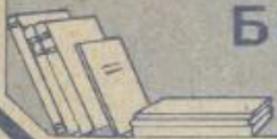


НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ  
БИБЛИОТЕКА



А. А. ЖАБРОВ

# Почему и как летает самолёт



НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА  
ВЫПУСК 91

---

А. А. ЖАБРОВ

**ПОЧЕМУ И КАК  
ЛЕТАЕТ САМОЛЁТ**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1956

Алексей Александрович Жабров. Почему и как летает самолёт.  
Редактор Д. А. Катренко.

Техн. редактор С. С. Гаврилов.

Корректор З. В. Моисеева.

Сдано в набор 28/XI 1956 г. Подписано к печати 10/XII 1956 г. Бумага 84 × 108<sup>1/2</sup>.  
Физ. печ. л. 1,75 Условн. печ. л. 2,87 Уч. изд. л. 2,74 Тираж 100 000 экз.  
Т-10090. Цена книги 80 коп. Заказ № 2020.

Государственное издательство технико-теоретической литературы.  
Москва, В 71, Б. Калужская, 15

З-я типография «Красный пролетарий» Главполиграфпрома  
Министерства культуры СССР. Москва, Краснопролетарская, 16.



## ВВЕДЕНИЕ

**В** наше время мы так привыкли к самолётам, что даже не поднимаем головы, услышав знакомый гул в небе. Однако, хотя самолёт внешне знаком всем, далеко не все знают, как он устроен и почему летает, какие физические законы при этом используются.

Полёт птицы кажется более понятным. Птица машет крыльями и как бы отталкивается от воздуха. Почему же летает самолёт? Ведь его крылья неподвижны! Что создаёт подъёмную силу, способную поддерживать в воздухе тяжёлую машину? Как лётчик управляет этой силой, сохраняет равновесие крылатой машины? Почему самолёт может делать в воздухе разнообразные фигуры?

Ответы вы найдёте в этой небольшой книжке.

## ИЗ ИСТОРИИ САМОЛЁТА

**И** здавна мечтали люди летать подобно птицам. Об этом рассказывают многие народные сказки, легенды и предания. Широко известно, например, древнегреческое сказание о Дедале.

Афинский скульптор Дедал и его сын Икар были заключены в высокую башню на острове Крите. Чтобы бежать из неволи, Дедал сделал себе и сыну крылья из птичьих перьев, скрепив их воском. На этих крыльях узники вылетели с острова. Летя над морем, Икар стал подниматься всё выше и выше к солнцу. От солнечных лучей воск растаял, крылья рассыпались, Икар упал в море и погиб. Дедал же благополучно прилетел в Италию.

Наряду с подобными легендами сохранилось немало преданий и о действительных попытках человека летать подобно птице.

В русской летописи рассказывается, например, о том, как в царствование Ивана Грозного «некий смерд Никита боярского сына холоп» совершил полёт на какой-то машине с крыльями, за что был казнён царём. Царский приказ гласил так: «Человек не птица, крыльев не имат. Аще же приставит себе крылья деревянны — против естества творит. То не божье дело, а от нечистой силы. За сие содружество с нечистой силой отрубить выдумщику голову...».

Первая попытка научно обосновать возможность механического полёта человека принадлежит великому итальянскому учёному и художнику Леонардо да Винчи (1452—1519). В одной из его записных книжек были найдены вычисления, относящиеся к полёту птицы и к полёту человека с помощью крыльев, приводимых в движение мускульной силой. По мнению учёного, «механическую птицу» следовало строить по образу летучей мыши. На протяжении нескольких веков было множество попыток построить такую «механическую птицу». Однако все они не имели успеха.

Плодотворнее оказалась другая мысль Леонардо да Винчи — о создании так называемого воздушного винта. Эту мысль осуществил великий русский учёный М. В. Ломоносов (1711—1765). Он первый построил модель винтокрылого летательного аппарата, называемого теперь вертолётом. Вот как об этом было записано в протоколе Российской Академии наук от 1 июля 1754 г.

«Высокопочтенный советник Ломоносов показал машину, названную аэродромической, выдуманную им и имеющую назначением при помощи крыльев, приводимых в движение часовой пружиной, нажимать воздух (т. е. отбрасывать его вниз) и подниматься в верхние слои атмосферы для того, чтобы можно было исследовать состояние верхнего воздуха метеорологическими приборами, прикреплёнными к этой аэродромической машине»\*).

\* ) «Аэродромической» значит воздухобежной (от греческих слов «аэр» — воздух и «дром» — бег). Теперь это слово не употребляется. Мы употребляем лишь слово аэродром.

Крыльями здесь названы лопасти воздушного винта, вращающегося вокруг вертикальной оси. При вращении винта часовой пружиной лопасти создавали подъёмную силу. Однако эта сила получалась, повидимому, меньше веса аппарата, поэтому модель вертолёта М. В. Ломоносова не могла летать.

Над созданием вертолёта работало много изобретателей как в России, так и в западных странах. Но окончательно эта задача была решена только в наше время.

В середине XIX века зарождается идея летательной машины с неподвижными крыльями. Среди изобретателей летательных аппаратов такого типа выделился русский морской офицер А. Ф. Можайский (1825—1890). Сначала он строил гигантские воздушные змеи и сам поднимался на них в воздух. Затем, изучая полёт птиц, Можайский начал делать опыты с моделями летательного аппарата, который мы теперь называем самолётом.

В 1876 году модель самолёта Можайского поднялась в воздух. В последующие годы изобретатель разработал проект самолёта с паровым двигателем и тремя воздушными винтами. Корпус самолёта имел вид лодки, установленной на тележку. К бортам этой лодки прикреплялись широкие прямоугольные крылья. Для управления имелись рули — горизонтальный и вертикальный. Проект был разработан настолько убедительно, что Можайский получил патент на своё изобретение.

Самолёт А. Ф. Можайского строился и испытывался в 1882—1885 годах на военном поле недалеко от Петербурга. При одном из этих испытаний, как свидетельствуют современники Можайского, самолёт после разбега по деревянному настилу оторвался от него и немного пролетел над полем. К сожалению, из-за поломки машины и недостатка средств дальнейшие опыты прекратились.

Самолёт А. Ф. Можайского, как и летательные машины других изобретателей, строивших самолёты в конце прошлого века, имел много недостатков. Было несколько причин, почему не удалось тогда покорить воздушный океан.

Главная причина заключалась в том, что наука о лете-  
тии в то время была ещё недостаточно развита. Для со-  
зания самолёта необходимы глубокие знания законов  
полёта, а таких знаний тогда ещё не было.

Второй причиной было отсутствие лёгкого и мощного двигателя. Паровой же двигатель мало пригоден для самолёта.

Кроме того, тогда не имелось никакого опыта в управлении самолётом. А ведь даже в наше время научиться



НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ  
ЖУКОВСКИЙ

этому не так-то легко. Требуется длительная тренировка, чтобы овладеть искусством полёта.

Все эти преграды стояли на пути первых авиаторов \*).

Одним из них был немецкий инженер Отто Лилиенталь. Изучая полёт птиц, он правильно заключил, что если

---

\* ) От латинского слова «авис» — птица.

птицы некоторое время держатся в воздухе, не маша крыльями, то и человек на верно рассчитанных крыльях может плавно «планировать» с возвышенного места. Лилиенталь решил, что прежде чем строить самолёт, надо овладеть безмоторным летательным аппаратом — планёром.

Первый планёр, построенный им в 1890 году, имел крылья такой же формы, как у летучей мыши. Полёты Лилиенталь производил сначала с крыши сарая. Держа крылья за раму, он разбегался против ветра и прыгал вниз. В первый момент планёр слегка взмывал вверх, а затем скользил к земле.

Позднее изобретатель построил второй планёр лучшей конструкции. С ним Лилиенталь совершил сотни полётов с довольно высоких холмов и научился хорошо управлять планёром. При сильном ветре ему иногда удавалось немного парить, как парят птицы. Но во время одного из таких полётов Лилиенталь не смог сохранить равновесие аппарата и упал, разбившись насмерть.

В России с особым вниманием к опытам Лилиенталя отнёсся профессор Московского высшего технического училища — создатель науки о летании Н. Е. Жуковский (1847—1921). Он опубликовал статью «О парении птиц», в которой дал теоретическое объяснение полёта птицы. Н. Е. Жуковский навестил Лилиенталя, чтобы понаблюдать его полёты. В знак признательности Лилиенталь подарил русскому учёному один из своих планёров.

Из последователей Лилиенталя большую роль сыграли два американских изобретателя — братья Вильбур и Орвиль Райт.

Братья Райт имели маленькую мастерскую, занимаясь ремонтом велосипедов. В свободное время они построили планёр, который имел два ряда крыльев и рули управления. Пилот управлял аппаратом, лёжа на животе. Братья совершили много полётов и так хорошо изучили управление аппаратом, что им оставалось только поставить на него появившийся незадолго перед тем автомобильный бензиновый двигатель, чтобы превратить планёр в самолёт.

Первый полёт самолёта братьев Райт состоялся в 1903 году и продолжался всего лишь около минуты. В дальнейшем продолжительность полёта постепенно уве-

личивалась. Через два года настойчивых опытов и совершенствований самолёт мог пролететь уже 20 километров, а затем и больше. Скорость самолёта составляла примерно 50—60 километров в час.

Вскоре после этого появилось несколько новых типов самолётов, созданных во Франции и других странах, и началось их быстрое совершенствование.

Полёты Вильбура Райт и французских лётчиков вызвали огромный интерес во всём мире. В европейских странах устраивались лётные состязания; десятки и сотни тысяч людей стекались на них, чтобы увидеть крылатые машины и приветствовать смелых авиаторов.

Так началась эра авиации. Развитие авиации неразрывно связано с развитием науки о летании — аэродинамики \*). Аэродинамика изучает движение тел в воздухе и те силы, которые возникают при действии воздушного потока на тела. Эта наука изучает и полёт самолёта. Инженера она учит, как проектировать и строить самолёт, а лётчика — как управлять им.

Огромный вклад в развитие аэродинамики внёс Н. Е. Жуковский. Он объяснил, как действуют крыло самолёта и воздушный винт. За время своей многолетней научной деятельности он основал коллектив талантливых инженеров и научных работников. Многие из них стали впоследствии выдающимися деятелями советской авиации.

Владимир Ильич Ленин высоко оценил заслуги Н. Е. Жуковского перед Родиной и назвал его отцом русской авиации.

## КАК УСТРОЕН САМОЛЁТ

**М**ного различных типов самолётов можно увидеть теперь в воздухе — от маленького ПО-2 до громадного реактивного пассажирского корабля ТУ-104. Но все самолёты имеют общие черты своего устройства, и для того чтобы получить представление об устройстве самолёта, достаточно познакомиться с одним из типов.

На авиационных праздниках обычно участвуют самолёты ЯК-18. На рис. 1 показано звено этих самолётов в

\* ) От греческих слов «аэр» — воздух и «динамис» — сила.

полёте, а на рис. 2 машина изображена для наглядности в полуразобранном виде. Это двухместный учебно-тренировочный самолёт конструкции А. С. Яковлева. На нём

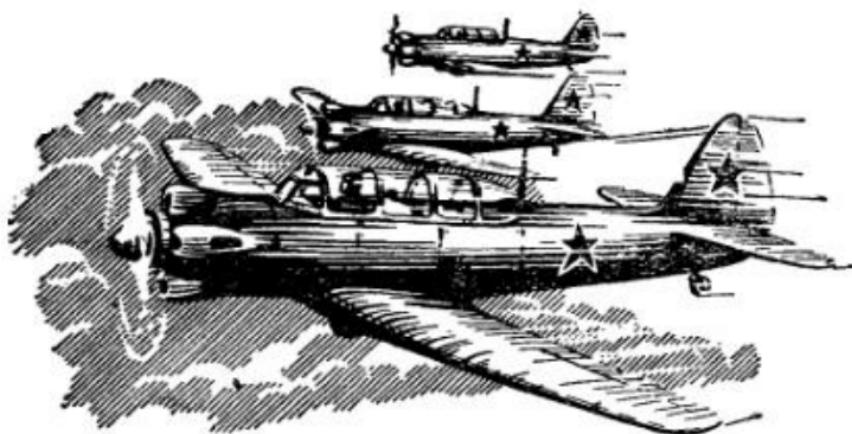


Рис. 1. Самолёты ЯК-18 в полёте.

советские лётчики-спортсмены завоевали несколько рекордов.

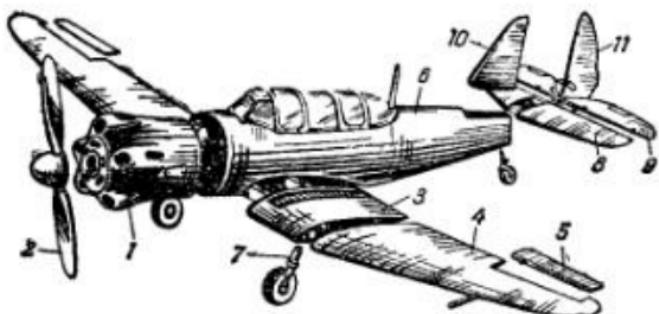


Рис. 2. Схематическое изображение самолёта ЯК-18 в полуразобранном виде: 1 — двигатель, 2 — винт, 3 — центральная часть крыла, 4 — левая консоль, 5 — элерон (левый), 6 — фюзеляж, 7 — нога шасси, 8 — стабилизатор, 9 — руль высоты, 10 — киль, 11 — руль направления.

Главными частями самолёта являются: крыло с элеронами, фюзеляж, хвостовое оперение, силовая установка, шасси и хвостовое колесо, рулевое управление.

