

БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

В. П. КАЗНЕВСКИЙ

АЭРОДИНАМИКА В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ



УЧПЕДГИЗ 1958

БИБЛИОТЕКА ШКОЛЬНИКА

В. П. КАЗНЕВСКИЙ

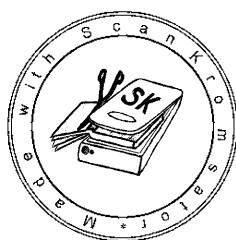
АЭРОДИНАМИКА в ПРИРОДЕ и ТЕХНИКЕ

ИЗДАНИЕ 2-е, ДОПОЛНЕННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР

Москва 1958



Scan AAW

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие авиационной, ракетной и воздуходувной техники во многом связано с достижениями науки, называемой аэродинамикой.

Аэродинамика — это наука, изучающая законы движения воздуха (газа) и силовое взаимодействие между телом и обтекающим его воздухом.

Рассматриваем ли мы движение самолёта, вертолёта, ракеты, пули, автомобиля, лопасти вентилятора, лопасти ветродвигателя, парашюта, а также полёт птицы, насекомого, летучей рыбы, белки-летяги, кленового семечка или явления водяного, песчаного смерча — везде, во всём этом многообразии мы встречаемся с аэродинамическим воздействием воздуха.

Бесчисленны примеры в технике и в природе взаимодействия тел с воздушной или иной газовой средой.

Что происходит в потоке воздуха или иного газа? Что получится, если в этот поток поместить тело, или, наоборот, тело заставить двигаться в неподвижной среде?

Ответы на подобные вопросы даёт аэродинамика. Об основных закономерностях аэродинамики и об их использовании в технике и природе говорится в этой книге.

С незапамятных времён люди с завистью следили за полётом птиц. Они видели, как легко летают птицы, ударяя крыльями о воздух, как парят птицы в воздухе на неподвижно распластанных крыльях. Этот пример в природе рождал мечту о полёте человека. Эту мечту осуществили русские учёные, исследователи и конструкторы, внёсшие большой вклад в изучение и покорение воздуха.

Гениальный учёный, первый русский академик М. В. Ломоносов в 1754 г. на базе своих исследований впервые в истории разработал и построил вертолёт, предназначенный для подъёма в воздух созданных им метеорологических приборов.

Большой вклад в развитие аэродинамики внёс и другой гениальный русский учёный Д. И. Менделеев. Его работы по сопротивлению жидкостей послужили основой для дальнейшего изучения явлений, связанных с движением тел в воздухе.

В 1882 г. в России морским офицером А. Ф. Можайским был построен самолёт, совершивший первый в мире полёт. К сожалению, в те времена полёт Можайского не прославил его имени.

Полёты в природе и технике весьма разнообразны и непосредственно связаны с аэродинамикой. Великий русский аэродинамик, проф. Н. Е. Жуковский, исследуя парение птиц и движение планёров, положил начало новой отрасли науки — динамике полёта.

Он впервые в мире дал теорию крыла и воздушного винта, объяснив возникновение подъёмной силы, поддерживающей летящий самолёт в воздухе.

Профессор Н. Е. Жуковский является создателем науки о полёте летательных машин. Он оставил человечеству много замечательных трудов по теории авиации, ветродвигателей, гребных винтов, полёта птиц, явлений смерча, вихрей и др.

В 1918 г., по указанию В. И. Ленина, Н. Е. Жуковский создал Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), сыгравший исключительную роль в развитии современной авиационной техники.

Ученик проф. Н. Е. Жуковского, академик С. А. Чаплыгин, по праву считается основоположником новой отрасли аэродинамики — аэродинамики больших скоростей, открывшей путь к достижению тех скоростей, с которыми движутся современные самолёты, ракеты, лопасти паровых турбин и воздушных нагнетателей.

Академиком Б. Н. Юрьевым, также являющимся учеником Н. Е. Жуковского, проведены крупнейшие исследования в области теории и расчёта крыла, воздушного винта и вертолёта.

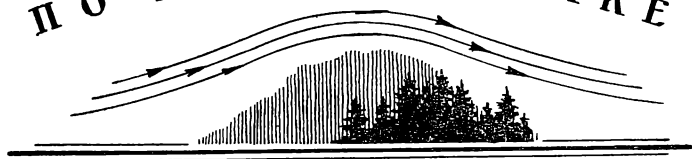
Исключительно крупные исследования в области обтекания тел газом при больших скоростях проведены вы-

дающимся советским учёным академиком С. А. Христиановичем. Кроме того, больших успехов в области аэродинамики добились советские учёные — профессора И. В. Остославский, Я. М. Серебрянский, А. А. Дороницын и другие.

Таким образом, советские аэродинамики своими замечательными исследованиями помогли прославленным авиационным конструкторам А. Н. Туполеву, А. С. Яковлеву, С. В. Ильюшину, А. И. Микояну, С. А. Лавочкину и другим создать совершенные самолёты новых форм.

ЧАСТЬ
I

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ПО АЭРОДИНАМИКЕ



1. Воздушный океан

Воздушный океан простирается над землей на огромную высоту. У поверхности земли (на уровне моря) давление и плотность воздуха достигают наибольшего значения. С высотой давление и плотность воздуха уменьшаются и на высоте $800 \div 1300$ км атмосфера постепенно, незаметно переходит в очень разреженный межпланетный газ, плотность которого крайне ничтожна и составляет всего несколько десятков молекул на 1 см^3 .

Плотность воздуха в движении тела играет значительную роль, а именно: чем больше плотность воздуха, тем больше величина воздействия воздуха на движущееся тело.

В аэродинамике принято различать весовую и массовую плотности.

Весовая плотность есть вес единицы объёма воздуха.

Массовая плотность — это масса воздуха, находящегося в единице объёма¹. Насколько быстро падает плотность с высотой, видно из того, что на высоте 5 км плотность меньше, чем у земли в 1,6 раза, на высоте 20 км — меньше, чем у земли, в 15,6 раза. Из-за уменьшения плотности сопротивление всякого тела на высоте меньше,

¹ Очевидно, весовая и массовая плотность это не что иное, как удельный вес и плотность вещества, выраженные в технической системе единиц. В дальнейшем все расчёты и выводы, приводимые в книге, будут также даваться в технической системе единиц (м—кг—сек).

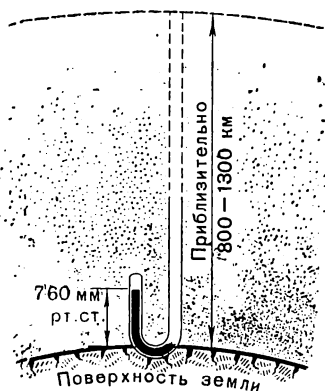
чем у земли. Так, ракета, летящая на высоте 12 км, где плотность в 4 раза меньше, чем на уровне моря, будет испытывать в 4 раза меньшее сопротивление, чем у земли, а на высоте 32 км сопротивление уменьшится в 100 раз. Отсюда видно, как выгодно летать на больших высотах.

Воздух, как всякое газообразное тело, обладает незначительными силами взаимодействия между молекулами, много меньшими, чем силы взаимодействия молекул жидких тел.

Молекулы воздуха всегда находятся в непрерывном беспорядочном движении. Давление газа принято рассматривать как суммарное действие ударов движущихся молекул о препятствие. Скорость движения молекул и число ударов о препятствие зависят от температуры газа и количества молекул в единице объема газа. В технике давление измеряют в килограммах-силы на 1 кв. см ($\text{кг}/\text{см}^2$). Давление в $1 \text{ кг}/\text{см}^2$ называется технической атмосферой и обозначается 1 ат. В физике за давление в 1 атмосферу (физическая атмосфера обозначается атм) принимается давление воздуха на уровне

моря, равное давлению столба воздуха высотой во всю толщу атмосферной оболочки. Давление такого столба уравнивается давлением столба ртути высотой 760 мм при 0°C (рис. 1).

Рис. 1. Давление атмосферы уравнивается столбом ртути высотой 760 мм.



Приборы для измерения давления называются манометрами. Манометры, измеряющие только атмосферное давление, называются барометрами.

Как частицы воды у дна океана испытывают давление, большее, чем в верхних слоях, так и частицы воздуха в «воздушном океане» у поверхности земли подвержены большему давлению, чем частицы в вышележащих слоях. Нижние слои атмосферы сжаты весом всего воздуха, расположенного над ними.

Для практических целей можно принять, что в нижних слоях тропосферы на каждые 100 м высоты давление уменьшается на 0,01 атм.

Свойства атмосферы на одной и той же высоте не остаются постоянными. Давление воздуха у земли в наших широтах может колебаться примерно от 730 мм рт. ст. до 780 мм рт. ст., а температура от -45° до $+35^{\circ}$ С. Меняется плотность воздуха, а с ней и аэродинамические силы, действующие на тело. Из-за этого результаты испытаний одних и тех же самолётов или моделей, произведённых в различное время и в различных местах, будут сильно отличаться друг от друга. Поэтому для удобства аэродинамических расчётов и для возможности сравнения результатов испытаний условились считать, что для данной высоты давление, температура, плотность и скорость распространения звука остаются постоянными, независимыми от времени и места проведения испытания. В соответствии с этим была выработана таблица Международной стандартной атмосферы (МСА), в которой давление, температура, плотность воздуха, скорость звука, хотя и искусственны, но всё же остаются близкими к осреднённым данным, соответствующим летнему состоянию атмосферы средних широт. По таблице МСА на уровне моря принято: давление 760 мм рт. ст., температура $t = 15^{\circ}$ С, плотность $\rho = 0,125 \frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}$, скорость распространения звука 341 м/сек.

