), время на планирование затрачивается меньше, поэтому путь, на который он относится ветром ($W \cdot t$), окажется тоже меньше, а, следовательно, и дальность также будет меньше, чем в безветрии.

3. Влияние механизации крыла. Отклонение закрылков или посадочных щитков всегда сопровождается уменьшением аэродинамического качества, вследствие чего ухудшаются характеристики

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

снижения: увеличиваются вертикальная скорость и угол планирования, уменьшается дальность планирования.

Как следует из формулы (6.5), помимо аэродинамического качества, на вертикальную скорость снижения оказывает влияние удельная нагрузка на крыло $\frac{G}{S}$.

Для современных самолетов, даже при относительно хороших значениях аэродинамического качества, из-за большой удельной нагрузки на крыло скорости снижения достигают больших величин.

Планеры предназначены для парящих полетов, т. е. таких полетов, в которых вертикальная скорость снижения планера должна быть меньше вертикальной скорости воздуха в восходящих потоках. Потому планеры, имея значительно меньшую удельную нагрузку на крыло и большие значения аэродинамического качества (доходит до 50), могут в восходящих потоках совершать полеты без потери высоты и даже увеличивать ее, т. е. совершать парящий полет.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ПЛАНИРОВАНИЕ

Так же, как и в наборе высоты, на планировании ветер не влияет на скорость и угол атаки. Летные качества самолета остаются неизменными относительно воздушной среды, изменяется только дальность планирования.

Рассмотрим планирование самолета при безветрии, встречном и попутном ветре. Пусть самолет планирует с высоты H в некоторую точку A на определенном режиме (Рис. 6, а). При встречном ветре самолет будет сноситься ветром назад со скоростью U . Сложив скорость планирования и скорость ветра по правилу треугольника, получим скорость полета самолета относительно земной поверхности $V_{зем}$. Относительно земной поверхности угол планирования увеличивается, а относительно воздушной среды остается прежним (Рис. 6, б). Летчику будет казаться, что он планирует в точку A , а на самом деле в точку M . Дальность планирования уменьшается и будет равна (l_1)

$$L_1=L-Ut,$$

где t - время планирования с высоты, с.

При попутном ветре самолет сносится ветром вперед со скоростью U . В этом случае угол планирования относительно земной поверхности уменьшается, а относительно воздушной среды остается неизменным (Рис. 6, в). Дальность планирования увеличивается:

$$L_2=L+Ut.$$

Подставив значение $L=HK$, получим

$$L_{1,2}=HK \pm Ut \quad (6.13)$$

Время планирования от ветра не зависит (при условии, что ветер горизонтален), так как скорость V_y остается постоянной величиной.

Изменение веса самолета влияет на дальность планирования следующим образом. При увеличении полетного веса самолета увеличивается скорость планирования $V_{пл}$. Следовательно, вертикальная скорость планирования V_y увеличивается, время планирования $t_{пл}$ уменьшается. При уменьшении веса самолета наблюдается обратная картина.

Для получения максимальной дальности планирования при сильном встречном ветре планирование необходимо осуществлять со скоростью, большей наивыгоднейшей $V_{нв}$.

Допустим, что самолет Як-55 на режиме, соответствующем наиболее пологому планированию при безветрии, планирует против сильного ветра, скорость которого равна $U=25$ м/с (Рис. 7, а), у самолета Як-55 минимальный угол планирования составляет $\theta_{мин}=6^0$; при этом наивыгоднейшая скорость полета равна $V_{нв}=137$ км/ч.

Изменив угол планирования так, чтобы он соответствовал большей скорости планирования при безветрии, например, при угле планирования, равном $\theta'=10^0$, что у самолета Як-55 соответствует скорости планирования, равной $V_{пл}=164$ км/ч, видно, что дальность планирования увеличивается ($L_1>L$) (Рис. 7, б).

При планировании с попутным ветром необходимо выдерживать скорость полета немного меньше наивыгоднейшей, но и не меньше экономической, для того чтобы получить максимальную дальность.

Однако на малой высоте (примерно 500...600 м) скорость планирования ни при каких условиях не должна быть менее наивыгоднейшей, с целью безопасности полета.

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

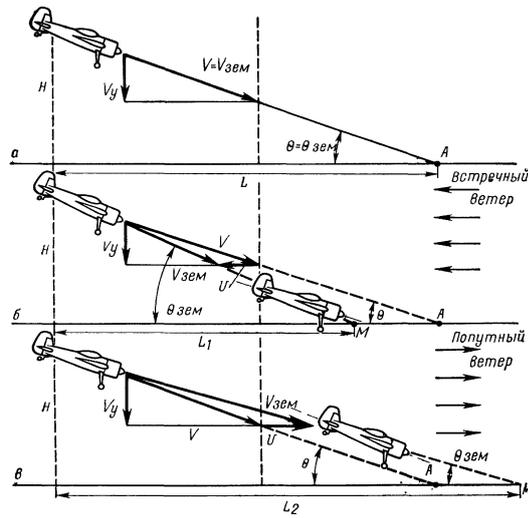


Рис. 6 Влияние ветра на дальность планирования и на угол планирования относительно земли

Рассмотрим планирование при нисходящем и восходящем потоке ветра (Рис. 8). Пусть самолет планирует со скоростью $V_{ПЛ}$ при нисходящем вертикальном течении, скорость которого U . Вертикальная скорость снижения V_y возрастает (Рис. 8, а), время и дальность планирования уменьшаются. Следовательно, при вертикальном потоке ветра, направленного вверх, дальность и время планирования увеличиваются, так как вертикальная скорость снижения уменьшается (Рис. 8, б).