Крыло предназначено поддерживать, «нести» машину в воздухе. Оно состоит из центральной части (рис. 3), накрепко соединяемой с фюзеляжем, и так называемых консолей. Каркас крыла изготовлен из двух дюралюминиевых \*) балок — лонжеронов, которые скреплены дюралюминиевыми рёбрами — нервюрами. На задней части крыла имеются шарнирно соединённые с ним небольшие

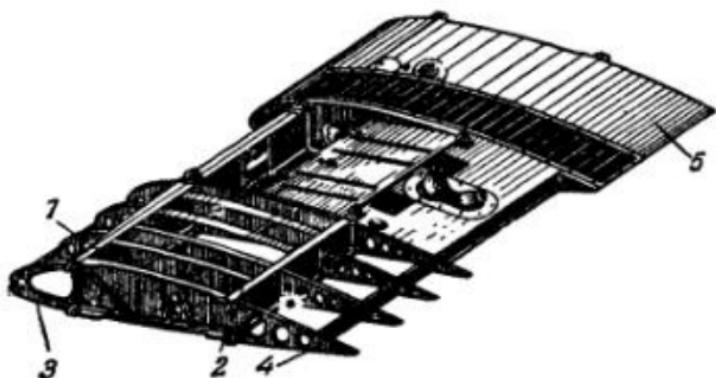


Рис. 3. Центральная часть крыла самолёта ЯК-18:  
1 — передний лонжерон (балка), 2 — задний лонжерон,  
3 — нервюра (ребро), 4 — хвостик нервюры, 5 — дюралюминиевая обшивка.

крыльшки — элероны. С их помощью лётчик может направлять крен самолёта или, наоборот, накренять машину.

Фюзеляж — это корпус самолёта. К нему крепятся крылья и силовая установка. В нём размещены кабины экипажа и пассажиров, грузы, а также баки с горючим. Каркас фюзеляжа сделан из стальных труб.

Хвостовое оперение — горизонтальное и вертикальное — служит для изменения и сохранения равновесия самолёта в полёте. Рулём высоты лётчик может изменять продольное положение самолёта (наклонять самолёт вниз и вверх), а руль направления играет примерно ту же роль, что и руль лодки. Стабилизатор и киль — неподвижные поверхности, они способствуют устойчивому равновесию самолёта в воздухе.

\*) Дюралюминий (или дуралюминий) — лёгкий и прочный сплав алюминия, меди и марганца.

Силовая установка на самолёте ЯК-18 состоит из поршневого двигателя воздушного охлаждения и двухлопастного воздушного винта.

Шасси и хвостовое колесо дают возможность осуществлять взлёт и посадку. Самолёт ЯК-18, как и большинство современных самолётов, имеет убирающееся в полёте шасси. Подъём и выпуск шасси лётчик производит при помощи специального механизма.

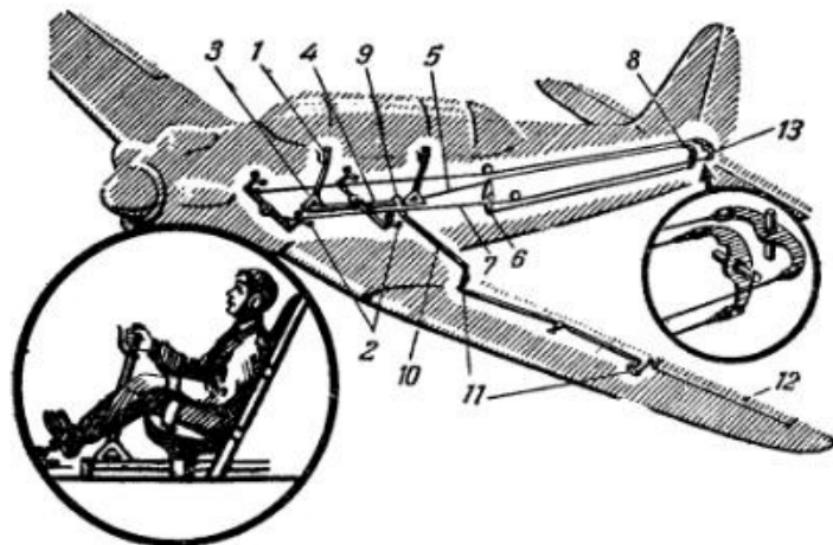


Рис. 4. Схема рулевого управления самолёта ЯК-18: 1 — ручка рулевого управления, 2 — педали, 3 — кронштейн ручки рулевого управления, 4 — продольная труба (вал), на которой укреплена ручка рулевого управления, 5 — тяга к рулю высоты, 6 — качалка, 7 — проволочные тяги к рулю направления, 8 — рычаг на руле высоты, 9 — рычаг для передачи движений ручки элеронам, 10 — жёсткая тяга к элеронам, 11 — качалки, 12 — элерон (левый), 13 — рычаг на руле направления.

Рулевое управление — «нервы» самолёта. На самолёте ЯК-18 рулевое управление позволяет управлять машиной из обеих кабин — инструктора и ученика (рис. 4). Перед сидением каждого лётчика находится ручка рулевого управления 1; с её помощью лётчик действует рулём высоты и элеронами. Под ногами расположены педали 2; с их помощью лётчик движет рулём направления.

Посмотрим, как лётчик действует рулями (работу рулей объясним дальше).

Ручка рулевого управления с помощью кронштейна 3 соединена шарнирно с продольной вращающейся трубой 4 (расположенной на полу кабины). Благодаря этому лётчик может наклонять ручку назад и вперёд, вправо и влево. Когда он наклоняет её назад, как говорят «берёт ручку на себя», нижний конец её отклоняется вперёд и прикреплённым к нему тросом 5 при посредстве качалки 6 тянет верхний конец рычажка 8 руля высоты. В результате руль отклоняется вверх, и самолёт поднимает нос; когда же лётчик «даёт ручку от себя», происходит обратное: руль высоты отклоняется вниз и самолёт опускает нос.

Когда лётчик отклоняет ручку вправо, продольная труба 4, к которой прикреплена ручка, вращается тоже вправо; это движение передаётся через качалки и тяги 9, 10 и 11 на элероны 12, причём правый элерон поднимается, а левый опускается, и самолёт кренится вправо. Если лётчик отклоняет ручку влево, то левый элерон поднимается, а правый опускается, и самолёт кренится влево.

Педали 2 соединены тросами 7 с рычажком 13 руля направления. Когда лётчик нажимает правую педаль, руль отклоняется вправо, и самолёт начинает разворачиваться вправо. При нажиме на левую педаль руль отклоняется влево, и самолёт начинает разворот влево.

На тяжёлых самолётах вместо ручки рулевого управления обычно устанавливают штурвал. Как и ручку, лётчик отклоняет штурвал на себя и от себя, и таким образом действует рулём высоты. Вращая же штурвал вправо и влево, он управляет элеронами.

Тяжёлые самолёты имеют и другие конструктивные особенности. Например, на двухвинтовых и четырёхвинтовых самолётах силовые установки помещают на крыльях, кабину пилота и штурмана располагают в носовой части фюзеляжа, и т. д.

## ВОЗДУХ И ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК

**С**амолёт летает в воздухе. Воздух служит опорой для его крыльев. Поэтому прежде чем разобраться в том, почему и как летает самолёт, познакомимся с физическими свойствами воздуха.

Как известно, воздух представляет собой смесь нескольких газов. Воздушную оболочку земного шара мы называем атмосферой; она простирается приблизительно до высоты 1000 километров. Но, строго говоря, верхней границы атмосферы не существует, так как с высотой воздух становится всё разреженнее и постепенно атмосфера сменяется безвоздушным пространством \*).

Воздух кажется нам невесомым, но это неверно. У поверхности земли, на уровне моря, один кубический метр воздуха весит приблизительно 1,3 килограмма (подсчитайте вес воздуха в вашей комнате и вы убедитесь, что воздух — довольно тяжёлый газ). На высоте 5 километров один кубический метр воздуха весит уже 0,7 килограмма, на высоте 10 километров — только 0,4 килограмма и т. д.

Поскольку воздух имеет вес, он давит на тела, на всякую площадку, с которой соприкасается (подобно тому как вода давит на погруженное в неё тело со всех сторон).

Атмосферное давление можно измерить прибором, который называется барометром \*\*). В простейшем виде он изображён на рис. 5. Идея прибора состоит в том, что давление воздуха уравновешивается столбом ртути в трубке, в которой воздуха нет, то есть над уровнем ртути в трубке пустота.

Высота столба ртути на уровне моря бывает равна в среднем 760 миллиметрам.

Когда атмосферное давление увеличивается, часть ртути из чашки вдавливается в трубку и уровень ртути в трубке повышается. При уменьшении атмосферного давления происходит обратное. Измеряя высоту столба ртути по шкале, можно всегда узнать величину атмосферного давления в миллиметрах ртутного столба.

\* ) Подробнее об атмосфере см. научно-популярные брошюры Гостехиздата: Беляков, Атмосфера, и Честнов, Ионосфера.

\*\*) От греческих слов «барос» — тяжесть и «метрон» — мера.

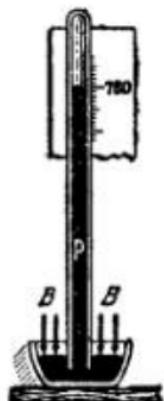


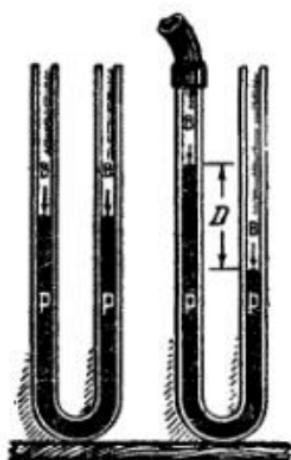
Рис. 5. Ртутный барометр. Величина столбика ртути (*P*) в трубке показывает величину давления воздуха (*B*) на поверхность ртути в чашке.

Если площадь поперечного сечения трубки барометра равна одному квадратному сантиметру ( $1 \text{ см}^2$ ), то вес ртутного столба, а значит и давление воздуха, равен приблизительно 1,03 килограмма. Следовательно, на уровне моря каждый квадратный сантиметр поверхности тела (сверху, снизу, с боков) испытывает давление воздуха, равное 1,03 килограмма, а каждый квадратный метр — давление в 10 000 раз большее, т. е. 10 300 килограммов.

Мы не замечаем этого громадного давления по той причине, что давление воздуха (как и жидкости) передаётся во все стороны с одинаковой силой. Поэтому всякое тело, находящееся в воздухе, испытывает давление со всех сторон (а также изнутри, когда воздух проникает в поры тела).

Атмосферное давление можно обнаружить очень простым опытом. Наполните стакан водой до краёв, прикройте его листком плотной бумаги, затем, придерживая листок ладонью, опрокиньте стакан и отнимите руку: листок как бы прилипнет к краям стакана, и вода не выльётся. Сила давления воздуха, действующая на листок снизу, будет больше силы давления воды, то есть её веса.

Рис. 6. Ртутный манометр. Разность уровней ( $D$ ) показывает разность давлений воздуха ( $B$ ) на поверхность ртути ( $P$ ) в коленях трубки.



При изучении аэродинамических сил, действующих на самолёт в полёте, приходится измерять не атмосферное давление, а разность между двумя давлениями, из которых одно, скажем, равно атмосферному, а другое больше или меньше атмосферного. Для этой цели служит особый прибор — манометр. Принцип его действия такой же, как и барометра. Манометр изображён на рис. 6. На поверхность ртути в обоих коленях трубки действует одинаковое давление — атмосферное; поэтому ртуть стоит в них на одном уровне. Если же одно колено, скажем, левое, соединить с пространством, в котором давление меньше атмосферного,

то уровень ртути в этом колене повысится. Столбик ртути между уровнями ртути в коленах трубы и покажет разность давлений в миллиметрах ртутного столба.

Аэродинамические силы, действующие на тело при его движении в воздухе, зависят только от его скорости относительно воздуха. Поэтому движется ли тело, а воздух неподвижен или, наоборот, тело неподвижно, а движется воздух,— суть дела не меняется. Как в первом, так и во втором случае мы вправе говорить о воздушном

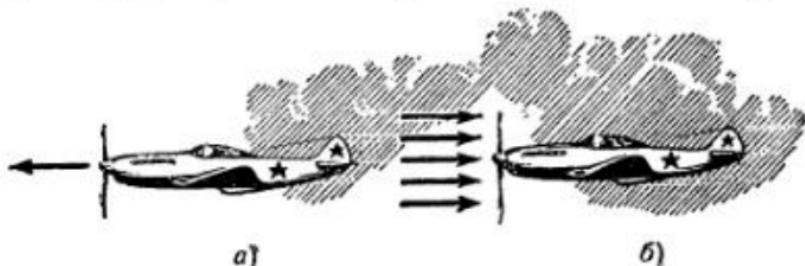


Рис. 7. Скорость самолёта относительно окружающего его воздуха можно представить как скорость воздуха, набегающего на самолёт.

потоке, набегающем на тело. Поэтому можно представить, что самолёт, летящий, например, со скоростью 200 километров в час (рис. 7, а), неподвижен, а на него набегает поток воздуха с той же скоростью 200 километров в час (рис. 7, б) \*).

Следовательно, явления, возникающие при движении тела в воздухе, можно изучать двумя способами: или двигая тело в неподвижном воздухе, или обдувая воздухом неподвижное тело. Сейчас применяются оба способа, но второй более удобен и им чаще пользуются.

Раньше некоторые учёные считали второй способ ошибочным, но Н. Е. Жуковский показал его правильность. Этот способ очень удобен при опытах в так называемых аэродинамических трубах.

Аэродинамической трубой называется сооружение, которое позволяет создавать искусственный поток воздуха. Скорость воздушного потока, в зависимости от конструкции трубы, может быть очень большой. Простейшая аэро-

\* ) Скорость принято изображать стрелкой, длина которой показывает в масштабе величину скорости.

динамическая труба изображена на рис. 8. Вот как она устроена и работает. Оба конца трубы открыты, и в одном из них установлен большой вентилятор, вращаемый электромотором. При работе вентилятора в трубе создаётся воздушный поток. В самой узкой — рабочей — части трубы устанавливают для испытания модель самолёта или крыла. Если воздушный поток «подкрасить» дымом, то через окно в трубе можно наблюдать, как воздух обтекает модель, и даже сфотографировать картину обтекания. С помощью специальных приборов можно измерять силы, возникающие при действии воздушного потока на модель.