Изменение этих величин по высотам видно из приводимой ниже сокращённой таблицы МСА.

Атмосфера делится на тропосферу, стратосферу и ионосферу. Нижний слой атмосферы в умеренных широтах до высоты в среднем $9 \div 11$ км называется тропосферой — в ней большое обилие облаков, ветров и гроз. Там происходят все метеорологические явления — это кузница погоды. Температура и давление в тропосфере по мере удаления от земли падают. Та часть атмосферы, которая расположена над тропосферой и поднимается до высоты около $80 \div 90$ км, называется стратосферой.

¹ Плотность в технической системе единиц (м—кг—сек) имеет размерность $\left[\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4} \right]$.

Таблица Международной стандартной атмосферы

Высота H в м	Давление P в мм рт. ст.	Температура t° в град. С	Плотность ρ $\frac{\text{кг} \cdot \text{сек}^2}{\text{м}^4}$
0	760,0	+ 15,0	0,1249
500	716,0	11,8	0,1190
1 000	674,0	8,5	0,1133
2 000	596,1	2,0	0,1026
3 000	525,7	— 4,5	0,0927
4 000	462,2	— 11,0	0,0835
5 000	404,8	— 17,5	0,0750
6 000	353,7	— 24,0	0,0672
7 000	307,8	— 30,5	0,0601
8 000	266,8	— 37,0	0,0535
9 000	230,4	— 43,5	0,0475
10 000	198,1	— 50,0	0,0420
11 000	169,5	— 56,5	0,0370
15 000	90,2	— 56,5	0,0197
20 000	40,9	— 56,5	0,0089
25 000	18,6	— 56,5	0,0040
30 000	8,4	— 56,5	0,0018

Температура в ней на высоте $11 \div 30$ км около минус $50 \div 60^\circ$, на высоте $30 \div 55$ км повышается, достигая плюс $40 \div 50^\circ$ С, а затем вновь понижается и в верхних слоях стратосферы доходит до минус $70 \div 80^\circ$ С. В стратосфере водяные пары присутствуют в совершенно ничтожных количествах. Изредка в ней появляются облака. В стратосфере наблюдаются сильные ветры. Верхние слои атмосферы, начиная приблизительно с высоты $80 \div 90$ км и до высоты $800 \div 1300$ км называются ионосферой. В этом слое газ ионизирован.

Тропосфера и нижние слои стратосферы достаточно изучены, особенно советскими аэронавтами и метеорологами. Всем известны героические полёты советских стратостатов «СССР» в 1933 г. на высоту 19 км, «Осоавиахим-1» в 1934 г. на высоту 22 км; полёты радиозондов конструкции проф. Молчанова на высоту $40 \div 42$ км с автоматически регистрирующей аппаратурой.

В последнее время сильно возрос интерес к ионосфере, куда начинают проникать современные ракеты дальнего действия и искусственные спутники Земли.

Для исследования высоких слоёв атмосферы прибегают к различным методам. К ним относятся полёты метеорологических ракет, наблюдения за «падающими звёздами»-метеорами ($130 \div 80$ км) и полярными сияниями, полыхающими иногда на высотах до $1000 \div 1200$ км и радиофизические методы.

2. Два уравнения аэродинамики

Течение газа или жидкости выражается двумя важными уравнениями: уравнением неразрывности течения и уравнением Бернулли.

Ознакомимся с ними на примерах.

Уравнение неразрывности течения, или, как его иногда называют, уравнение постоянства расхода или сплошности потока.

Посмотрим на реку, спокойно текущую по равнине. У реки в этом месте большая площадь поперечного сечения, или, как говорят, большое живое сечение. Но вот река входит в зажатое берегами русло, площадь её поперечного сечения уменьшается и бег ускоряется.

Зададим себе вопрос: почему в узком месте река стала течь быстрее? Для этого поинтересуемся расходом воды, помня, что под словом расход понимается количество воды, прошедшее через данное поперечное сечение за единицу времени. Если вода течёт неразрывно и нигде в сторону не уходит, то расход воды у большого и малого поперечных сечений реки одинаков. Поэтому, чтобы через малое поперечное сечение прошло столько же воды, сколько и через большое, воде приходится ускорять свой бег.

Так же, как вода в реке, ведёт себя поток жидкости или газа при движении по трубам или при обтекании различных тел. В узком месте движение ускоряется, в широком месте замедляется.

В основе уравнения неразрывности лежит закон Ломоносова о сохранении вещества. Например, сколько воздуха вошло в аэродинамическую трубу, столько же должно из неё и выйти.

Количество воздуха, вошедшее за 1 сек в канал трубы, подсчитать нетрудно. Для этого надо площадь попе-

речного сечения умножить на скорость и на массовую плотность воздуха (рис. 2).

Таким образом, получим:

$$G_1 = S_1 v_1 \rho,$$

где: G_1 — расход,

S_1 — площадь поперечного сечения,

v_1 — скорость,

ρ — массовая плотность.

За это же время из канала трубы выйдет такое же количество воздуха, равное:

$$G_2 = S_2 v_2 \rho.$$

Приравнивая правые части уравнений, получим уравнение неразрывности:

$$S_1 v_1 \rho = S_2 v_2 \rho.$$

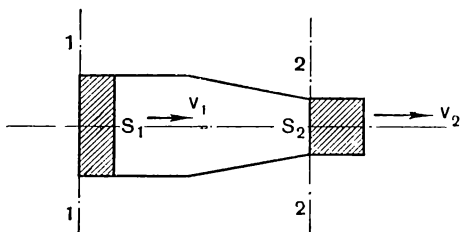


Рис. 2. К выводу уравнения неразрывности течения.

Сократив на ρ , будем иметь

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

или:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1},$$

т. е. скорость течения обратно пропорциональна площади поперечного сечения потока.

Уравнение Бернулли. Этим уравнением широко пользуются при аэродинамических расчётах. Оно получено выдающимся учёным физиком и математиком, членом Петербургской академии наук Даниилом Бернулли (1700—1782).

Уравнение Бернулли можно пояснить на примере сужающегося трубопровода, через который течёт газ (рис. 3).

В узком сечении трубы скорость больше, чем в широком, поэтому в сужающейся трубе газ движется ускоренно. Ускоренное движение возможно только под действием силы. Эта сила создаётся разностью давлений. Следовательно, давление в широкой части трубы должно быть больше, чем в узкой.

Объём входящего в сечение 1—1 газа за время t равен:

$$V_1 = S_1 x_1 = S_1 v_1 t.$$

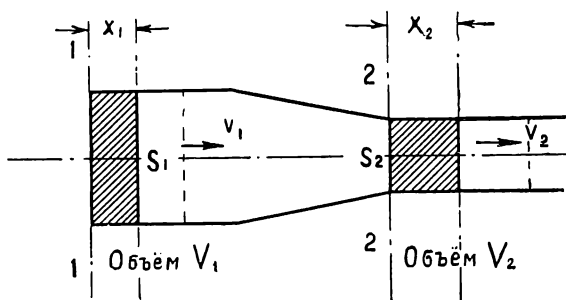


Рис. 3. К выводу уравнения Бернулли.

Объём выходящего газа через сечение 2—2 за то же время t равен:

$$V_2 = S_2 x_2 = S_2 v_2 t.$$

Работа втекающего газа, идущая на преодоление сил давления, равна:

$$A_1 = F_1 x_1 = P_1 S_1 v_1 t,$$

где сила $F_1 = P_1 S_1$; P_1 — статическое давление в сечении 1—1.

Работа вытекающего газа равна:

$$A_2 = F_2 x_2 = P_2 S_2 v_2 t,$$

где сила $F_2 = P_2 S_2$; P_2 — статическое давление в сечении 2—2.

Кинетическая энергия вытекающего газа равна:

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{S_1 v_1 \rho t v_1^2}{2},$$

где масса газа $m = S_1 v_1 \rho t$ и ρ — массовая плотность газа.

Кинетическая энергия вытекающего газа равна:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \frac{S_2 v_2 \rho t v_2^2}{2},$$

где масса газа $m = S_2 v_2 \rho t$.

На основании закона сохранения энергии, приравнявая полные энергии объёмов вытекающего и вытекающего газа, получим равенство:

$$P_1 S_1 v_1 t + \frac{S_1 v_1 \rho t v_1^2}{2} = P_2 S_2 v_2 t + \frac{S_2 v_2 \rho t v_2^2}{2},$$

и принимая во внимание, что объёмы вытекающего и вытекающего газа равны:

$$S_1 v_1 t = S_2 v_2 t,$$

получим после сокращения:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}.$$

Это и есть уравнение Бернулли (справедливое в таком виде для дозвукового течения).

P_1 и P_2 — статические давления в сечениях 1—1 и 2—2 (измеряются в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$).

$\frac{\rho v_1^2}{2}$ и $\frac{\rho v_2^2}{2}$ — скоростные напоры в сечениях 1—1 и 2—2 (измеряются в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$).