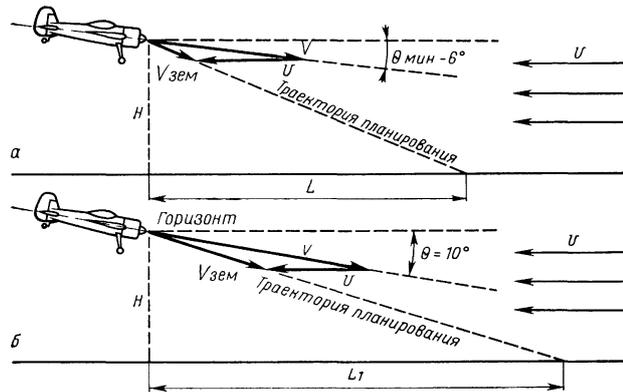


Рис. 7 Получение максимальной дальности планирования при сильном встречном ветре

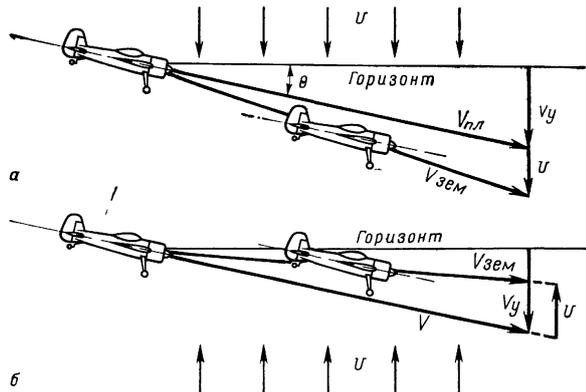


Рис. 8 Влияние нисходящих и восходящих воздушных потоков на вертикальную скорость относительно земли

ВЕРТИКАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ

Высота, которую самолет теряет при планировании за единицу времени, называется вертикальной скоростью планирования. Для небольших (до 15°) углов планирования можно считать, что

$$V_{ПЛ} = V_{ГП} \cdot \sin \theta$$

Из Рис. 9 можно определить, что

АЭРОДИНАМИКА САМОЛЕТА

$$\frac{v_{y_{пл}}}{v_{ГП}} = \operatorname{tg}\theta,$$

отсюда найдем

$$v_{y_{пл}} = v_{ГП} \cdot \operatorname{tg}\theta.$$

Если раскрыть формулу (6.5), то получим

$$v_y = \sqrt{\frac{2G}{\rho S}} \cdot \frac{1}{k\sqrt{C_y}}.$$

Анализ формулы показывает, что минимальная скорость снижения при планировании может быть получена при планировании самолета (планера) на экономической скорости, так как при этом величина

$\frac{1}{k\sqrt{C_y}}$ имеет максимальное значение

При увеличении полетного веса самолета увеличивается потребная скорость планирования, поэтому вертикальная скорость планирования также увеличивается. Увеличение высоты полета сопровождается уменьшением массовой плотности воздуха, скорость планирования увеличивается, вследствие чего возрастает и вертикальная скорость снижения.

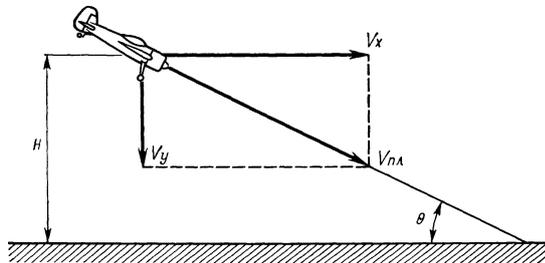


Рис. 9 Дальность планирования (при безветрии) тем больше, чем больше высота и чем меньше угол планирования

ПЕРВЫЕ И ВТОРЫЕ РЕЖИМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ

Интервал первых режимов планирования - это планирование со скоростями, соответствующими углам атаки меньше наивыгоднейшего.

Интервал вторых режимов планирования, - это планирование со скоростями, соответствующими углам атаки больше наивыгоднейшего.

Границей между первым и вторым режимами является наивыгоднейший угол атаки $\alpha_{НВ}$. в, то есть режим наиболее пологого планирования.

Вторым режимам планирования свойственны те же особенности, что и вторым режимам подъема:

ухудшение устойчивости и управляемости самолета, особенно при приближении к критическому углу атаки; изменение управления самолетом - при взятии ручки управления на себя угол планирования не уменьшается, а увеличивается.

Когда угол атаки приближается к критическому, самолет проваливается. С переходом на закритические углы атаки это явление усиливается. Такое планирование называется **парашютированием**. При наличии малого скольжения самолет при парашютировании может сорваться в штопор. Следовательно, на малой высоте 500...600 м и ниже планировать на вторых режимах не безопасно (на скоростях планирования, меньших наивыгоднейшей скорости горизонтального полета).