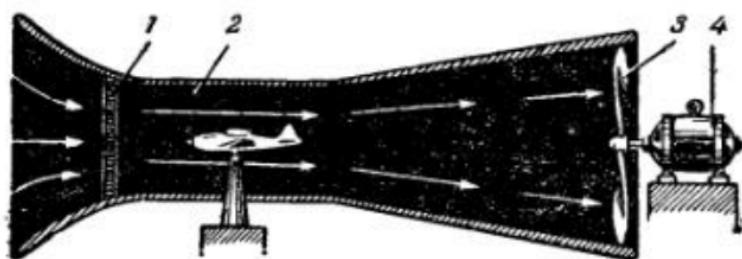


Рис. 8. Схема аэродинамической трубы: 1 — решётка, спрямляющая воздушный поток, 2 — рабочая часть трубы, 3 — вентилятор, 4 — электромотор.

В аэродинамической трубе, если вентилятор вращается равномерно, воздушный поток получается, как говорят, установившимся.

Если самолёт летит с постоянной скоростью, то полёт тоже называют установившимся.

## ДВА ЗАКОНА АЭРОДИНАМИКИ

**Т**ечение воздуха и силы, возникающие при действии воздушного потока на тела, изучает наука аэродинамика. Это родная сестра гидродинамики, изучающей течение жидкостей («гидр» — вода). Важнейшие законы гидродинамики были сформулированы учёными Эйлером и Д. Бернулли — современниками Ломоносова. С развитием авиации выяснилось, что эти законы в общем справедливы и для воздуха, то есть являются и законами аэrodинамики. Они вытекают из основных законов естествознания: сохраняемости массы и энергии.

Эйлер сформулировал закон неразрывности течения жидкости.

Посмотрите на рис. 9, а. На нём изображена схема прибора, состоящего из открытого резервуара и соединённой с ним трубки, которая имеет разные сечения. Если открыть оба крана так, чтобы уровень воды в резервуаре оставался неизменным, то течение воды по трубке будет установившимся: в любом месте трубки вода ни накапливается, ни убывает (иначе где-то образовался бы разрыв течения). Поэтому за одну секунду из трубы вытекает столько же воды, сколько в неё притекает из резервуара. Значит, через разные сечения трубы (*A*, *B* и *C*).

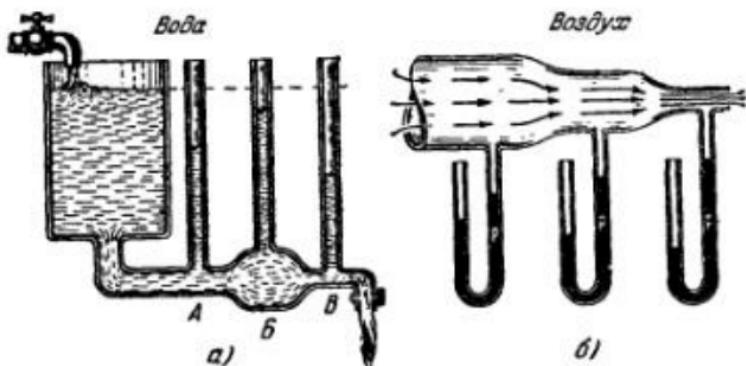


Рис. 9. С уменьшением площади сечения струи скорость течения воды или воздуха возрастает, а давление падает.

за одну секунду протекает одинаковая масса воды. А это может быть, очевидно, только в том случае, если через эти сечения вода течёт с различной скоростью. Чем меньше сечение, тем больше скорость воды. Иначе за одну секунду через узкое сечение «не успеет» пройти та же масса воды, какая проходит за одну секунду через широкое сечение.

В этом и состоит закон неразрывности течения жидкости. В справедливости его можно убедиться, наблюдая течение реки. Там, где ее русло суживается и мелеет, вода течёт всегда быстрее.

Этот закон справедлив и для течения воздуха, когда скорость не превышает 400—500 км/час и воздух можно считать несжимаемым.

Теперь познакомимся со вторым важнейшим законом аэрогидродинамики, который был сформулирован учёным Бернулли. Воспользуемся опять тем же прибором, который изображен на рис. 9, а.

Вы видите, что к трубке переменного сечения присоединены вертикальные трубочки с открытыми концами. Эти трубочки играют роль манометров. Когда краны закрыты и вода не течёт по трубке, то в манометрах она стоит на том же уровне, что и в резервуаре (как во всяких сообщающихся сосудах). Но как только вода потечёт по трубке, уровень воды в манометрах понизится. Это доказывает, что если вода течёт, то давление её на стенки трубы меньше, чем когда она находится в покое. Кроме того, оказывается, что уровень воды больше всего понизится в том манометре, который присоединён к самому узкому сечению, а меньше всего — в манометре, присоединённом к самому широкому сечению.

Таким образом, когда скорость воды, то есть её кинетическая энергия, увеличивается, давление в струе (потенциальная энергия) уменьшается \*). В этом и заключается смысл закона Бернулли.

То же самое можно наблюдать и при течении воздуха по трубке переменного сечения (рис. 9, б). Манометры и здесь покажут, что давление уменьшается при сужении струи, то есть при увеличении скорости течения воздуха.

В справедливости закона Бернулли легко убедиться и на более простом опыте.

Возьмите два листа писчей бумаги и, держа их параллельно (рис. 10, а), дуньте в промежуток между ними. Казалось бы, что струя воздуха подействует как клин и поэтому листы разойдутся. Произойдёт же как раз обратное: листы сблизятся (рис. 10, б). Дело в том, что с внешних сторон давление воздуха на листы равно атмосферному, в промежутке же между ними — в струе воздуха —

\*) Кинетическая энергия — это энергия движения тела, например, энергия текучей воды, воздуха, падающего груза, раскручивающейся пружины и т. д. Потенциальная энергия — это энергия положения тела, например, энергия запруженной реки, сжатого газа, закрученной пружины и т. д. Кинетическая энергия тела может переходить в потенциальную и наоборот, но сумма их остаётся неизменной.

давление будет немного меньше атмосферного; разность давлений и заставляет листы сближаться.



Рис. 10. Если дуть в промежуток между двумя листами бумаги, то они сблизятся, так как давление в струе меньше, чем с внешних сторон листов.

Теперь, когда вы познакомились с важнейшими законами аэродинамики, вы поймёте возникновение аэrodинамических сил и, в частности, подъёмной силы крыла, поддерживающей самолёт в воздухе.

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ

**Н**а самолёт в полёте действуют аэродинамические силы. Покажем сначала на простых примерах, как они возникают.

Прежде всего, что такое аэродинамическая сила?

Когда при полном безветрии вы быстро едете на велосипеде, встречный воздух стремится затормозить ваше движение. А если вы стоите неподвижно и на вас дует сильный ветер, то воздух стремится сдвинуть вас с места. В обоих случаях это воздействие воздушного потока на тело и называют аэродинамической силой, или силой сопротивления воздуха.

Аэродинамическая сила получается тем большей, чем больше поперечные размеры тела и плотность воздуха, и особенно сильно она возрастает с увеличением скорости движения (или скорости потока). Кроме того, величина аэродинамической силы зависит ещё от формы тела и от

положения его в воздушном потоке. То и другое имеет огромное значение для полёта.

Как же возникает аэродинамическая сила?

На рис. 11, а изображена схема обтекания воздухом круглой пластины (диска), поставленной перпендикулярно к потоку. Посмотрите на неё внимательно.

Струйки воздуха давят на пластину, так как она является для них препятствием. Перед пластиной получается повышенное давление (обозначено знаками плюс). Огибая пластину, струйки сжимаются и поэтому, согласно закону неразрывности, скорость их возрастает. В силу инерции они стремятся двигаться прямолинейно и отрываются

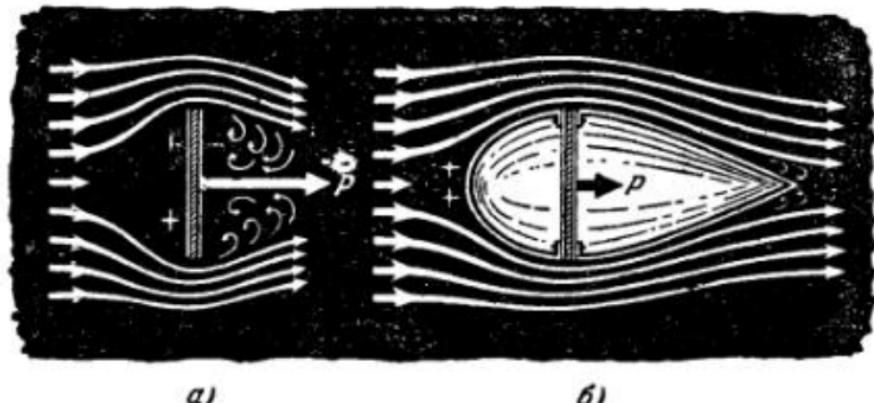


Рис. 11. Возникновение аэродинамической силы  $P$  при симметричном обтекании: а) пластины и б) хорошо обтекаемого тела.

от пластины. По этой причине позади неё получается разрежение, то есть пониженное давление воздуха (обозначено знаками минус). Некоторые струйки врываются в это разреженное пространство и образуют вихри, которые потом постепенно исчезают.

Таким образом, впереди пластины давление воздуха повышенено, а позади неё понижено. К чему это ведёт?

Представьте себе, что вы давите на полуоткрытую дверь, а ваш товарищ давит на неё с другой стороны. Если вы сильнее, то под действием разности давлений дверь откроется в сторону вашего товарища. Так и здесь. Разность давлений впереди и позади пластины создаёт силу, направленную в сторону меньшего давления (мы будем

обозначать её русской буквой  $P$ \*). Если пластина неподвижна, то эта аэродинамическая сила будет стремиться сорвать пластину и унести её. Если же пластина движется, то эта сила будет тормозить движение.

Сопротивление воздуха, как было сказано, сильно зависит ещё от формы тела. Какая же форма будет наиболее выгодной?

Снабдим нашу круглую пластину спереди тупой конусообразной наставкой, а сзади — более заострённым конусом (рис. 11, б). При такой форме срыв струй отсутствует, вихрей позади тела почти нет, разность давлений воздуха впереди и позади тела незначительна. По сравнению с пластиной сопротивление такого тела примерно в 25 раз меньше, и создаётся оно главным образом лишь трением воздуха о его поверхность.

При такой форме воздушный поток почти не тормозится телом, он течёт вдоль его гладких боков и хорошо обтекает заострённую заднюю часть. Поэтому такие формы получили название хорошо обтекаемых.

Мы познакомились с обтеканием тел симметричной формы, когда воздух течёт параллельно оси симметрии тела \*\*). В таких случаях воздух обтекает тело тоже симметрично и разность давлений получается только впереди и позади тела, а не по бокам его. Эта разность давлений, а также трение воздуха о поверхность тела и создают силу, направленную прямо против движения, как говорят, «в лоб» (рис. 11). Поэтому в таких случаях аэrodинамическую силу называют силой лобового сопротивления.

Таким образом, лобовое сопротивление складывается из сопротивления давления и сопротивления трения.

Вот как возникает сопротивление трения.

Всем известно поверхностное трение между твёрдыми телами. Существует ещё внутреннее трение между сосед-

\*) Силы, как и скорости, принято изображать стрелками. Если силы равны, то и стрелки равны. Если одна сила больше другой, то и стрелки берутся соответственно одна больше другой. С помощью стрелки можно показать точку приложения силы, её величину и направление действия.

\*\*) Симметрия — одинаковое расположение геометрических форм относительно линии или плоскости, называемых осью или плоскостью симметрии.

ними слоями жидкости или газа, называемое вязкостью. Например, если опустить в воду палец, а затем вынуть его, то к нему прилипнет немного воды. Но если проделать то же самое с маслом, дёгтем, мёдом, то к пальцу прилипнет много жидкости — тем больше, чем больше её вязкость.

Вязкость воздуха наблюдать труднее. Однако известно, что через форточку, затянутую марлей, воздух проходит заметно хуже, чем без марли. Это объясняется вязкостью воздуха.



Рис. 12. Возникновение аэродинамической силы  $P$  при несимметричном обтекании пластины и замена силы  $P$  двумя аэродинамическими силами — подъёмной силой  $P$  и силой лобового сопротивления  $L$ .

ляются силы внутреннего трения, называют пограничным (он граничит с поверхностью тела).

Чтобы уменьшить силы внутреннего трения в пограничном слое, крыльям и фюзеляжу самолёта придают хорошо обтекаемую форму и полируют их поверхность.

Итак, лобовая аэродинамическая сила только тормозит движение тела. Посмотрим теперь, как возникает сила, нужная для полёта.

Она появляется в тех случаях, когда воздух обтекает пластину (крыло) несимметрично.

На рис. 12 изображена схема обтекания прямоугольной пластины, поставленной под острым углом к потоку. Под пластиной происходит торможение потока, и поэтому давление здесь повышается. Над пластиной вслед-

Когда воздушный поток обтекает тело, воздух непосредственно около самого тела не скользит по его поверхности, а прилипает к ней. Прилипший тончайший слой тормозит движение соседнего, этот — следующего и т. д., и лишь на некотором расстоянии от поверхности тела это явление прекращается. Слой, в котором прояв-

ствие срыва струй получается разрежение воздуха, то есть давление здесь понижено. Благодаря этой разности давлений и возникает аэродинамическая сила. Она направлена в сторону меньшего давления, то есть назад и вверх.

Отклонение аэродинамической силы вверх зависит от угла, под которым пластина поставлена к потоку. Этот угол получил очень удачное название «угла атаки». Под этим углом пластина как бы «атакует» воздух (этот угол принято обозначать греческой буквой  $\alpha$  — альфа).

Таким образом, воздушный поток стремится здесь отнести пластину не только назад, но одновременно и вверх.