Статическое давление можно представить как давление на поверхность (стенку), вдоль которой движется газ. Его можно измерить мерной трубкой, плоскость отверстия которой параллельна течению (рис. 4).

Скоростной напор, или, как его ещё называют, динамическое или скоростное давление, можно представить себе как давление газа на ту поверхность тела, которая обращена к потоку.

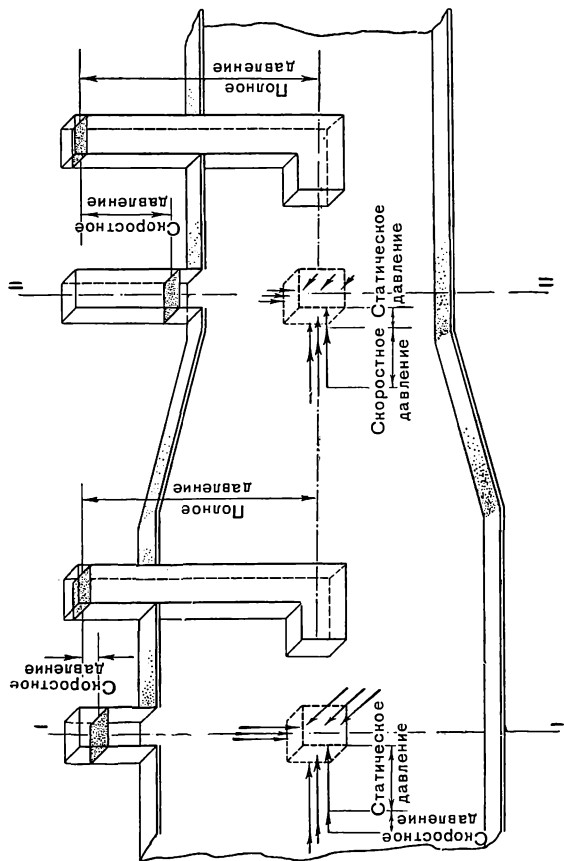


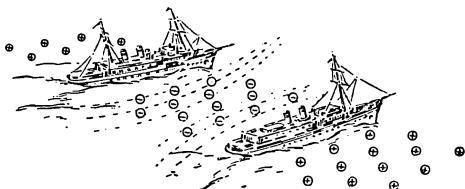
Рис. 4. Скорость потока в сечении I—I мала — статическое давление большое; в сечении II—II скорость увеличилась — статическое давление уменьшилось.

Сумма статического и динамического давления называется полным давлением. Полное давление можно измерить, если внутрь потока ввести мерную трубку, у которой конец загнут и обращён против набегающего потока.

Скоростной напор определяется по разности между давлением в трубке полного давления и статическим давлением.

Полное давление в любом сечении остаётся постоянным, когда силами трения можно пренебречь.

С увеличением скорости течения растёт скоростной напор. А что будет происходить со статическим давлением при увеличении скорости? Очевидно, оно должно уменьшиться, иначе полное давление не будет сохраняться постоянным. Зависимость между скоростью и статическим давлением можно проиллюстрировать на ряде примеров.



а

Рис. 5а. Скорость воды, обтекающей два близко идущих корабля, между кораблями больше, чем снаружи, следовательно, статическое давление воды между кораблями меньше, чем снаружи.

При встрече двух кораблей, идущих параллельным курсом (рис. 5а), в пространстве между кораблями относительная скорость движения воды больше, чем снаружи, а поэтому статическое давление между кораблями будет меньше наружного; под действием этой разности давлений корабли начнут сближаться друг с другом, и может произойти столкновение. При аналогичных условиях в 1912 г. погиб английский пароход «Олимп», когда он со слишком большой скоростью обгонял другой пароход.

То же самое вы можете проверить на доступном всем опыте. Возьмите два листка плотной бумаги, изо-

гните их полукругом и попробуйте дуть между ними. К своему удивлению вы заметите, что листки будут не расходиться друг от друга, а сходиться (рис. 5б).

Интересно проделать и другой опыт. Если взять свёрнутый лист бумаги (рис. 5в) и подуть поверх него, он выпрямляется.

В сильный ураган повышение скорости воздуха над коньком крыши дома приводит к тому, что над крышей создаётся разрежение и большая величина давления воздуха под крышей создаёт

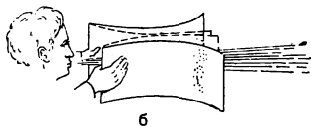


Рис. 5б. Между листочками давление меньше, чем снаружи, следовательно, листочки сближаются.

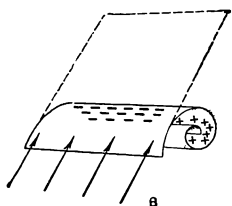


Рис. 5в. Если дуть поверх свёрнутого листка бумаги, то под влиянием разности давлений он выпрямится.

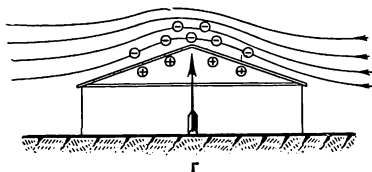


Рис. 5г. Ветер, вызывая разность статических давлений, приводит к образованию подъёмной силы у крыши.

подъёмную силу, которая может сорвать крышу (рис. 5г).

3. Движение тел в воздухе

После ознакомления со свойствами воздуха рассмотрим движение в нём какого-либо тела. Для этого обратимся к наиболее простому случаю — действию потока на прямоугольную пластинку, поставленную перпендикулярно к нему. Например, возьмём большой лист фанеры и будем двигаться с ним или, наоборот, будем стоять, подставляя его действию ветра. Воздух будет давить на лист, препятствуя движению. Это противодействие воздуха телу принято называть сопротивлением тела или силой лобового сопротивления и обозначать через Q . Название «лобовое сопротивление»

показывает, что эта сила действует навстречу телу и препятствует его движению, так как направлена прямо в «лоб». Возникновение лобового сопротивления в основном объясняется разностью давления перед телом и позади него и трением воздуха о поверхность тела, вызывающим вихреобразование за движущимся телом. При обтекании впереди тела стоит преграда в виде области воздуха с несколько повышенным давлением, которая заставляет набегающие струйки воздуха заранее расступаться перед телом (рис. 6).

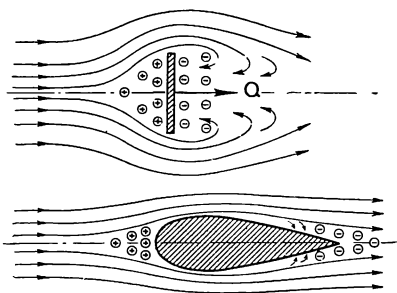


Рис. 6. Перед телом струйки воздуха расступаются, образуя поджатие воздуха; позади тела струйки смыкаются, образуя разрежение и вихри.

Позади тела струйки не успевают смыкаться и там образуется область с несколько пониженным давлением, заполненная вихрями.

Величина лобового сопротивления зависит от площади наибольшего поперечного сечения тела, перпендикулярного потоку, иначе — от площади миделя S (рис. 7, а). Чем больше у листа фанеры, самолёта, автомобиля, снаряда миделевое сечение, часто называемое лобовой площадью, тем обычно больше сопротивление тела, так как при возрастании этой площади соответственно увеличивается число частиц воздуха, встречаемых телом, и, кроме того, изменяется характер обтекания тела.

Лобовое сопротивление в значительной степени зависит от скорости движения тела: чем больше скорость, тем большую массу набегающих частичек воздуха будет встречать тело в каждый момент времени, следовательно, тем затруднительнее ему двигаться.

Сопротивление тела, или лобовое сопротивление, зависит от плотности воздуха ρ , так как чем плотнее воздух, тем больше частиц воздуха находится в единице объёма и тем труднее в нём двигаться.

Кроме перечисленных выше факторов S , v , ρ , на величину сопротивления оказывает большое влияние

форма тела. Например, если взять два тела с одинаковым миделем — веретенообразное тело и диск — и об-

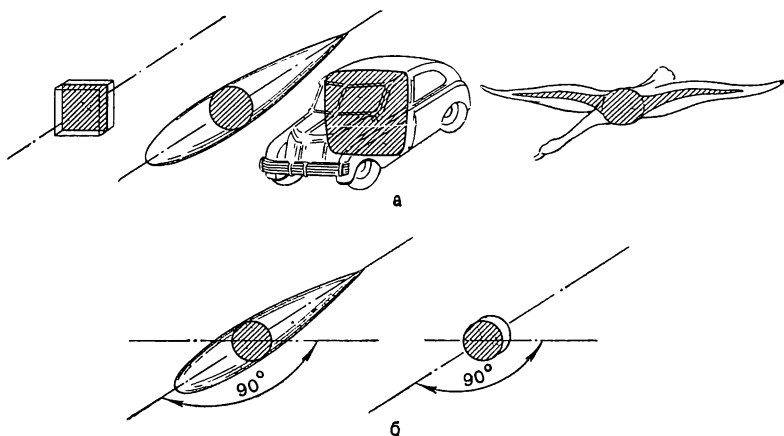


Рис. 7: *а* — площадь миделя различных тел; *б* — при одинаковых миделях сопротивление веретенообразного тела меньше, чем диска, в $50 \div 80$ раз.