Поэтому для наглядности мы можем здесь заменить полную аэродинамическую силу  $P$  двумя силами —  $L$  и  $D$ , из которых первая направлена прямо назад (сила лобового сопротивления), а вторая направлена вертикально вверх (подъёмная сила) \*).

Возникновение аэродинамических сил при несимметричном обтекании можно хорошо видеть у воздушного змея, сделанного, например, из листа бумаги с двумя диагональными рейками и одной поперечной.

Если узелку змея, к которой прикрепляется леер (нить, на которой запускают змей), построить из ниток равной длины, прикреплённых к концам диагональных реек, то змей летать не будет. Побежав с таким змеем против ветра (рис. 13 внизу), вы увидите, что змей будет нестись на высоте вашей руки, стоя в воздухе перпендикулярно к ветру. По натяжению леера вы будете чувствовать, что змей сопротивляется движению, но и только. Это и понятно, так как в этом случае аэродинамическая сила будет только лобовой.

Но если вы сделаете узелку так, что две верхние нитки будут равной длины, а третья (нижняя) чуть покороче, и прикрепите её к центру змея, то змей, при наличии правильно сделанного хвоста, легко взмоет и будет устойчиво летать (рис. 13 вверху). В этом случае змей «атакует» воздух под углом 40—60 градусов и в

\* ) Такая замена называется разложением одной силы на две по правилу параллелограмма.

результате несимметричного обтекания возникает подъёмная сила.

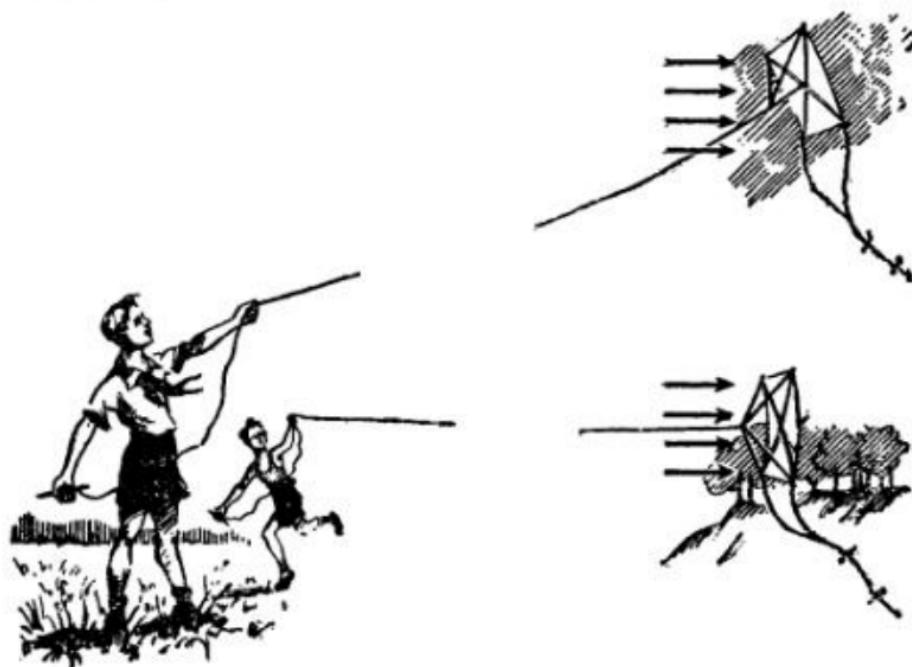


Рис. 13. Полёт воздушного змея: внизу — с неправильно построенной узелкой, вверху — с правильно построенной узелкой.

Подъёмная сила крыла самолёта, как мы сейчас увидим, возникает, однако, несколько иначе, чем подъёмная сила пластины, или воздушного змея.

### КАК ВОЗНИКАЕТ ПОДЪЁМНАЯ СИЛА КРЫЛА САМОЛЁТА

Изобретатели первых летательных машин строили крылья в виде плоских или немного изогнутых поверхностей. Позже выяснилось, что выгоднее придавать крылу самолёта обтекаемую форму — такую, какая в поперечном сечении изображена на рис. 14. Это сечение называется профилем крыла.

Существует много профилей крыльев. На нашем рисунке изображены наиболее типичные. Линия АБ, соединяющая носок и хвостик профиля, называется его хордой.

Вид крыла сверху тоже бывает различным, но чаще конструкторы применяют только три формы: прямоугольную, трапециевидную и стреловидную (рис. 14, б). Концы прямоугольных и трапециевидных крыльев обычно закругляются.

При выборе формы крыла и его профиля конструктор руководствуется их аэродинамической выгодностью. Крыло работает выгодно, когда оно развивает большую подъёмную силу, но даёт малое лобовое сопротивление.

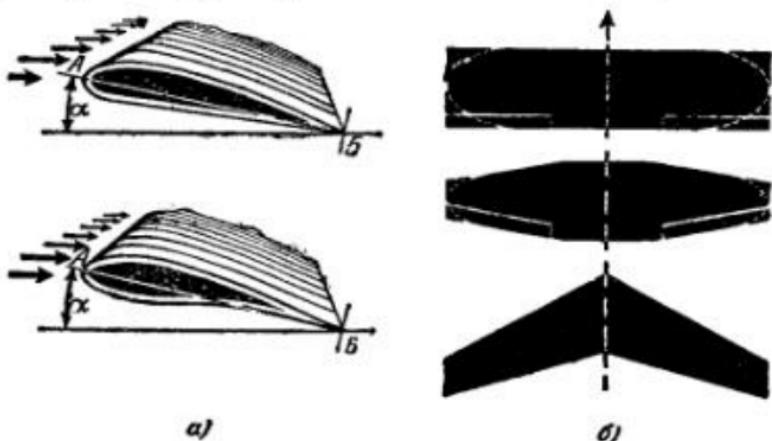


Рис. 14. Различные формы крыла самолёта: а) профиль крыла, линия АБ — хорда профиля; б) вид крыла сверху.

Крыло самолёта, само по себе неподвижное, создаёт подъёмную силу благодаря поступательному движению самолёта, которое сообщает ему силовая установка. Встречный воздушный поток обтекает крыло несимметрично. Аэродинамическая сила благодаря специальному профилю крыла отклоняется ещё больше вверх, чем у плоской пластины, поставленной под острым углом к потоку. Несимметричное обтекание крыла вызывается несимметричной формой профиля или наличием угла атаки, а чаще — тем и другим вместе.

Углом атаки крыла условились считать угол между хордой профиля и направлением воздушного потока.

Обычно самолёт имеет в полёте очень малый угол атаки крыла — около 3—5 градусов, а скоростные самолёты — ещё меньше. Уже одно это показывает, что крыло

самолёта создаёт подъёмную силу несколько иначе, чем воздушный змей, который летает, как мы видели, при угле атаки в 40—60 градусов.

Каким же образом при таком малом угле атаки возникает подъёмная сила, способная поддерживать в воздухе очень тяжёлую машину?

Посмотрите внимательно на рис. 15, *a*, на котором изображена схема обтекания крыла воздухом при малом угле атаки.

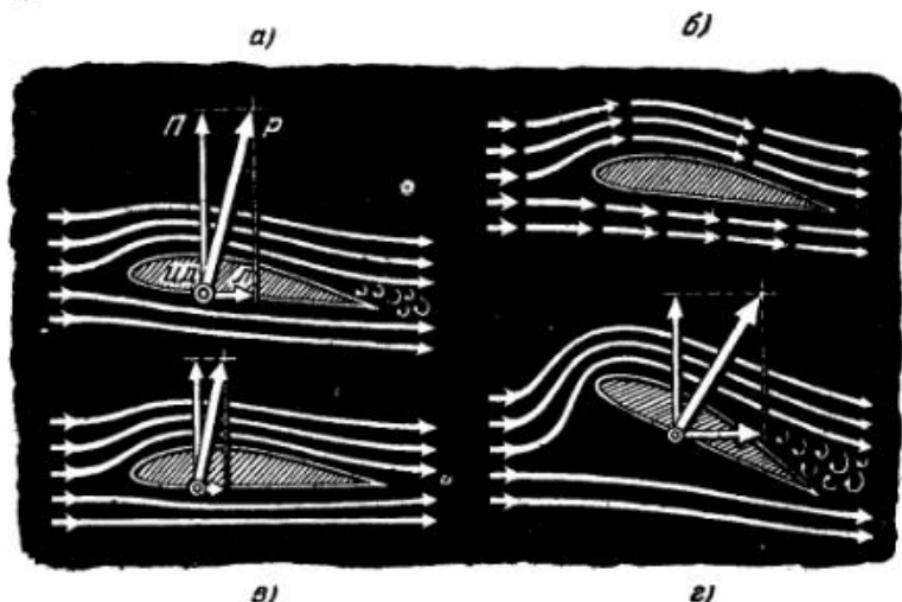


Рис. 15. Обтекание крыла воздушным потоком и возникновение подъёмной силы *а*) при небольшом угле атаки, *б*) скорость воздуха над крылом больше, чем под крылом; *в*) обтекание крыла при нулевом угле атаки и *г*) при критическом угле атаки.

Струйки воздуха обтекают крыло несимметрично, больше отклоняясь сверху, чем снизу. Сверху струйкам приходится огибать выпуклую часть крыла, поэтому они сжаты и, следовательно, по закону неразрывности скорость течения воздуха здесь больше, чем вдали от крыла. Под крылом же, наоборот, скорость течения воздуха меньше, так как здесь происходит некоторое торможение воздушного потока (благодаря углу атаки).

Таким образом, скорость воздуха над крылом получается больше, чем под крылом (рис. 15, *б*),

По закону Бернулли, чем больше скорость потока, тем меньше в нём давление. Следовательно, над крылом образуется пониженное давление, а под крылом — повышенное; к этому добавляется трение воздуха в пограничном слое и в результате возникает сила  $P$ , направленная в сторону меньшего давления,— полная аэродинамическая сила крыла. Конечно, воздух давит снизу вверх не в одной точке крыла, как изображено на нашем рисунке, а на всю площадь крыла. Но давление воздуха на всё крыло, то есть полную аэродинамическую силу, можно изобразить одной стрелкой  $P$ , как бы приложенной в центре давления (сокращенно: Ц. Д.).

Полную аэродинамическую силу  $P$  мы можем заменить, как уже делали раньше, двумя силами  $L$  и  $P$ , направленными по потоку и перпендикулярно к нему. Сила  $L$  — лобовое сопротивление крыла, а сила  $P$  — его подъёмная сила.

У хороших крыльев подъёмная сила при самом выгодном угле атаки бывает примерно в 20 раз больше силы лобового сопротивления. Таким образом, главная доля полной аэродинамической силы крыла идёт на поддержание самолёта.

Интересно, что многие крылья развивают подъёмную силу даже при нулевом угле атаки, то есть когда воздух набегает на крыло параллельно хорде профиля (рис. 15, в). На первый взгляд это кажется совершенно непонятным, так как при нулевом угле атаки давление под крылом повышенено немного (по сравнению с давлением вдали от крыла). Зато над крылом благодаря увеличению скорости струек при обтекании верхней выпуклой части давление воздуха значительно понижено. Выходит, что и в этом случае благодаря несимметричности профиля разность давлений под крылом и над крылом всё-таки имеется.

С малым углом атаки самолёт летает при самой большой скорости, какую он может развить при полной мощности силовой установки. Тогда даже малый угол атаки оказывается достаточным для создания подъёмной силы, равной весу самолёта.

С увеличением угла атаки подъёмная сила растёт.

К сожалению, это происходит только до угла в 15—16 градусов, так как при таком угле плавность об-

текания уже сильно нарушается (рис. 15, г). Струйки воздуха отрываются от верхней поверхности крыла, образуются вихри, лобовое сопротивление возрастает, а подъёмная сила начинает падать. Угол атаки, при котором это происходит, называют критическим. При таком угле атаки самолёт уже плохо управляем и неустойчив.

Чтобы улучшить обтекание крыла на больших углах атаки, русский учёный С. А. Чаплыгин (1869—1942), ученик и соратник Н. Е. Жуковского, предложил щелевые

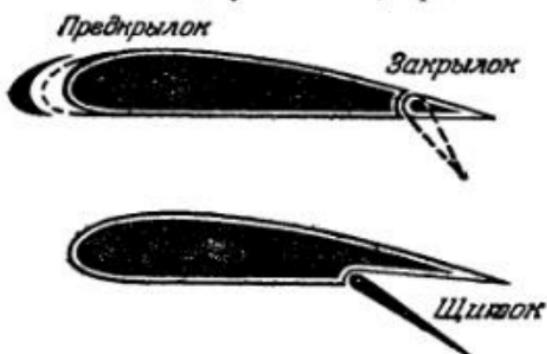


Рис. 16. Механизированные крылья.

крылья. Идея их состоит в том, что крыло снабжают так называемым предкрылком и благодаря щели между ним и крылом (рис. 16) поток более плавно обтекает крыло даже на больших углах атаки. Объясняется это тем, что струйки воздуха, проходя через узкую щель, увеличивают свою скорость и увлекают за собой другие струйки, задерживая их отрыв от крыла. Поэтому плавное обтекание крыла сохраняется дольше и подъёмная сила не перестаёт возрастать до угла атаки в 25 градусов, а иногда и больше.

Ещё чаще применяют закрылки и так называемые щитки, расположенные у задней кромки крыла. При взлёте и посадке лётчик отклоняет закрылки или щитки вниз на угол 30—40 градусов и благодаря этому как бы увеличивает кривизну нижней поверхности крыла, что ведёт к увеличению подъёмной силы. При взлёте это сокращает длину разбега, а при посадке уменьшает скорость самолёта во время приземления.

Применение предкрылков, закрылков и щитков получило в наше время название механизации крыла.

Механизированные крылья широко распространены во всём мире.

## КАК РАБОТАЕТ ВОЗДУШНЫЙ ВИНТ

**В** полёте самолёт всё время преодолевает сопротивление воздуха. Эту работу выполняет его силовая установка, состоящая либо из поршневого двигателя внутреннего сгорания и воздушного винта, либо из реактивного двигателя. Мы кратко расскажем только о воздушном винте.

С воздушным винтом каждый из нас знаком с детства.

В деревнях ребята часто устанавливают на воротах двухлопастную ветрянку, которая при ветре вращается так быстро, что лопасти её сливаются в сплошной круг. Ветрянка и есть простейший винт. Если насадить такой винт на ось, сильно закрутить между ладонями и выпустить, то он с жужжанием полетит вверх.

Воздушный винт самолёта насаживается на вал двигателя. При вращении винта лопасти набегают на воздух под некоторым углом атаки и отбрасывают его назад, благодаря чему, как бы отталкиваясь от воздуха, стремятся двигаться вперёд. Таким образом, при вращении воздушный винт развивает аэродинамическую силу, направленную вдоль оси винта. Эта сила тянет самолёт вперёд и поэтому называется силой тяги.

Воздушный винт может иметь две, три или четыре лопасти. Профиль (сечение) лопасти подобен профилю крыла.

В работе по созданию силы тяги большую роль играют шаг воздушного винта и угол установки лопасти к плоскости вращения.

Шагом воздушного винта называют расстояние, которое винт должен был бы пройти за один свой полный оборот, если бы он ввинчивался в воздух, как болт в гайку. В действительности же при полёте самолёта воздушный винт из-за малой плотности воздуха продвигается на несколько меньшее расстояние.

Шаг воздушного винта получается тем больше, чем больше угол установки лопасти к плоскости вращения (рис. 17, а).

Таким образом, винт с большим углом установки лопастей быстрее «шагает», чем винт с малым углом установки (подобно тому как болт с крупной резьбой быстрее ввинчивается в гайку, чем болт с мелкой резьбой). Следовательно, винт с большим шагом нужен для большой скорости полёта, а с малым шагом — для малой скорости.

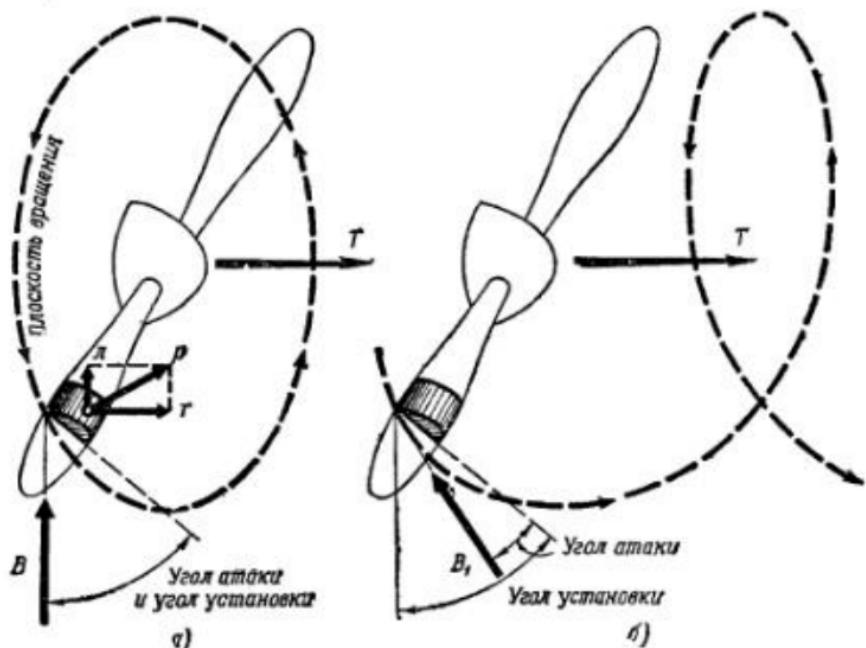


Рис. 17. Возникновение силы тяги воздушного винта и угол атаки лопасти: а) при работе винта на месте и б) в полёте.

Работа лопастей воздушного винта подобна работе крыла. Но движение винта сложнее. В отличие от крыла лопасти винта в полёте не только движутся вперёд, но и вращаются при этом. Эти движения складываются, и поэтому лопасти винта движутся в полёте по некоторой винтовой линии (рис. 17, б). Посмотрим, как возникает сила тяги воздушного винта.

Для этого выделим на каждой лопасти маленький элемент, ограниченный двумя сечениями (рис. 17, а). Его

можно считать за маленькое крыло, которое в полёте движется по винтовой линии, набегая на воздух под некоторым углом атаки. Следовательно, элемент лопасти, подобно крылу самолёта, создаст аэродинамическую силу  $P$ . Эту силу мы можем разложить на две силы — параллельно оси винта и перпендикулярно к ней. Сила, направленная вперёд, и будет силой тяги элемента лопасти, вторая же, маленькая сила, направленная против вращения винта, будет тормозящей силой.

Элементарные силы тяги обеих лопастей в сумме дадут силу тяги  $T$  всего винта, как бы приложенную к его оси. Тормозящие силы преодолевает двигатель.

Сила тяги винта очень сильно зависит от скорости полёта. С увеличением скорости она уменьшается. Почему это происходит и какое имеет значение для полёта?

Когда самолёт стоит на земле и силовая установка работает, то лопасти винта имеют только одну скорость — окружную (рис. 17, а). Значит, воздух набегает на лопасть по направлению стрелки  $B$ , показанной в плоскости вращения винта. Угол между этой стрелкой и хордой профиля лопасти будет, очевидно, углом атаки. Как видим, при неподвижном воздухе он равен углу установки лопасти к плоскости вращения. Иначе получается в полёте, когда, кроме вращательного движения, винт движется ещё и вперёд (вместе с самолётом).

В полёте эти движения складываются, и в результате лопасть движется по винтовой линии (рис. 17, б). Поэтому воздух набегает на лопасть по направлению стрелки  $B_1$ , и угол между ней и хордой профиля будет углом атаки. Вы видите, что угол атаки стал меньше угла установки. И чем больше будет скорость полёта, тем меньше станут углы атаки лопастей, а поэтому тем меньше станет и сила тяги (при неизменном числе оборотов винта).

Этот недостаток в особенности присущ простому винту, у которого угол установки лопастей, а тем самым и шаг винта, нельзя изменять в полёте (простой винт имеет и другие недостатки). Гораздо более совершенен винт изменяемого шага (рис. 18). Такой винт благодаря особому устройству втулки без участия лётчика изменяет свой

шаг. Когда лётчик уменьшает скорость полёта, шаг винта тотчас же уменьшается, когда же лётчик увеличивает скорость, винт увеличивает шаг.



Рис. 18. Трёхлопастный воздушный винт изменяемого шага на пассажирском самолёте.

В современной авиации применяются почти исключительно винты изменяемого шага.

### САМОЛЁТ ЛЕТИТ ГОРИЗОНТАЛЬНО, ПРЯМОЛИНЕЙНО И РАВНОМЕРНО

**В**ысоко в небе летит пассажирский самолёт (рис. 19). Большие крылья легко несут воздушный корабль, а мощный гул винтов свидетельствует о напряжённой работе двигателей. Самолёт летит горизонтально, прямолинейно и равномерно...

Под действием каких сил происходит такой полёт?

Из первого закона механики, открытого великим английским учёным Исааком Ньютона (1643—1727), следует, что прямолинейное равномерное движение проис-

ходит без действия каких-либо сил — по инерции \*). На первый взгляд это кажется совершенно непонятным, так как из жизни мы знаем, что без силы тяги невозможно осуществить прямолинейное равномерное движение. Но дело в том, что сила тяги нужна только для того, чтобы всё время преодолевать тормозящую силу, от которой мы не можем избавиться. Если бы её не было, то тело, раз получив движение, двигалось бы вечно — по инерции.

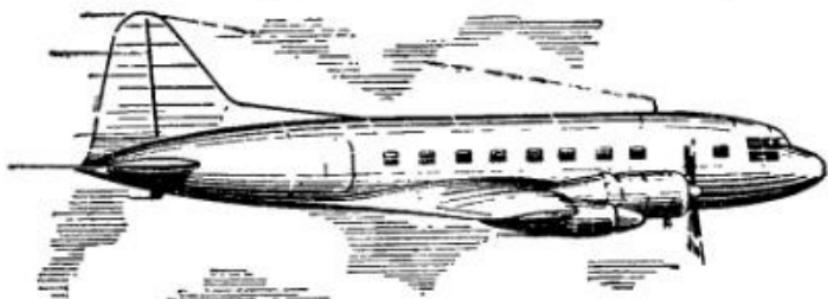


Рис. 19. Пассажирский 27-местный самолёт ИЛ-12 конструкции С. В. Ильюшина в горизонтальном полёте.

Приведём простой пример.

По реке движется моторная лодка с постоянной скоростью. Сила тяги гребного винта, преодолевая силу сопротивления воды и силу сопротивления воздуха, должна быть равна их сумме, иначе равномерного движения не получится: если сила тяги будет больше тормозящих сил, движение будет ускоренным, если сила тяги станет меньше их, движение замедлится. Таким образом, для прямолинейного равномерного движения лодки необходимо, чтобы действующие на неё силы взаимно уравновешивались, то есть чтобы сумма их равнялась нулю. А ведь это и означает, что такое движение происходит без каких-либо сил — по инерции.

Следовательно, и для прямолинейного полёта с постоянной скоростью (установившегося полёта) тоже необходимо, чтобы действующие на самолёт силы взаимно уравновешивались. Это справедливо как для горизонтального полёта, так и для подъёма и спуска.

\* ) Всякое тело сохраняет своё состояние покоя или прямолинейного равномерного движения до тех пор, пока какая-нибудь сила не выведет его из этого состояния (первый закон Ньютона, называемый законом инерции).

Вот самолёт летит горизонтально и прямолинейно (рис. 20) с постоянной скоростью при некотором угле атаки  $\alpha$ .

На самолёт действуют три главные силы: сила веса  $B$ , сила тяги  $T$  и полная аэродинамическая сила  $P$  всего самолёта, которую удобнее представить в виде её слагаемых — подъёмной силы  $P$  и силы лобового сопротивления  $L$ .

Сила веса всегда приложена в центре тяжести самолёта \*). Другие силы обычно приложены хотя и близко

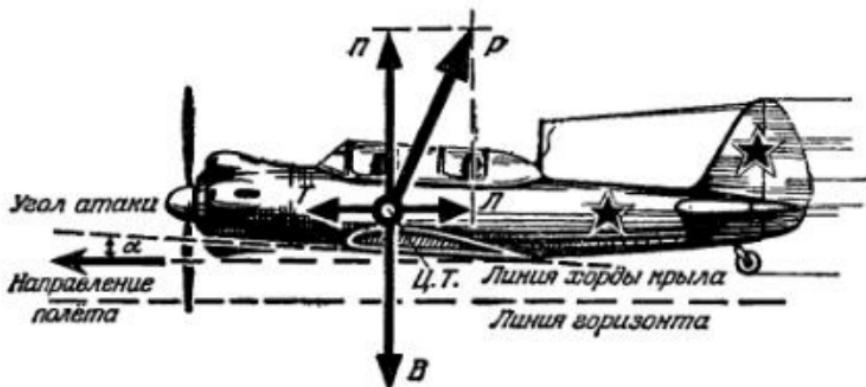


Рис. 20. Силы, действующие на самолёт в установившемся горизонтальном полёте. Подъёмная сила  $P$  равна силе веса  $B$ , а сила тяги винта  $T$  равна силе лобового сопротивления  $L$ . Ц. Т.— центр тяжести.

от центра тяжести, но в других точках. Однако ради простоты будем пока считать, что они приложены тоже в центре тяжести.

Сила веса всегда направлена вертикально вниз, то есть отвесно. Подъёмная сила всегда перпендикулярна к воздушному потоку, значит, в горизонтальном полёте она направлена вертикально вверх. Сила тяги направлена, конечно, вперёд — по движению, а сила лобового сопротивления — назад, против движения.

При установившемся прямолинейном полёте силы должны взаимно уравновешиваться.

Так как подъёмная сила направлена вертикально вверх, а сила веса — вертикально вниз, то, очевидно,

\*.) Центром тяжести тела называется воображаемая точка, в которой как бы приложена сила веса тела.

подъёмная сила и должна уравновесить силу веса. Сила тяги должна уравновесить тормозящую силу, то есть силу лобового сопротивления.

Таким образом, в горизонтальном установившемся полёте подъёмная сила равна весу самолёта, а сила тяги равна лобовой силе.

Ну, а если нужно изменить скорость горизонтального полёта? Казалось бы, что для этого достаточно изменить тягу винта, как это делает водитель моторной лодки. Но здесь дело не так просто. Если лётчик изменит только тягу винта, то изменится и подъёмная сила крыла (поскольку она зависит от скорости полёта), равновесие её с силой веса нарушится, и поэтому траектория полёта ис-



Рис. 21. Горизонтальный полёт с разными скоростями: а) максимальная скорость при очень малом угле атаки, б) — некоторая средняя скорость, в) — минимальная скорость при критическом угле атаки.

кривится вверх или вниз. Следовательно, одновременно с изменением тяги винта лётчик должен сделать ещё что-то.

Подъёмная сила крыла зависит также от угла атаки, с увеличением его она растёт, с уменьшением — падает. Так как лётчик может изменять угол атаки (рулем высоты), то тем самым он может изменять и величину подъёмной силы.

Таким образом, для изменения скорости полёта в распоряжении лётчика имеются рычаги управления силовой установкой и рулём высоты.

Теперь предположим, что в горизонтальном полёте двигатель работает на полной мощности, и самолёт летит с максимальной скоростью. При такой скорости достаточно очень малого угла атаки, чтобы подъёмная сила была равна весу самолёта (рис. 21, а).

Но вот лётчик решил немного уменьшить скорость полёта. Для этого он уменьшает обороты двигателя и одновременно увеличивает угол атаки (рис. 21, б). В результате уменьшения скорости подъёмная сила должна уменьшиться, а в результате увеличения угла атаки она должна увеличиться. Вот и получается, что в итоге она остаётся неизменной, равной весу самолёта.