дувать их, как показано на рис. 7, *б*, то можно убедиться, что веретенообразное тело обладает в $50 \div 80$ раз меньшим сопротивлением, чем диск.

Мы установили, от каких причин зависит сопротивление тела, но практиков всегда интересует, как его подсчитать.

Ньютон следующим образом подошёл к количественному определению силы сопротивления тела в воздухе.

Рассмотрим случай набегающего потока на плоскую прямоугольную пластину, поставленную перпендикулярно к потоку (рис. 8). Набегающий на пластину воздух ею тормозится. Ньютон исходил из того предположения, что частицы воздуха, ударяясь о пластину, полностью теряют свою скорость. Тогда пластина за 1 сек остановит объём воздуха, равный объёму

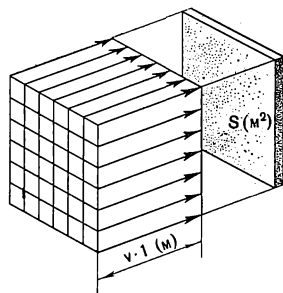


Рис. 8. Ньютон предположил, что весь объём набегающего воздуха останавливается пластиной.

за 1 сек остановит объём воздуха, равный объёму

прямоугольного параллелепипеда с основанием S m^2 и высотой v m , численно равной скорости. Этот объём воздуха будет равен:

$$V = Sv.$$

Следовательно, пластина за 1 сек остановит массу воздуха, равную:

$$m = \rho Sv.$$

Действующую на тело силу лобового сопротивления легко определить по второму закону Ньютона:

$$Q \Delta t = m \Delta v,$$

откуда:

$$Q = \frac{m \Delta v}{\Delta t},$$

но $\Delta t = 1$ сек, а $\Delta v = v$, так как по предположению, скорость набегающего потока при соударении с пластинкой изменяется от v до нуля.

Следовательно, сила лобового сопротивления будет численно равна изменению количества движения набегающего потока.

$$Q = m \Delta v = mv = \rho Sv v = \rho S v^2.$$

Однако вывод формулы лобового сопротивления не совсем соответствует действительности, так как на самом деле частички воздуха при встрече с пластиной теряют скорость не полностью. Они огибают пластину, или, как принято говорить, обтекают её. В связи с этим в формулу Ньютона должен быть внесён некоторый поправочный коэффициент, который характеризовал бы интенсивность торможения потока.

Но подсчитать торможение потока пластиной или другим телом крайне трудно. Поэтому оно определяется опытным путём. Изготовленную модель тела в аэродинамической трубе обдувают воздухом и при помощи весов измеряют силу лобового сопротивления тела Q . Зная силу Q , плотность воздуха ρ , мидель модели S , скорость потока v и только что выведенную зависимость между ними, определяют поправочный коэффициент, который обозначается через C_x .

$$C_x = \frac{Q}{\rho S v^2}.$$

Чем больше тормозится поток, тем больше коэффициент C_x . Коэффициент C_x получил название коэффициента лобового сопротивления тела. Он не постоянен и зависит от ряда причин. Для каждой модели тела, например для пластины, шара, веретенообразного тела, коэффициент C_x имеет свои значения. Изменением этого коэффициента особенно интересуются при исследовании обтекания тел в аэродинамических трубах.

Для удобства пользования формулой лобового сопротивления перед ней ставится постоянный коэффициент $1/2$, и тогда она окончательно запишется в таком виде:

$$Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2}.$$

В этой формуле уже знакомая нам величина $\frac{\rho v^2}{2}$ легко замеряется при опыте, имеет размерность $\text{кг}/\text{м}^2$ и называется скоростным напором.

Пользуясь формулой лобового сопротивления, можно решать многие задачи, например: определить, удержите ли вы против потока метровый лист фанеры, если будете с ним ехать на грузовом автомобиле со скоростью 40 км/час (или $11,1 \text{ м/сек}$), например, по Крестовому перевалу на Кавказе? Высота перевала 2382 м . В этой задаче площадь и скорость движения листа нам известны. Неизвестное — плотность на высоте 2382 м — возьмём из таблицы Международной стандартной атмосферы (ч. I, § 1), она будет $\rho = 0,097 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^4}$, неизвестный коэффициент лобового сопротивления возьмём из данных продувки пластин, $C_x = 1,28$. Подставляя эти значения в формулу лобового сопротивления, получим:

$$Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2} = 1,28 \cdot 1 \cdot 0,097 \cdot \frac{11,1^2}{2} \approx 7,6 \text{ кг}.$$

Можно самим определить, во сколько раз увеличится эта сила, если автомобиль будет ехать на той же скорости, но ниже — на высоте уровня моря.

Пользуясь той же формулой, интересно определить, при какой скорости вертикального потока воздуха парашютист, находящийся на высоте 1000 м , не сможет

спуститься на землю. Попробуем решить эту задачу, помня, что парашют имеет площадь купола, равную 60 м^2 . Коэффициент лобового сопротивления для такого купола $C_x = 0,7$, плотность воздуха на высоте 1000 м $\rho = 0,113 \frac{\text{кгсек}^2}{\text{м}^4}$. Вес парашютиста с парашютом прием равным 88 кг .

Подставляя эти величины в формулу лобового сопротивления, получим:

$$88 = 0,7 \cdot 60 \cdot 0,113 \frac{v^2}{2}.$$

Отсюда определится неизвестная вертикальная скорость восходящего потока:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 88}{0,113 \cdot 0,7 \cdot 60}} \approx 6,1 \text{ м/сек}.$$

Как видно, при скорости потока $6,1 \text{ м/сек}$ сопротивление купола парашюта уравнивает вес парашютиста и парашюта, и спуск прекратится. А что, если вертикальная скорость потока станет чуть больше? Тогда парашютист, вместо того чтобы спускаться, будет подниматься вверх.

Такой редкий случай произошёл лет 25 назад в районе г. Сочи, когда парашютист, выпрыгнув с самолёта, попал в зону «воздушной болтанки», насыщенной мощными вертикальными потоками воздуха. К своему удивлению он не стал спускаться и, проболтавшись в воздухе около двух часов, наконец, приземлился.

В формуле лобового сопротивления коэффициент C_x зависит от многих факторов: от формы тела, от ориентировки тела относительно потока, от состояния поверхности тела, от вязкости газа и других причин¹.

Силы трения, возникающие при обтекании шероховатых тел, значительно больше, чем при обтекании гладких поверхностей. Вот почему поверхности у современных самолётов отделывают весьма тщательно. При этом

¹ Когда скорость потока соизмерима со скоростью распространения звука, коэффициент C_x начинает зависеть от скорости потока (см. ч. I, § 5)

сила трения сильно зависит от степени завихрённости обтекаемого потока. Незавихрённый плавный поток называют ламинарным или слоистым потоком. В ламинарном потоке частицы воздуха текут плавно, не смешиваясь между собой, не переходя из слоя в слой. Завихрённый поток принято называть турбулентным, он состоит из бесчисленного множества мелких вихрей. В турбулентном потоке происходит перемешивание частиц в направлении, перпендикулярном к потоку. При турбулентном движении воздуха тела испытывают большее трение, чем при ламинарном. Изучению турбулентного движения посвятил много выдающихся работ советский академик А. Н. Колмогоров.

Раз возникнув, в газе или в жидкости, вихри долго сохраняются в потоке и, увлекаемые общим течением, вытягиваются за телом в виде вихревой дорожки. Так, например, за давно прошедшим по реке пароходом на внешне спокойной глади ещё долго остаётся расходящийся след. Цвет этой дорожки отличен от другой части воды и свидетельствует о наличии в ней множества ещё незатухших вихрей, вызванных работой гребного винта и плохой обтекаемостью корпуса.

За летящим самолётом тоже остаётся след мелких и крупных вихрей. Парашютисты, прыгающие с самолётов, свидетельствуют о том, что, ещё не раскрывая парашюта и находясь значительно позади удаляющегося самолёта, они испытывают сильные толчки и вращательное движение тела, так называемую «болтанку».

Крупные воздушные вихри, срывающиеся на некоторых режимах полёта с крыла самолёта, могут быть опасными для хвостового оперения, особенно на больших скоростях полёта, где их действие можно сравнить с ударами кирпичей, срывающихся с крыла и летящих на хвостовое оперение.

В практике самолётостроения, лет 25 назад, бывали случаи, когда казалось бы проверенные серийные самолёты на некоторых режимах полёта начинали разваливаться в воздухе. Это происходило, как потом было установлено, из-за вибрации, вызванной срывом вихрей с крыла и попаданием их на неудачно расположенное хвостовое оперение. Это явление получило название бафтинга.

Лётчики-испытатели опытных самолётов хорошо знают «бафтинг» по тем характерным стукам и толчкам, которые к ним доходят в кабину через фюзеляж со стороны хвоста самолёта. Во избежание катастрофических последствий они должны немедленно перейти на другой режим полёта, снизив скорость самолёта.

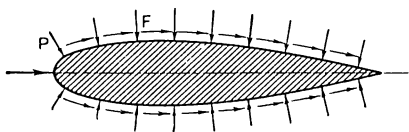


Рис. 9. Воздух воздействует на тело в виде сил давления и сил трения.