И чем меньшую скорость хочет получить лётчик, тем больше он увеличивает угол атаки (рис. 21, в), соответственно изменяя тягу винта. Положение, изображённое на рис. 21, в, примерно соответствует полёту с минимальной (наименьшей) возможной скоростью. Она получается при критическом угле атаки. Со скоростью, меньшей минимальной, самолёт летать не может.

Все скорости, с которыми самолёт может лететь горизонтально, составляют, как говорят, диапазон скоростей самолёта. Например, минимальная скорость самолёта ЯК-18 равна 100 километрам в час, а максимальная — 257 километрам в час, следовательно, этот самолёт может лететь с любой скоростью в диапазоне от 100 до 257 километров в час.

Чем больше диапазон скоростей горизонтального полёта, тем лучше самолёт.

## РАВНОВЕСИЕ САМОЛЁТА

Для устойчивого равновесия самолёта в полёте большую роль играет положение его центра тяжести.

Центр тяжести самолёта во всех случаях лежит позади передней кромки крыла (рис. 22, а). Расстояние от передней кромки до центра тяжести (расстояние  $C$ ) называют центровкой самолёта. Конструктор самолёта указывает допустимые изменения центровки, то есть возможные перемещения центра тяжести по длине самолёта. Позволительны лишь небольшие перемещения. Однако даже самое правильное положение центра тяжести ещё не обеспечивает самолёту равновесия в полёте. Необходимо также, чтобы моменты всех сил относительно центра тяжести взаимно уравновешивались.

Но что такое момент силы?

Как известно, вращающее действие силы зависит не только от её величины, но и от её «плеча», то есть рас-

стояния от линии действия силы до оси вращения (например, завернуть гайку тем легче, чем длиннее ключ). Произведение величины силы на длину её плеча и назы-

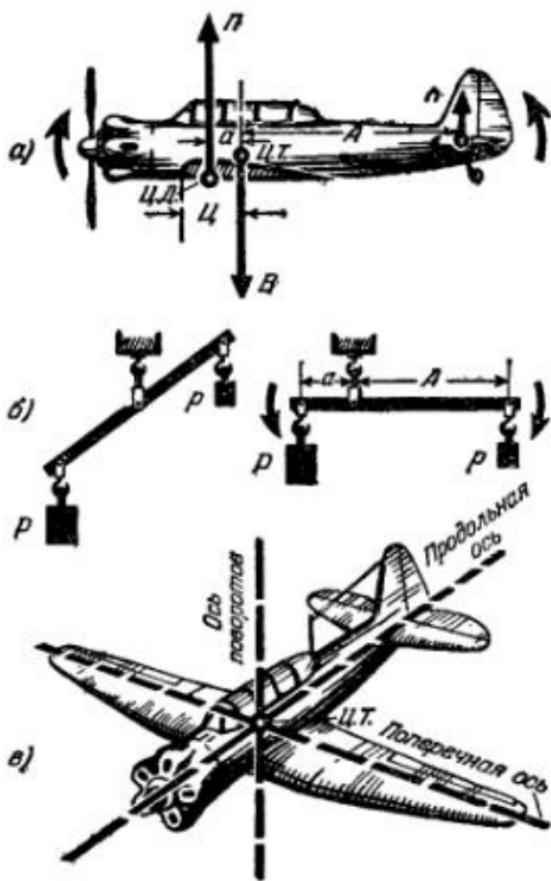


Рис. 22. Продольное равновесие самолёта достигается рулём высоты; а) момент подъёмной силы руля высоты и стабилизатора уравновешивает момент подъёмной силы крыла; б) равновесие весов; в) оси вращения самолёта.

вается в механике моментом силы. Чем больше будет момент силы, тем больше будет и её вращающее действие.

Теперь сделаем маленький опыт, чтобы познакомиться с равновесием моментов сил.

Если вы положите на одну чашку простейших весов (рис. 22, б) грузик  $p$ , а на другую груз  $P$ , в пять раз больший, то эта чашка, естественно, перетянет. Но можно уравновесить наши весы и при неравных грузах, передвинув нитку, на которой вращается коромысло, ближе к чашке с большим грузом. Уравновесив весы, вы убедитесь, что плечо  $A$  в пять раз длиннее плеча  $a$ .

Таким образом, если две неравные силы стремятся вращать тело в противоположные стороны, то они будут уравновешивать друг друга в том случае, если произведение одной силы на её плечо равно произведению другой силы на её плечо, то есть если моменты сил равны.

Из нашего опыта следует также, что маленькая сила, действуя на достаточно большое плечо, может даже преодолеть большую силу. Это легко проверить, если передвинуть ось вращения ещё ближе к чашке с большим грузом,— тогда маленький грузик, момент которого теперь преобладает, перетянет.

Все сказанное справедливо и для самолёта в полёте.

Раньше мы для простоты считали, что все главные силы приложены в центре тяжести самолёта, то есть моменты их относительно центра тяжести равны нулю (поскольку плечо каждой силы равно нулю). В действительности же дело обстоит иначе. В центре тяжести приложена только сила веса, а точки приложения других сил обычно не совпадают с центром тяжести. Следовательно, самолёт всегда находится под действием нескольких моментов сил, стремящихся поворачивать (вращать) самолёт вокруг центра тяжести. И для того, чтобы самолёт сохранял равновесие, лётчику приходится уравновешивать моменты сил.

Итак, уравновесить самолёт в полёте — это значит уравновесить моменты сил относительно его центра тяжести.

Какие же моменты действуют на самолёт в полёте и как лётчик приводит их к равновесию?

Самолёт в воздухе может вращаться вокруг многих воображаемых осей, проходящих через центр тяжести. Главными из них являются три взаимно перпендикулярные оси: поперечная, продольная и ось поворотов (рис. 22, в). Поэтому моменты сил удобнее рассматривать относительно этих осей.

Моменты сил, стремящиеся вращать самолёт вокруг поперечной оси (поднимать или опускать его нос), называют продольными. Уравновесив их, лётчик создаст продольное равновесие самолёта.

Моменты сил, стремящиеся вращать самолёт вокруг продольной оси (кренить его на то или другое крыло), называют накренивающими. Если их уравновесить, будет достигнуто поперечное равновесие.

Моменты сил, стремящиеся вращать самолёт вокруг оси поворотов (вправо или влево), называют заворачивающими. Уравновесив их, лётчик получает путевое равновесие самолёта.

Особого внимания от лётчика требует продольное равновесие. При нарушении его изменяется угол атаки крыла и, следовательно, его подъёмная сила, а это ведёт к искривлению траектории полёта в вертикальной плоскости.

На самолёт действуют два главных продольных момента: момент подъёмной силы крыла  $P \cdot a$  и момент подъёмной силы горизонтального оперения  $p \cdot A$  (рис. 22, а). Они стремятся вращать самолёт вокруг поперечной оси в противоположных направлениях. Лётчик уравновешивает их рулём высоты. Отклоняя руль немного вверх или вниз, он изменяет угол атаки горизонтального оперения и величину его подъёмной силы. Следовательно, лётчик может так подобрать величину момента подъёмной силы горизонтального оперения, чтобы он был равен моменту подъёмной силы крыла, то есть чтобы самолёт сохранял продольное равновесие.

Поперечное равновесие достигается при помощи элеронов (рис. 23, а). Опущенный элерон увеличивает подъёмную силу полукрыла, а поднятый уменьшает. При этом создаётся накренивающий момент, который может уравновесить накренивающий момент противоположного направления, например, накренивающий момент винта (воздушный винт, вращаясь в одну сторону, стремится накренить самолёт в противоположную сторону, подобно тому, как, прыгая с лодки на берег, мы отталкиваем лодку в противоположную сторону). Таким образом, достигается поперечное равновесие.

Путевое равновесие лётчик получает с помощью руля направления (рис. 23, б). При отклонении руля на него

действует аэродинамическая сила и создаётся заворачивающий момент, который может уравновесить какой-либо заворачивающий момент противоположного направления, например, момент от действия струи винта на вертикальное оперение (вращающийся винт отбрасывает вращающуюся же струю воздуха, которая действует на вертикальное оперение с той или другой его стороны в зависимости от направления вращения винта).

А как рули и элероны служат для управления самолётом?

Взглянем опять на рис. 22, *a* и представим себе, что лётчик отклонил руль высоты немного больше или

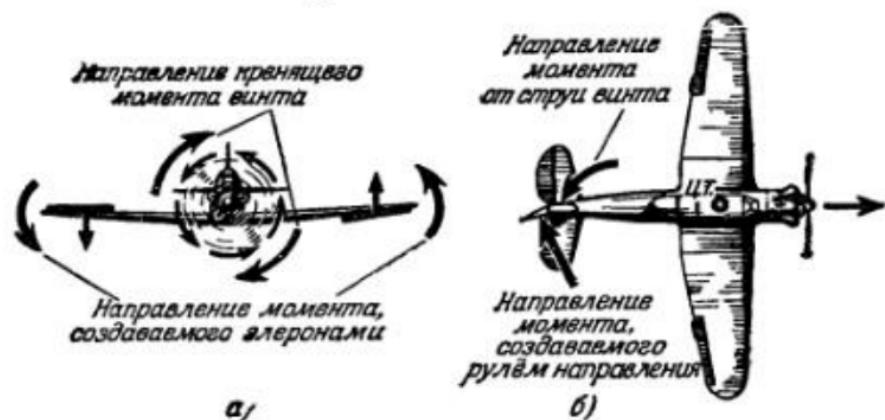


Рис. 23. Поперечное равновесие самолёта достигается при помощи элеронов, а путевое — при помощи руля направления.

меньше, чем он был отклонён при равновесии. Этим лётчик изменит момент горизонтального оперения. Продольное равновесие будет нарушено, и самолёт начнёт поворачиваться вокруг поперечной оси (рис. 24), опуская или поднимая нос, уменьшая или увеличивая угол атаки.

Когда лётчик передвигает ручку рулевого управления от себя, руль высоты отклоняется вниз, на него начинает действовать аэродинамическая сила снизу вверх (рис. 24, *a*), и поэтому самолёт уменьшает угол атаки крыла. Если же лётчик берёт ручку на себя, то руль отклоняется вверх, аэродинамическая сила действует на него сверху вниз, и под её влиянием угол атаки увеличивается (рис. 24, *б*). При этих изменениях угла атаки

траектория полета останется прямолинейной, если лётчик, изменяя угол атаки, будет соответственно изменять и тягу силовой установки. В противном случае траектория полёта искривится вниз или вверх.

С помощью элеронов лётчик может не только сохранять поперечное равновесие, но и накренять самолёт (если понадобится), а с помощью руля направления — не только сохранять путевое равновесие, но и поворачивать самолёт вправо и влево.

Когда лётчик отклоняет ручку рулевого управления вправо, правый элерон поднимается, а левый опускается

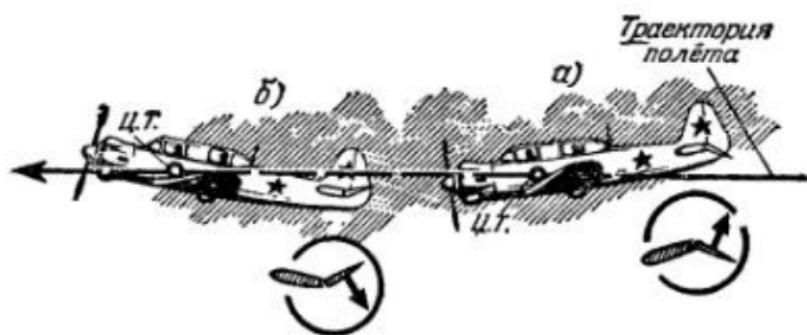


Рис. 24. Действие руля высоты для продольного управления самолётом: а) при отклонении руля вниз угол атаки крыла уменьшается, б) при отклонении руля вверх угол атаки увеличивается.

(рис. 23, а), подъёмная сила правого полукрыла становится меньше, а левого — больше, и поэтому самолёт кренится вправо. При движении ручки влево происходит обратное — и самолёт кренится влево.

Если же лётчик, перемещая ручку вправо, одновременно нажимает правую педаль (рис. 23, б), то самолёт делает разворот вправо. Аналогично делается и левый разворот.

По выражению лётчиков, самолёт в полёте «ходит за ручкой». Однако такой послушной машина бывает только, если она устойчива. Теперь строятся устойчивые и хорошо управляемые самолёты. Расчёт устойчивости и управляемости входит в так называемый аэродинамический расчёт самолёта.

## КАК САМОЛЁТ ВЗЛЕТАЕТ И НАБИРАЕТ ВЫСОТУ

Очень интересно наблюдать взлёт самолёта, когда тяжёлая машина превращается в легкокрылую птицу.

Самой меньшей скоростью, с которой возможен полёт самолёта, является, как нам уже известно, минимальная скорость горизонтального полёта. Но при такой скорости самолёт ещё недостаточно устойчив и плохо управляемся. Поэтому отрыв самолёта от земли лётчик производит на

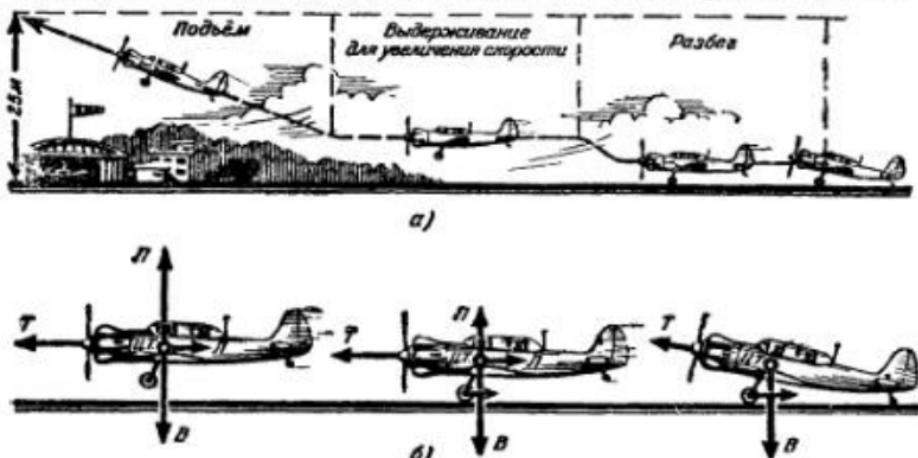


Рис. 25. Взлёт самолёта: а) этапы взлёта, б) силы, действующие на самолёт при взлёте.