что при обтекании воздух воздействует на тело, в конечном счёте, в виде сил давления и сил трения (рис. 9). Других сил быть не может.

Из знакомства с природой возникновения лобового сопротивления надо помнить,

4. Возникновение подъёмной силы

При рассмотрении действия воздуха на пластину, поставленную перпендикулярно к потоку, обтекание было симметричным и скорости потока сверху и снизу имели одинаковые значения.

При таком обтекании на тело действует сила лобового сопротивления, направленная против движения.

Теперь возьмём ту же пластину, но несколько наклоним её к направлению потока (рис. 10). Картина обтекания изменится. Начало разделения струек воздушного потока перед пластиной переместится ближе к передней кромке. Обтекание станет несимметричным, и скорости струек воздуха сверху и снизу пластины не будут одинаковыми. С помощью дымовых струек можно видеть их сужение сверху пластины и расширение снизу, свидетельствующее об увеличении скорости воздуха над пластиной и уменьшении скорости — под пластиной. А из уравнения Бернулли — уравнения связи между скоростью и давлением — мы знаем: где скорость больше — давление меньше, и наоборот. Следовательно, давление сверху пластины — меньше, чем давление снизу. В результате разности давлений возникнет полная аэродинамическая сила, действующая под некоторым углом к направлению потока. Вспомним, что в случае

симметричного обтекания сила аэродинамического сопротивления (лобовое сопротивление) была параллельна потоку и направлена против движения тела.

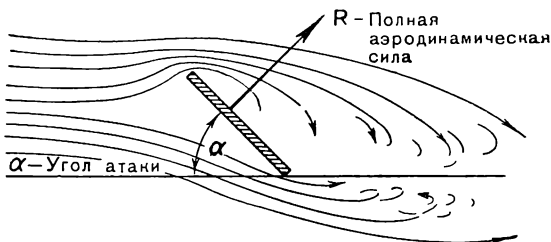


Рис. 10. При наклоне пластинки обтекание становится несимметричным и бег верхних струек ускоряется, а нижних замедляется.

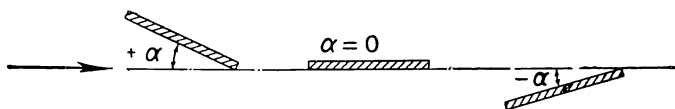


Рис. 11. Различные углы атаки пластинки.

Величина полной аэродинамической силы зависит от расположения пластины по отношению к направлению потока, т. е. от величины угла между направлением потока и плоскостью пластины.

Указанный угол означает, под каким углом пластина атакует воздух или, что всё равно, под каким углом поток воздуха атакует пластину (рис. 11). Этот угол в аэродинамике получил название угла атаки.

Полная аэродинамическая сила R , как всякая сила, характеризуется не только величиной, но и направлением, её можно представить в виде вектора. Величина силы указывается длиной отрезка вектора, напра-

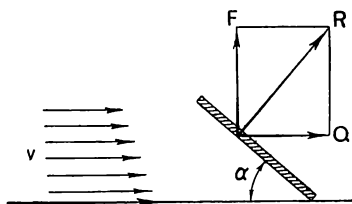


Рис. 12. Разложение полной аэродинамической силы пластины на составляющие.

вление действия силы — стрелкой на конце вектора (рис. 12). Воспользуемся сведениями из механики о том, что одну силу можно заменить двумя, действие которых равноценно действию одной силы. Для этого разложим полную аэродинамическую силу по правилу параллелограмма на две силы: одну, направленную параллельно движению основного воздушного потока, а другую — перпендикулярно к нему. С этой целью из конца вектора полной аэродинамической силы проведём параллельно выбранным направлениям прямые линии, которые отсекут на этих направлениях два искомых вектора, т. е. две силы. Сила, действующая перпендикулярно к направлению потока, называется нормальным давлением, а сила, направленная параллельно потоку, называется силой лобового сопротивления или просто силой сопротивления.

Нормальное давление, если оно направлено вертикально вверх, называют подъёмной силой (рис. 13).

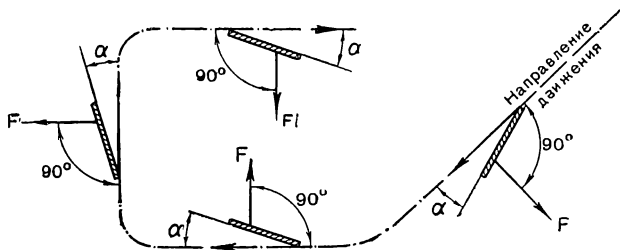


Рис. 13. Подъёмная сила перпендикулярна к направлению потока (направлению движения).

Подъёмная сила действительно может поднимать тело, но не всегда; можно так ориентировать тело относительно потока, что она будет действовать в ином направлении и даже опускать тело. В этом легко убедиться на опыте. Если руку выставить из окна мчащегося поезда и давать ладони различные к потоку наклоны, различные углы атаки, то ладонь будет стремиться как подниматься вверх, так и опускаться вниз.

Необходимо заметить, что разложение полной аэродинамической силы на два направления является услов-

ным, оно производится только для удобства аэродинамических расчётов. В действительности же имеется только одна сила — полная аэродинамическая сила, в общем случае направленная наклонно к потоку, действие которой на тело равноценно действию двух выше рассмотренных сил.

Рассмотрим образование подъёмной силы и силы лобового сопротивления на примере самолётного крыла.

Если рассечь крыло параллельно оси самолёта, то мы увидим, что крыло выполнено не в виде плоской пластины, а в виде несимметричного профиля.

Крыло с таким профилем и плоская пластина принципиально ничем не отличаются. Однако качественно между ними есть большая разница.

Наличие плавной выпуклости с верхней стороны профиля и чуть заметной выпуклости или вогнутости с нижней стороны вместе с плавным закруглением носика профиля наилучшим образом способствует увеличению скорости воздушных струй сверху крыла и образованию там разрежения. При этом очень важно, чтобы воздушные струйки обтекали профиль плавно, не отрываясь от его поверхности, и не превращались в воздушные вихри, что наблюдается при обтекании плоской пластины.

Отметим ещё другую разницу: пластина создаёт подъёмную силу лишь при положительном угле атаки; крыло же с несимметричным профилем может создать подъёмную силу при нулевом и даже отрицательном угле атаки.

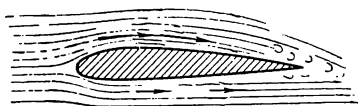
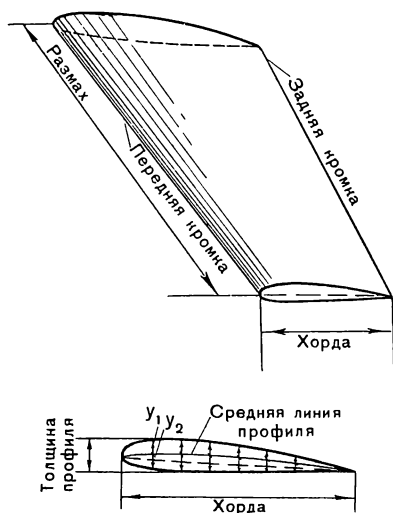


Рис. 14. Скорость воздушных струек над крылом возрастает, под крылом уменьшается.

Распределение воздушных струй под крылом и над крылом показано на рисунке 14.

В крыле самолёта различают: хорду крыла, среднюю линию профиля, переднюю кромку, или ребро атаки, заднюю кромку, или ребро обтекания (рис. 15).

Хордой крыла называют отрезок прямой, соединяющей наиболее удалённые точки профиля крыла, т. е. начало профиля и конец профиля.



Понятие — толстый профиль крыла или тонкий, связано с отношением максимальной толщины профиля к его хорде и называется относительной толщиной, обычно выражаемой в процентах.

Употребляемые в самолётостроении профили с относительной толщиной $3 \div 5\%$ принято называть тонкими, а профили с толщиной $12 \div 18\%$ — толстыми. Тонкие крылья применяются в скоростной авиации, а толстые — в тихоходной авиации.

Хорда крыла относительно потока воздуха на-

клонена под некоторым углом. Этот угол показывает, в каком положении крыло встречает или атакует поток, а потому так же, как и в случае обтекания плоской пластины, он называется углом атаки α .

Угол атаки считается положительным, если хорда крыла относительно направления потока отклонена в сторону верхней поверхности крыла, и отрицательным, если хорда отклонена в сторону нижней поверхности крыла.

На летящем под некоторым углом атаки крыле самолёта, так же как на плоской пластине, поставленной под углом α , возникает полная аэродинамическая сила R . Раскладывая эту силу нормально к потоку и по потоку, получим две силы: подъёмную силу F и силу лобового сопротивления Q (рис. 16).

Из-за наличия у крыла самолёта плавного двояковыпуклого профиля подъёмная сила его будет больше, чем у плоской пластины, а сила лобового сопротивления станет меньше.

Аэродинамики и конструкторы самолётов стремятся, чтобы крыло самолёта при малом лобовом сопротивлении имело большую подъёмную силу. В этом случае для продвижения самолёта требовалась бы меньшая мощность двигателя. В идеале хотелось бы иметь только подъёмную силу и никакого лобового сопротивления. Но это невозможно. Поэтому всеми средствами стараются уменьшить лобовое сопротивление. Характеристикой качества профиля служит величина отношения подъёмной силы F к силе лобового сопротивления Q . Данное отношение получило название аэродинамического качества, или просто качества.

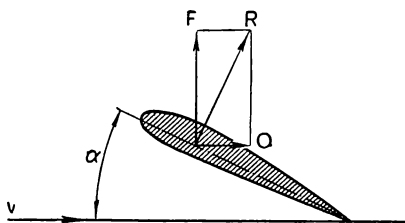


Рис. 16. На крыле самолёта, также как и на плоской пластине, возникает полная аэродинамическая сила.

$$K = \frac{F}{Q}.$$

Максимальное качество двояковыпуклого профиля во много раз больше максимального качества плоской пластины. У лучших профилей оно более $20 \div 25$, в то время как у плоской пластины $K = 6$.

Качество плоской пластины можно несколько улучшить, если ей придать изогнутость, как это делается у крыльев обычных вентиляторов.

Формула величины подъёмной силы имеет много общего с формулой силы лобового сопротивления.

Подъёмная сила F равна:

$$F = C_y S \frac{\rho v^2}{2},$$

где: ρ — плотность воздуха,
 S — площадь крыла,
 v — скорость полёта,
 C_y — коэффициент подъёмной силы.

Эта формула получена экспериментальным путём.

Величина подъёмной силы зависит от формы профиля. Например, у плоской пластины подъёмная сила меньше, чем у двояковыпуклого профиля. Эта особенность формы учитывается некоторым безразмерным коэффициентом, который называют коэффициентом подъёмной силы и обозначают через C_y .

Подсчитать теоретически коэффициент C_y так же трудно, как и коэффициент C_x . Поэтому его находят опытным путём, продувая модели крыльев в аэродинамической трубе. В трубе, пользуясь аэродинамическими весами, измеряют величину подъёмной силы. Зная эту силу, плотность воздуха, площадь крыла и скорость потока, подставляют их значения в формулу подъёмной силы и из неё определяют неизвестное — коэффициент подъёмной силы C_y :

$$C_y = \frac{2F}{\rho S v^2}.$$

Помимо формы профиля, коэффициент подъёмной силы C_y во многом зависит от величины угла атаки и многих других факторов.

Теоретическая формула величины подъёмной силы впервые дана великим учёным, отцом русской авиации, проф. Н. Е. Жуковским в 1906 г. Он доказал, что притормаживание потока снизу крыла и разгон его сверху крыла как бы создаёт вокруг крыла закручивание набегающего на него потока. С помощью введения понятия закручивания, или, как говорят, *циркуляции*, вокруг крыла, Н. Е. Жуковский теоретически определил величину подъёмной силы:

$$F = \rho v \Gamma b,$$

где ρ — плотность воздуха,
 v — скорость потока,
 b — длина хорды крыла,
 Γ — циркуляция скорости.

В аэродинамических расчётах удобнее пользоваться не величинами подъёмной силы и силы лобового сопротивления, а их коэффициентами C_y и C_x .

Поэтому при исследованиях в аэродинамических трубах конструкторам, проектирующим самолёты, вертолёты, планёры, выдаются данные продувки их моделей в виде графиков с коэффициентами C_x , C_y и др.

Распространёнными графиками аэродинамических данных являются:

а) график зависимости изменений коэффициента лобового сопротивления C_x от изменения угла атаки α (рис. 17, а);

б) график зависимости изменения коэффициента подъёмной силы C_y от изменения угла атаки α (рис. 17, б).

Удобно эти два графика свести в один, показывающий, как изменяется коэффициент C_y от изменения коэффициента C_x . На кривой этого графика наносятся величины углов атаки, которые соответствуют данным коэффициента C_x и C_y . Такая кривая с разметкой углов атаки носит название поляры Лилиентала, или просто поляры (рис. 17, в).

Из графика изменений C_y с изменением угла α видно, что коэффициент подъёмной силы увеличивается до определённых углов атаки, обычно $18 \div 20^\circ$, далее он резко падает. Эти углы называются критическими, потому что на таких углах атаки плавное обтекание

профиля крыла нарушается, появляется так называемый срыв плавного обтекания, подъёмная сила крыла резко уменьшается (рис. 18), рули перестают слушаться, и самолёт может, проваливаясь в воздухе, свалиться на крыло

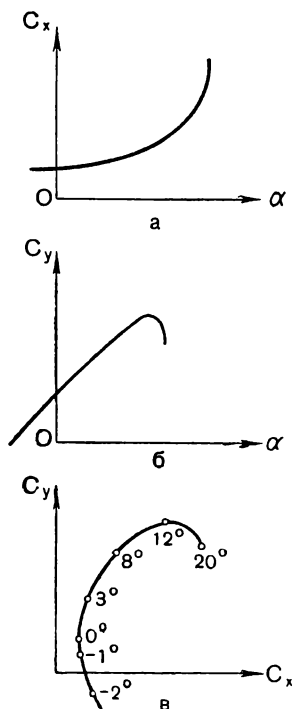


Рис. 17: а — график, показывающий рост коэффициента лобового сопротивления при увеличении угла атаки крыла; б — график, показывающий рост и падение коэффициента подъёмной силы при увеличении угла атаки крыла; в — поляра Лилиентала.

и войти в штопор. Если это произойдёт с самолётом на большой высоте, то это поправимо, его можно успеть выравнять, если же у земли при посадке, то печальные последствия неизбежны.

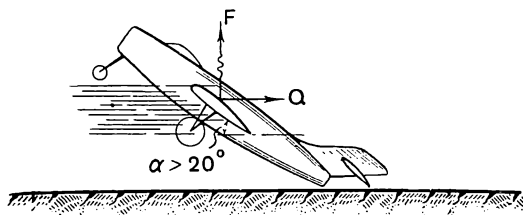


Рис. 18. Срыв-плавного обтекания крыла при полёте на больших углах атаки.

5. Аэродинамические силы на больших скоростях

Всё, что было рассказано про лобовое сопротивление и подъёмную силу, справедливо для обтекания тел с малыми дозвуковыми скоростями, примерно до 100 м/сек. При больших скоростях движения, близких к скорости

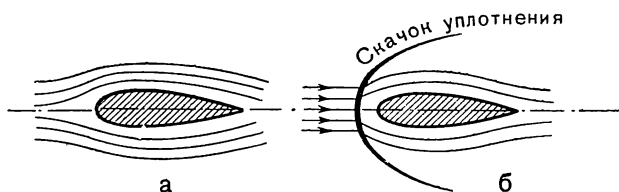


Рис. 19. Схема обтекания тела потоком:

а — Дозвуковое обтекание; б — Сверхзвуковое обтекание.

звука и выше, обтекание тел имеет свои особенности. Эти особенности состоят в том, что на больших скоростях аэродинамические силы начинают зависеть от свойства воздуха, изменять свою плотность под действием давления, т. е. от сжимаемости воздуха.

Рассмотрим, чем отличается обтекание тел в дозвуковом и сверхзвуковом потоках (рис. 19). Предварительно вспомним, что звуковые волны представляют собой малые возмущения плотности и давления, распространяющиеся

в достаточно плотной среде, и что скорость звука есть скорость распространения этих возмущений. Эти возмущения могут быть слышимы человеческим ухом. Заметим ещё, что возмущения давления воздуха, производимые, например, ударом хлыста, голосовыми связками человека, крылом самолёта, распространяются во все стороны от тела со скоростью звука.

При движении с дозвуковой скоростью передняя часть тела давит на находящиеся впереди него частицы воздуха. Появляются возмущения воздуха, распространяющиеся вперёд от одних частиц к другим со скоростью звука. Эти возмущения опережают двигающееся тело. При этом тело не встречает большого сопротивления. Это — дозвуковое обтекание. А что произойдёт, если тело будет двигаться со сверхзвуковой скоростью?

И в этом случае передняя часть тела будет возмущать частицы воздуха, порождая колебания окружающего воздуха. Но скорость распространения этих колебаний будет по-прежнему равна скорости звука. При этих условиях колебания воздушной среды, возникающие при движении тела, не успевают распространиться впереди тела. Перед телом, движущимся со сверхзвуковой скоростью, образуется слой уплотнённого воздуха.

Летающее со сверхзвуковой скоростью тело оставляет позади себя всё новые и новые звуковые волны (рис. 20).

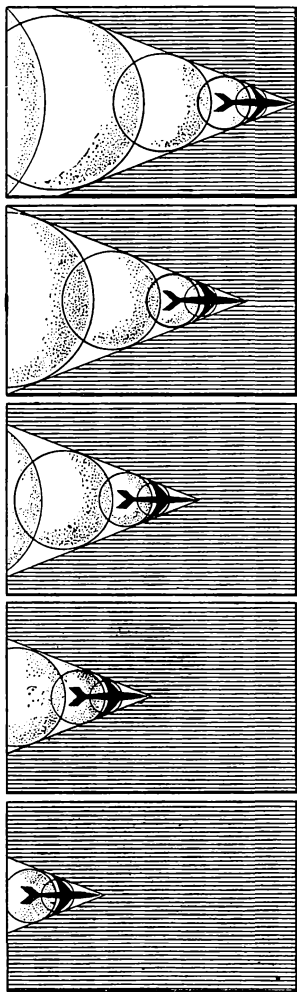


Рис. 20. Полёт со сверхзвуковой скоростью.