несколько большей скорости. После отрыва лётчик продолжает разгон самолёта, как говорят, «выдерживает» машину над землёй до тех пор, пока скорость не станет достаточной для безопасного подъёма.

Таким образом, взлёт самолёта можно разделить на три этапа: разбег, выдерживание над землёй для увеличения скорости и подъём (рис. 25, а).

Эти три этапа составляют так называемую взлётную дистанцию.

Посмотрим, как лётчик производит разбег, какие силы действуют на самолёт при разбеге и как создаётся ускорение движения \*). Ради простоты будем опять считать, что все главные силы приложены в центре тяжести

\* Ускорение — прирост скорости за 1 секунду.

самолёта, то есть моменты их равны нулю (поскольку теперь нас интересуют силы, а не их моменты).

Вот самолёт стоит на старте, готовый к полёту, и двигатель работает на малом газе (рис. 25, б). Тяга винта пока ещё недостаточна для преодоления силы трения колёс о землю. Но лётчик дал полный газ, тяга винта увеличилась до максимальной и самолёт начал разбег. Избыточная тяга создаёт ускорение, и скорость растёт. Чтобы

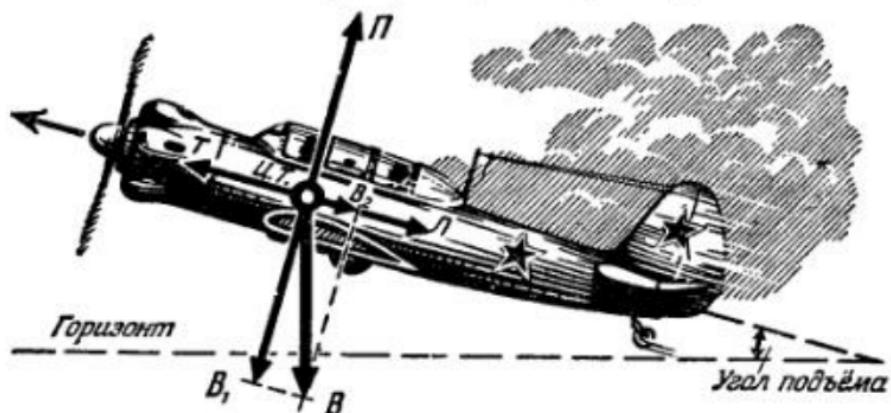


Рис. 26. Действие сил при установившемся подъёме: подъёмная сила крыла равна только одной слагаемой силе веса  $B_1$ , а сила тяги  $T$  равна сумме сил лобового сопротивления  $L$  и силе веса  $B_2$ .

скорость нарастала быстрее, лётчик немного отклоняет руль высоты вниз, поэтому хвост самолёта поднимается и угол атаки крыла уменьшается (рис. 25, б). С ростом скорости возрастает подъёмная сила крыла, и вскоре самолёт уже едва касается колёсами земли. Наконец, подъёмная сила становится равной весу самолёта, затем немного больше её, и машина отрывается от земли (рис. 25, б). Разбег закончен — самолёт взлетел.

Некоторое время машина летит низко, набирая скорость. Затем лётчик отклоняет ручку рулевого управления на себя и переводит самолёт на режим подъёма (рис. 25, а).

При подъёме на самолёт действуют те же силы, что и при горизонтальном полёте, но взаимодействие их несколько иное (рис. 26).

Подъёмная сила крыла всегда перпендикулярна к направлению полёта. Поэтому во время подъёма она направ-

лена уже не вертикально и, следовательно, не может полностью уравновесить силу веса. Если разложить силу веса на две слагаемые силы, как показано на рис. 26, то становится видно, что подъёмная сила крыла может уравновесить только одну из них —  $B_1$ . Другую же слагаемую силы веса —  $B_2$  — вместе с лобовым сопротивлением должна уравновесить, очевидно, сила тяги винта.

Когда самолёт набирает высоту, то подъёмная сила крыла меньше веса самолёта. Почему же в таком случае самолёт набирает высоту? Дело в том, что тяга винта здесь не только преодолевает лобовое сопротивление, но и берёт на себя часть веса самолёта, как это показано на рисунке. Иными словами, при подъёме самолёта сила тяги частично выполняет роль подъёмной силы.

И если самолёт мог бы подниматься вертикально вверх, то неподвижное крыло стало бы совершенно бесполезным — машину поднимала бы вверх исключительно тяга винта. Самолёт превратился бы в вертолёт.

При подъёме самолёт набирает ежесекундно некоторую высоту, которая называется вертикальной скоростью подъёма. Например, вертикальная скорость самолёта ЯК-18 в начале подъёма равна 4 метрам в секунду. Но затем она уменьшается.

Почему это происходит и к чему ведёт?

По мере подъёма на высоту плотность воздуха становится всё меньше и меньше, поэтому в цилиндры двигателя попадает меньше кислорода, нужного для горения топлива, и в результате мощность силовой установки падает. Следовательно, уменьшается избыточная мощность, необходимая для подъёма. И вот, наконец, на какой-то высоте никакой избыточной мощности уже нет, и самолёт не может продолжать подъём. Высоту, на которой это происходит, называют «потолком» самолёта.

## САМОЛЁТ ПЛАНИРУЕТ

Перед посадкой лётчик выключает двигатель или убавляет его обороты до самых малых. Самолёт начинает плавно снижаться по наклонной траектории. Такой спуск самолёта называют планированием.

Чтобы легче понять поведение самолёта при планировании, вообразите, что в горизонтальном полёте неожи-

данно остановился двигатель, и тяга винта внезапно исчезла. Под действием лобового сопротивления скорость полёта начинает падать, а вместе с ней быстро уменьшается и подъёмная сила крыла. Но если лётчик рулём высоты наклонит машину вниз, то в направлении полёта тотчас же начнёт действовать некоторая доля веса самолёта, которая как бы заменит исчезнувшую тягу (подобно тому как при движении автомашины под уклон доля её веса заменяет тягу мотора). Самолёт полетит наклонно к земле, оставаясь вполне управляемым и устойчивым.

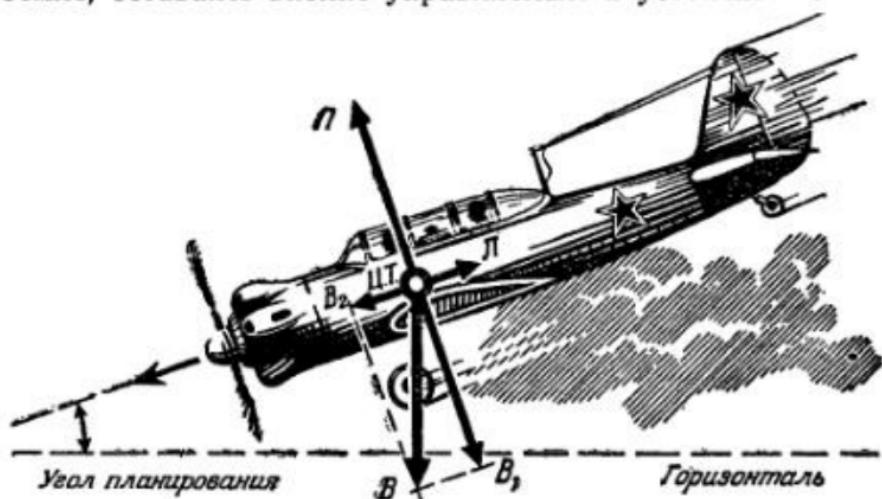


Рис. 27. Действие сил при установившемся планировании самолёта: подъёмная сила  $P$  равна слагаемой силы веса  $B_1$ , другая слагаемая силы веса  $B_2$  равна силе лобового сопротивления  $L$ .

Это наглядно иллюстрирует рис. 27, на котором показаны силы, действующие на самолёт при установившемся планировании с очень малым углом атаки, равным примерно трём-четырём градусам (напомним, что угол атаки — это угол между хордой профиля крыла и направлением полёта).

Так как тяги винта нет, то сейчас действуют только две главные силы: полная аэродинамическая сила  $P$  и сила веса  $B$ . Но первую удобнее будет опять заменить её слагаемыми — подъёмной силой  $P$ , которая перпендикулярна к направлению полёта, и лобовой силой  $L$ , направленной против полёта. Силу веса тоже можно разложить на две слагаемые: по линии действия подъёмной силы

и в направлении полёта. Теперь видно, что подъёмная сила крыла может уравновесить лишь одну слагаемую веса —  $B_1$ . Другая же слагаемая веса —  $B_2$ , направленная вперёд и играющая роль тяги, уравновешивает силу лобового сопротивления.

Если на планировании лётчик передвинет ручку рулевого управления немного от себя, то самолёт перейдёт в более крутное планирование. Поэтому сила веса, играющая роль тяги, станет больше лобовой силы и сообщит самолёту ускорение (ведь и автомашина, когда уклон становится круче, катится всё быстрее).

Крутое планирование самолёта называют пикированием.



Рис. 28. Посадка самолёта и её этапы.

При пикировании скорость самолёта может стать очень большой. При отвесном пикировании она может превысить скорость горизонтального полёта примерно в два раза. Пикирование применяется при фигурных полётах, в воздушном бою и при бомбометании.

Планируя над аэродромом, лётчик делает глазомерный расчёт на посадку. Чтобы осуществить этот расчёт, он выполняет два-три разворота в одну и ту же сторону (по кругу). С высоты 100—150 метров планирует по прямой к намеченной точке посадки.

Когда до земли остаётся 6—10 метров, лётчик по немногу начинает выравнивать самолёт, уменьшает угол планирования (рис. 28). При этом слагаемая сила веса, играющая роль тяги, уменьшается, и скорость полёта падает.

На высоте около 1 метра над землёй лётчик заканчивает выравнивание, и траектория полёта переходит из наклонной в горизонтальную.

Однако горизонтальный полёт возможен, как известно, только в том случае, если подъёмная сила равна весу самолёта. Между тем из-за отсутствия тяги скорость продолжает падать, поэтому должна уменьшаться и подъёмная сила. Поскольку лётчик должен приземлить самолёт с наименьшей скоростью, то он как можно дольше не даёт машине коснуться земли — выдерживает её над землёй, стремясь «погасить» скорость. Для этого лётчик постепенно увеличивает угол атаки, чтобы подъёмная сила ещё некоторое время оставалась равной весу самолёта.

Но вот угол атаки доведён почти до критического, самолёт принял положение, которое он имеет при стоянке на земле. Скорость уже близка к минимальной скорости горизонтального полёта, подъёмная сила начинает падать, становится меньше веса — и самолёт мягко касается колёсами земли. По инерции он бежит по земле, но в результате торможения скоро останавливается. Полёт окончен.

Посадка, как и взлёт, обычно производится против ветра. Встречный ветер уменьшает скорость самолёта относительно земли во время приземления и длину пробега. То и другое облегчает выполнение посадки.

## ВИРАЖИ И ФИГУРЫ В ПОЛЕТЕ

**П**очему самолёт может делать виражи \*) и фигуры? Какие силы заставляют тяжёлую машину легко кувыркаться в воздухе? Как лётчик управляет этими силами в криволинейном полёте?

Конечно, это всё те же аэродинамические силы. И в криволинейном полёте опять-таки главную роль играет подъёмная сила крыла.

Известно, что всякое тело по инерции стремится двигаться прямолинейно. Чтобы заставить его двигаться по кривой, нужна так называемая центростремительная сила. Вот пример.

\*) Вираж — французское слово, означает поворот.

Если привязать нитку к камню и вращать его, то нитка натягивается и, удерживая камень, заставит его описывать круги. Движение камня по окружности будет происходить под действием силы вашей руки. Передаваясь через нитку, эта сила не позволяет камню удалиться от центра вращения. Если нитка оборвётся, то действие этой

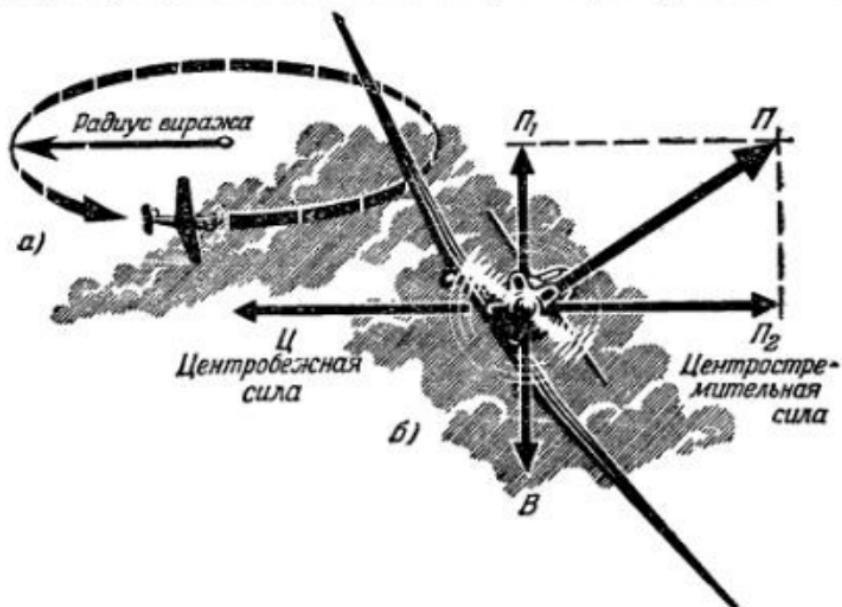


Рис. 29. Вираж самолёта: а) вираж по кругу; б) действие сил на вираже: вертикальная слагаемая подъёмной силы  $P_1$  уравновешивает силу веса  $B$ , а горизонтальная слагаемая  $P_2$  играет роль центростремительной силы.