Ранее возникшие волны успевают расшириться, и радиус их возрастает. Эти бесчисленные сферические волны звука, слагаясь, образуют за телом конус возмущений, в вершине которого находится остриё самого тела. Чем скорость движения больше скорости звука, тем острее этот конус.

Воздушные волны возмущают окружающую среду. Эти возмущения, слагаясь, образуют перед телом одну общую волну уплотнённого воздуха. Такой слой сжатого воздуха в несколько раз увеличивает сопротивление движению тела.

В головной части конуса, на его поверхности, всё время будет происходить удар набегающих частиц воздуха. В месте удара возникает скачок уплотнения — область сжатия воздуха. Скачок уплотнения является причиной добавочного сопротивления. Так как причиной возникновения этого сопротивления являются волны, то добавочное сопротивление называют волновым сопротивлением.

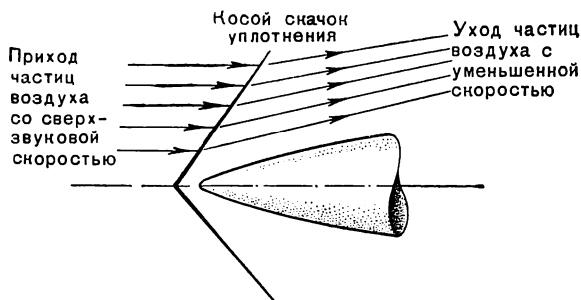


Рис. 21. Обтекание заострённого тела сверхзвуковым потоком.

В скачке уплотнения давление и температура воздуха скачкообразно возрастают. В этой зоне уплотнённого воздуха энергия движения тела переходит в повышение давления и в теплоту. Таким образом, аэродинамика больших скоростей учитывает и тепловые явления, происходящие в потоке газа. За скачком уплотнения давление хотя и понижается, но всё же остаётся повышенным (рис. 21). Это давление действует на лобовую поверхность тела, вызывая увеличение лобового сопротивления.

Интересно заметить, что скачки уплотнения возникают и в природе. Например, известно, что у метеоритных камней, врезающихся со скоростью нескольких десятков километров в секунду в земную атмосферу, образуется мощнейший скачок уплотнения воздуха, в котором сжатие столь велико, что газы в нём раскаляются, раскаляется и сам метеорит, и испускается тот яркий свет, который мы видим, наблюдая «падающие звёзды».

Появление на больших скоростях волнового сопротивления воздуха зависит не от абсолютного значения скорости, а от отношения скорости полёта к скорости звука.

На эту связь, между увеличением сопротивления воздуха и скоростью звука, впервые в мире указал учёный артиллерист профессор Артиллерийской академии Н. В. Маиевский. Отношение скорости полёта к скорости звука названо числом M .

$$M = \frac{\text{скорость полёта}}{\text{скорость звука}} = \frac{v}{v_{\text{зв}}}.$$

Для скорости полёта, равной скорости звука, число $M = 1$.

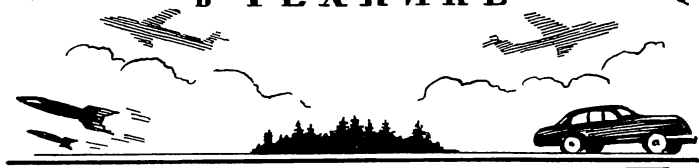
Из-за возникновения только что описанного волнового сопротивления формулы, по которым подсчитываются лобовое сопротивление и подъёмная сила, уточняются соответствующими изменениями коэффициента лобового сопротивления C_x и коэффициента подъёмной силы C_y .

Эти коэффициенты, как мы видели раньше (§ 3 и 4), на малых дозвуковых скоростях порядка 100 м/сек, не зависели от скорости полёта, на скоростях же полёта, больших 100 м/сек, вернее на скоростях полёта, для которых число $M = 0,3 \div 0,5$, они сильно зависят от числа M . Величины этих коэффициентов определяются опытным путём при продувке в скоростных аэродинамических трубах.

Наши учёные-аэродинамики неустанно изыскивают новые лучшие формы частей сверхзвуковых летательных аппаратов.

Внешние формы сверхзвукового самолёта необычны и значительно отличаются от форм тихоходного дозвукового самолёта. С ними мы ознакомимся в разделе «Самолёты».

АЭРОДИНАМИКА В ТЕХНИКЕ



Работа летательных аппаратов, ветродвигателей, вентиляторов и других устройств, находящихся в потоке воздуха, теснейшим образом связана с аэродинамическими закономерностями. Эти закономерности позволяют объяснить работу, определить действующие силы и найти наиболее выгоднейшие формы самолётов, вертолётов и ракет с тем, чтобы при наименьшей затрате мощности двигателя они могли поднять в воздух наибольший груз и совершить полёт быстрее, выше и дальше.

1. Аэродинамические трубы

Часть аэродинамики, изучающая движение тел в воздухе непосредственно опытным путём, называется экспериментальной (опытной) аэродинамикой. В экспериментальной аэродинамике изучение законов обтекания производится с помощью особой установки, называемой аэродинамической трубой, или с помощью летающих моделей.

Впервые аэродинамическая труба была построена в России в 1897 г. знаменитым учёным К. Э. Циолковским и названа им «воздухоудувкой». Позднее проф. Н. Е. Жуковским были созданы аэродинамические трубы (лаборатории) при МВТУ, сыгравшие большую роль в развитии русской авиации. В 1918 г., по инициативе В. И. Ленина, Н. Е. Жуковский с группой своих учеников создаёт ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт), являющийся мировым центром аэродинамических исследований. В настоящее время наша страна располагает

большой сетью аэродинамических лабораторий, как для практических, так и для учебных целей. Современное развитие самолётной и ракетной техники во многом обязано исследованиям, проводимым в аэродинамических трубах. Все вновь проектируемые самолёты, ракеты, вертолёт перед тем, как быть построенными, обязательно проходят стадию тщательного исследования в аэродинамических трубах. Из этого ясно, с какими трудностями приходилось сталкиваться первым конструкторам самолётов до постройки аэродинамических труб. Аэродинамические трубы стали верными помощниками учёных и конструкторов.

Для аэродинамических исследований изготавливают из дерева или из металла в уменьшённом масштабе модель (маленькую копию) будущего самолёта или другого аппарата и продувают её в аэродинамической трубе. В аэродинамических трубах используется принцип обратимости движения. В них движущийся поток воздуха набегает на неподвижно закреплённое тело.

Производить практические исследования обтекания на движущемся теле, например на крыле летящего самолёта, в большинстве случаев затруднительно. Проще крыло закрепить неподвижно и на него направить поток воздуха. При этом картина обтекания не меняется и величины действующих аэродинамических сил как в том, так и в другом случае остаются одинаковыми. Для убедительности этого положения уместно провести аналогию с воздушным змеем. Чтобы змей держался в воздухе при отсутствии ветра, необходимо бежать с ним. При наличии же ветра можно спокойно стоять на месте, и змей будет также держаться в воздухе. Принцип, по которому всё равно движется ли тело в неподвижной среде, или, наоборот, среда движется относительно неподвижного тела, называется принципом обратимости движения (принцип относительности Галилея).

Ознакомимся с устройством простейшей аэродинамической трубы (рис. 22, а). Она состоит из открытой с двух сторон трубы переменного сечения. Её передняя часть называется всасывающим коллектором, средняя, самая узкая часть, — рабочей частью, задняя — диффузором (постепенно расширяющийся раструб). В конце диффузора размещается электромотор, приводящий в действие вентилятор. Вентилятор, засасывая воздух, создаёт в трубе искусственный воздушный поток. В этом потоке,

в рабочей части трубы, помещается испытываемое тело, например модель самолёта в уменьшённом масштабе. Мо-

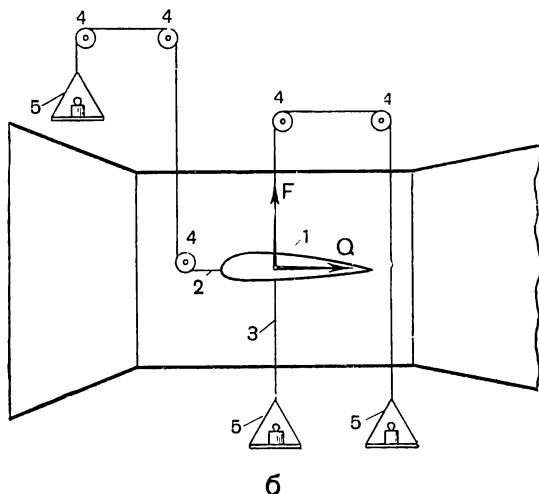
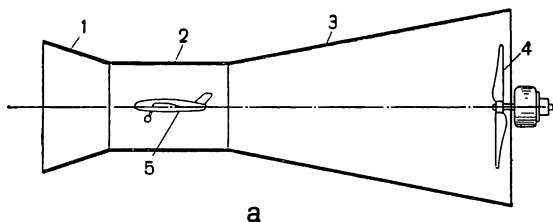


Рис. 22. а) Схема простейшей аэродинамической трубы:

1 — всасывающий коллектор; 2 — рабочая часть трубы; 3 — диффузорная часть; 4 — вентилятор с электромотором; 5 — испытываемая модель.