силы прекратится и камень по инерции полетит прямолинейно. Сила, с которой ваша рука действует на камень и заставляет его вращаться вокруг некоторого центра, и называется центростремительной (она направлена от окружности к центру).

При движении велосипедиста по кривой линии центростремительной силой служит слагаемая силы веса, так как велосипедист наклоняет машину в сторону поворота. При движении самолёта по криволинейной траектории роль центростремительной силы обычно выполняет слагаемая подъёмной силы крыла (рис. 29, а). Когда лётчик наклоняет самолёт на некоторый угол в сторону желае-

мого разворота, то на такой же угол отклоняется от вертикали и подъёмная сила (рис. 29, б). И если разложить её на две слагаемые — по вертикали и горизонтали, то становится ясно, что слагаемая  $P_1$  поддерживает самолёт в воздухе, а слагаемая  $P_2$ , направленная к центру виража, служит центростремительной силой (ей всегда сопутствует центробежная сила  $C$ , направленная в противоположную сторону).

Чтобы подъёмной силы крыла хватило и на то и на другое, лётчик при вводе самолёта в вираж увеличивает угол атаки (или скорость полёта).

Накреняя самолёт элеронами в сторону виража, лётчик одновременно отклоняет в ту же сторону и руль направления (действующий подобно рулю лодки). Благодаря этому самолёт разворачивается «охотнее».

На самолёте можно делать виражи различных радиусов. Особенно важны виражи малых радиусов (например, при фигурных полётах или в воздушном бою, когда нужно быстро развернуться). Для уменьшения радиуса виража приходится увеличивать крен — ведь при этом растёт центростремительная сила.

Радиус виража сильно зависит от скорости полёта.

Вы знаете, что при быстром беге, быстрой езде на велосипеде, мотоцикле, автомобиле трудно сделать крутой поворот, для поворота приходится уменьшать скорость. Так и на самолёте: если лётчик желает уменьшить радиус виража, то он должен уменьшить скорость полёта.

По этой причине тихоходный самолёт может делать виражи малых радиусов, а истребитель — только больших радиусов. Например, самолёт ПО-2 может сделать вираж с радиусом всего в 60 метров, тогда как истребитель делает вираж с радиусом самое меньшее 350—400 метров. Именно поэтому во время Великой Отечественной войны самолёты ПО-2 нередко спасались от нападения фашистских истребителей: в опасный момент советский лётчик делал крутой вираж и самолёт противника, не имея возможности так же круто развернуться, проскакивал мимо.

Очень интересен быстрый вираж с одновременным подъёмом, который называют боевым разворотом (рис. 30, а).

Для боевого разворота лётчик накреняет машину элеронами и одновременно сильно увеличивает угол атаки. Самолёт с креном круто взмывает вверх, причём по мере подъёма крен увеличивается, а радиус разворота уменьшается.

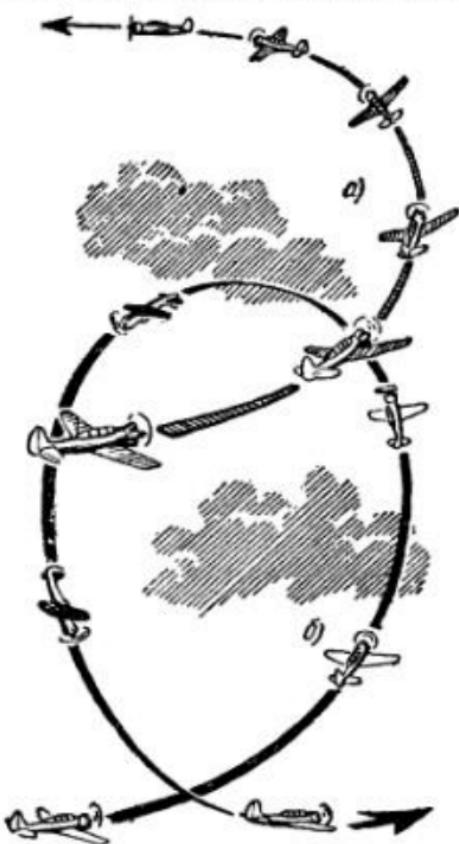


Рис. 30. Фигурный полёт самолёта:  
а) боевой разворот, б) петля Нестерова.

шается. Затем лётчик выравнивает самолёт и берёт нужное направление полёта.

Самая эффектная фигура — петля Нестерова (рис. 30, б). Первым в мире её выполнил замечательный русский лётчик П. Н. Нестеров в 1913 году. В прежние времена в цирках показывали очень интересный номер. Акробат на велосипеде или на тележке съезжал по крутым настилам, изгибавшимся затем в виде вертикальной

петли. Вершину петли акробат проезжал вниз головой. Этот номер именовался «мёртвой петлёй».

Подобием её и является петля, выполняемая на самолёте,— с той лишь разницей, что разгон самолёта достигается тягой силовой установки.

Для выполнения петли лётчик в горизонтальном полёте энергично берёт ручку рулевого управления на себя. Поэтому угол атаки крыла сильно увеличивается, подъёмная сила резко возрастает и становится больше силы веса, то есть появляется некоторый излишек подъёмной силы. Под действием излишка подъёмной силы траектория полёта круто изгибается вверх. Самолёт описывает первую половину петли при работе двигателя на полном газе. На вершине петли машина оказывается вверх колёсами, а лётчик — вниз головой. Всегда сопутствующая центrostремительной силе центробежная сила как бы прижимает самолёт к воздуху, находящемуся выше его, а лётчика — к сидению. Когда самолёт переходит за вершину петли, лётчик уменьшает тягу винта до самой малой и ставит ручку управления в среднее положение, а затем выбирает её на себя, чтобы перевести самолёт из пикирования в нормальный полёт.

Действие центrostремительной и центробежной сил можно легко проверить на опыте с вращением камня, если последний заменить ведёрком с водой. При вращении вокруг некоторого центра ведёрко будет описывать «мёртвую петлю» и вода из него не выльется. Центробежная сила будет отбрасывать ведёрко от центра к окружности и прижимать воду к донышку, как прижимает и лётчика к сидению.

Форма петли, выполняемой на самолёте, получается не круглой, а несколько вытянутой вверх. Это объясняется тем, что при подъёме на вершину петли скорость падает, и радиус кривизны траектории уменьшается. Во второй половине петли (при пикировании) скорость снова нарастает, и радиус опять увеличивается.

Кроме петли Нестерова и боевого разворота, на самолёте можно выполнять и другие фигуры — так называемую горку, переворот через крыло, двойной переворот, называемый «бочкой», и т. д.

Фигурный (высший) пилотаж играет большую роль в подготовке лётчиков. Цель его — научить лётчика манев-

рировать в полёте и развить в нём уверенность в своих силах, выносливость, самообладание, бесстрашие.

Эту цель и ставил себе основоположник высшего пилотажа П. Н. Нестеров. Советские лётчики — его достойные последователи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В** ся история развития самолёта — от его рождения до наших дней — это история борьбы за скорость полёта. Дальнейшее развитие авиации, несомненно, будет также тесно связано с ростом скорости полёта.

Половека назад максимальная скорость полёта была всего лишь около 100 километров в час, а в наше время она намного превышает 1000 километров в час. Как был достигнут этот замечательный успех авиации?

Сначала скорость росла благодаря непрерывному улучшению аэродинамических форм самолёта и увеличению мощности его силовой установки. Однако к 40-м годам нашего века аэродинамические формы самолёта были доведены уже до такого совершенства, что дальнейшее улучшение их могло дать лишь незначительный выигрыш в скорости. Увеличение мощности силовой установки также не сулило большой выгоды, так как с увеличением мощности возрастают вес и размеры поршневого двигателя; это ведёт к повышению веса самолёта и его лобового сопротивления — в результате скорость увеличивается незначительно.

Мешали и другие причины, лежащие в самой природе полёта с большими скоростями.

Воздух, как и всякий газ, легко подвергается сжатию. Сжимаемость воздуха мы часто наблюдаем в быту. Например, волейбольный мяч приобретает значительную твёрдость, когда в него накачивают много воздуха. Ещё большую твёрдость приобретает автокамера, в которую воздух накачивают под большим давлением. Следовательно, сжатие воздуха получается тем больше, чем большее давление.

При сравнительно небольших скоростях полёта (до 400—500 километров в час) давление воздуха перед самолётом хотя и повышается, но незначительно. Поэтому и сжатие воздуха тоже невелико. Но при больших скоро-

стях, близких к скорости звука и тем более превышающих её, давление и сжатие воздуха сильно возрастают \*). Появляется дополнительное, так называемое волновое



Рис. 31. Советские реактивные истребители в полёте.

сопротивление, которое в несколько раз увеличивает лобовое сопротивление самолёта. Для преодоления большого лобового сопротивления обычная силовая установка оказывается малопригодной.

Дело осложняется ещё тем, что с увеличением скорости полёта тяга воздушного винта неуклонно падает. Мало того, при очень больших скоростях полёта лопасти винта тоже испытывают волновое сопротивление, поэтому полезная работа винта уменьшается.

\* ) Скорость распространения звука у поверхности земли равна приблизительно 1200 километрам в час.

Новый период в борьбе за скорость полёта начался с появлением реактивных двигателей.

Отличительной особенностью реактивных двигателей является то, что тяга их с увеличением скорости не падает, а даже немного увеличивается. Поэтому при больших скоростях полёта реактивный двигатель оказывается гораздо выгоднее обычной силовой установки. Вот почему



Рис. 32. Реактивный пассажирский самолёт ТУ-104 на 50 человек конструкции А. Н. Туполева. Скорость самолёта — 800 километров в час.

реактивному двигателю оказалось под силу преодолевать лобовое сопротивление самолёта при больших скоростях.

С появлением реактивных самолётов скорость полёта сразу возросла и продолжает расти сейчас \*).

В нашем военном воздушном флоте уже полностью наступила, как предсказывал К. Э. Циолковский, «эра аэропланов реактивных». На последних воздушных парадах в Москве участвовала почти исключительно реактивная авиация — от истребителей (рис. 31) до тяжёлых бомбардировщиков.

В гражданском воздушном флоте, вероятно, ещё некоторое время сохранят своё значение обычные винтовые самолёты. Они удобны на товаро-пассажирских воздушных линиях небольшой протяжённости, а также во многих других областях применения самолёта в народном хозяйстве, например, для борьбы с вредителями полей, для

\* ) О реактивных самолётах см. популярную брошюру Гостехиздата: Л. К. Баев и И. А. Меркулов, Самолёт-ракета, издание третье, переработанное.

подкормки посевов, для охраны лесов от пожаров, для аэрофотосъёмки, для исследовательской работы в разного рода экспедициях и т. д.

Но в нашей стране много воздушных линий большой протяжённости. На них уже вводятся реактивные многоместные самолёты — экспрессы конструкции А. Н. Туполева (рис. 32).

Несомненно, что в ближайшем будущем появятся ещё более совершенные скоростные реактивные самолёты.



## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
Из истории самолёта . . . . .	3
Как устроен самолёт . . . . .	8
Воздух и воздушный поток . . . . .	12
Два закона аэродинамики . . . . .	16
Аэродинамические силы . . . . .	19
Как возникает подъёмная сила крыла самолёта . . . . .	24
Как работает воздушный винт . . . . .	29
Самолёт летит горизонтально, прямолинейно и равномерно . .	32
Равновесие самолёта . . . . .	36
Как самолёт взлетает и набирает высоту . . . . .	42
Самолёт планирует . . . . .	44
Виражи и фигуры в полёте . . . . .	47
Заключение . . . . .	52

---

Цена 80 к

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

- Вып. 60. А. Ф. ПЛОНСКИЙ. Пьезоэлектричество.
- Вып. 61. Ф. Д. БУБЛЕЙНИКОВ. Земля.
- Вып. 62. С. А. МОРОЗОВ. По сухе, воде и воздуху.
- Вып. 63. Г. И. БУШИНСКИЙ. Происхождение полезных ископаемых.
- Вып. 64. А. В. ЧУЙКО. Необыкновенный камень.
- Вып. 65. А. П. ЛЕБЕДЕВ и А. В. ЕПИФАНЦЕВА. О чём рассказывают камни.
- Вып. 66. Проф. К. Ф. ОГОРОДНИКОВ. Сколько звёзд на небе.
- Вып. 67. Проф. Н. С. КОМАРОВ. Искусственный холод.
- Вып. 68. Проф. С. К. ВСЕХСВЯТСКИЙ. Как познавалась вселенная.
- Вып. 69. Проф. В. Т. ТЕР-ОГАНЕЗОВ. Солнечные затмения.
- Вып. 70. Ф. И. ЧЕСТНОВ. Загадка ионосфера.
- Вып. 71. В. Д. ЗАХАРЧЕНКО. Мотор.
- Вып. 72. В. А. ЛЕШКОВЦЕВ. Атомная энергия.
- Вып. 73. А. Ф. ПЛОНСКИЙ. Радио.
- Вып. 74. В. А. ПАРФЁНОВ. Редкие металлы.
- Вып. 75. Ф. М. ИВАНОВ и Г. В. БЯЛОЖЕСКИЙ. Искусственные камни.
- Вып. 76. Л. К. БАЕВ. Вертолёт.
- Вып. 77. Ю. М. БОГДАНОВ. Наука о прочности.
- Вып. 78. М. В. БЕЛЯКОВ. Атмосфера.
- Вып. 79. С. МОРОЗОВ. Фотография в науке.
- Вып. 80. И. А. КАЛИНИН. Катализ.
- Вып. 81. К. П. БЕЛОВ. Что такое магнетизм.
- Вып. 82. И. Л. ОРЕСТОВ. Холодный свет.
- Вып. 83. А. А. ШТЕРНФЕЛЬД. Межпланетные полёты.
- Вып. 84. М. ВАСИЛЬЕВ. Вода работает.
- Вып. 85. И. Ф. ДОБРЫНИН. Электроприборы в быту.
- Вып. 86. В. П. ЗЕНКОВИЧ. Морское дно.
- Вып. 87. А. Ф. ПЛОНСКИЙ. Измерения и меры.