б) Схема простейших аэродинамических весов:

1 — испытываемая модель; 2 — трос для удерживания модели от действия силы лобового сопротивления; 3 — трос для удерживания модели от действия подъёмной силы; 4 — ролик; 5 — чашка весов.

дель крепится к специальным весам (рис. 22, б). При наличии в трубе воздушного потока возникающие на модели аэродинамические силы будут передаваться весам. Весы покажут величины действующих сил. Эти весы называются

аэродинамическими весами. Они измеряют силу лобового сопротивления, подъёмную силу и поворотное действие потока на модель, т. е. моменты сил. Все эти величины можно получить при различном положении модели по отношению к потоку, т. е. под различными углами атаки.

Помимо замера аэродинамических сил и моментов, действующих на модель, в аэродинамических трубах можно заметить распределение давления воздуха на отдельных участках поверхности модели, например крыла (рис. 23). Для этого в теле испытываемой модели крыла прокладываются тоненькие резиновые или металлические трубочки, которые с одной стороны подво-



Рис. 23. Схема замера распределения давления по поверхности крыла.

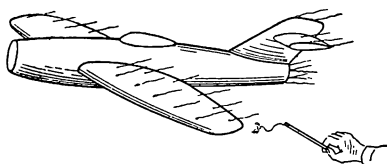
дятся к отверстиям, просверленным на поверхности крыла, где желательно замерить воздушное давление, с другой стороны присоединяются к обычным манометрам воздушного давления.

Кроме того, если стенка рабочей части трубы выполнена из прозрачного материала, то через неё можно видеть и фотографировать картину обтекания, называемую аэродинамическим спектром. На картине обтека-

Рис. 24. По поведению наклеенных шелковинок и переносного шарика ваты можно судить о плавности обтекания.

ния видно, в каком месте модели нарушается плавное течение струек воздуха и как оторвавшиеся от тела струйки образуют вихри.

Для получения наглядности обтекания к воздушному потоку аэродинамической трубы подмешивают цветной дым или на испытываемую модель наклеивают длинные цветные шелковинки (рис. 24). По поведению дыма или



шелковинок судят о характере обтекания. Для тех же целей можно сделать аэродинамический щуп — переносную палочку с ниткой, на конце которой укреплен маленький шарик ваты. По положению и поведению шарика можно судить о характере потока в данной точке.

Размеры современных аэродинамических труб позволяют продуть в них не только маленькие модели, но и уже построенные самолёты, вертолёты и автомобили

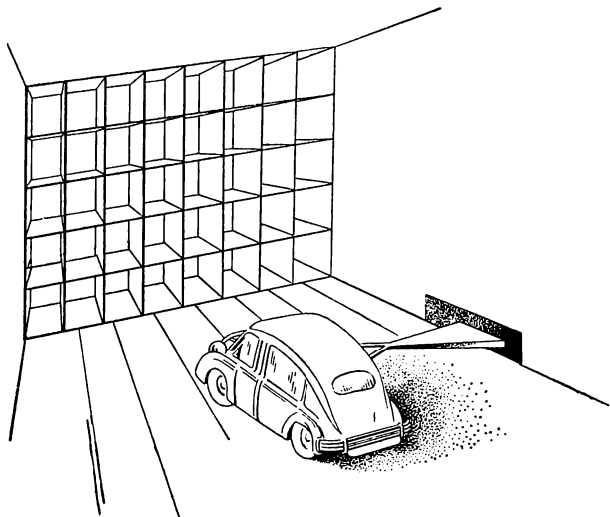


Рис. 25. Продувка автомобилей в больших аэродинамических трубах.

(рис. 25). В этом случае аэродинамические трубы называются натурными и достигают в своей рабочей части диаметра более 20 м. Скорость воздушного потока в таких трубах может достигать $200 \div 300$ км в час.

В лабораториях с помощью аэродинамических труб производятся большие исследовательские работы по отысканию наиболее совершенных форм будущих самолётов, ракет, вертолётов, парашютов и автомобилей. С каждым годом всё больше растёт круг разнообразных опытов в аэродинамических трубах и к их услугам прибегают не только авиастроители. Строители метро хотят знать сопротивление, оказываемое воздухом при движении в тоннеле поезда, а также степень вентиляции ваго-

нов; спортсмены-горнолыжники хотят с помощью моделей подробнее знать о воздушных силах, действующих на лыжника при спуске с трамплина со скоростью 100 км/час; изучающих полёт птиц интересуют результаты продувок чучел птиц в аэродинамической трубе; строители высотных зданий хотят знать силы давления урагана (скорость 120 км/час) на их здания; проектировщики ветряных двигателей продувают модели ветряков; специалистов вентиляционной техники интересует совершенство их вентиляторов (рис. 26).

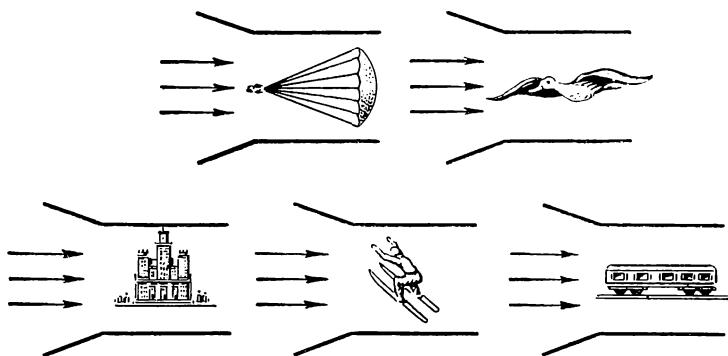


Рис. 26. Аэродинамические трубы позволяют продувать различные модели.

Экспериментальная аэродинамика, наряду с изучением обтекания неподвижно закреплённой модели в аэродинамической трубе, изучает обтекание воздуха на летающих аппаратах. Это достигается с помощью специальных летающих моделей или самолётов, носящих название «летающие лаборатории».

Вначале мы сказали, что этот способ сложнее, тем не менее к нему прибегают, особенно при изучении обтекания тела околозвуковым и сверхзвуковым потоком. Этот способ позволяет сверять правильность данных, полученных в аэродинамической трубе и в полёте летающей модели.

Способ исследования обтекания с помощью летающей модели заключается в следующем. Изготавливается модель, деревянная или металлическая, какого-нибудь будущего самолёта, причём масштаб берётся значительно больший,

чем для продувки в аэродинамической трубе. Модель оборудуется комплектом саморегистрирующей аппаратуры, записывающей по времени возникающие в полёте ускорения, скорость, высоту, угол атаки, давления в отдельных точках модели и т. д. Летающая модель, подвешенная под самолёт, поднимается им на высоту $10 \div 12$ км. С этой

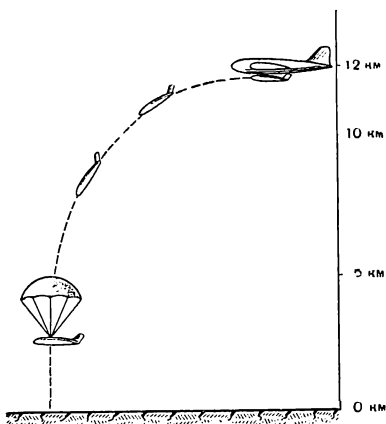


Рис. 27. Исследование обтекания с помощью летающих моделей.

высоты лётчик сбрасывает модель в свободный полёт (рис. 27). Под действием собственного веса она планирует с очень большой скоростью, близкой к скорости звука. Если модель оснащена сравнительно маленьким ракетным двигателем, то она может разгоняться, достигая сверхзвуковых скоростей. Во время полёта модели приборы всё время записывают свои показания. В конце полёта движение модели замедляется, и она может спуститься на землю на парашюте.

Иногда записи приборов передаются по радио на наблюдательные пункты. По записям приборов определяют силы и моменты сил, возникающие в полёте на летающей модели.

Опыты, проводимые с продувками моделей высокоскоростных летательных аппаратов, будут тем точнее, чем ближе скорость воздушного потока в аэродинамической трубе к скорости летательного аппарата в действительных условиях. Поэтому в настоящее время, когда скорость самолётов, оснащённых реактивными двигателями, достигла звуковой и сверхзвуковой, а скорости ракет и снарядов стали в несколько раз превышать скорость звука, получили большое применение трубы больших скоростей.

Для того чтобы создать в таких трубах воздушный поток со сверхзвуковой скоростью, необходимо затрачивать на вентиляторную установку громадную мощность, в несколько раз большую, чем в трубах обычного типа. Поэтому такие трубы делаются меньшего поперечного сече-

ния и, следовательно, в них могут помещаться модели незначительных размеров.

Сложность эксперимента в скоростных трубах объясняется особенностями течения воздуха при приближении к скорости звука. Эти особенности заключаются в сжимаемости воздуха на таких скоростях и в появлении различного вида скачков уплотнения воздуха. Такие трубы надо тщательно изготавливать, ибо малейшая неровность на стенках трубы может быть источником преждевременного возникновения уплотнения воздуха.

2. Самолёты

Самолёт изобретён в 1882 г. выдающимся русским учёным и конструктором, контр-адмиралом русского морского флота Александром Фёдоровичем Можайским.

Перед постройкой самолёта Можайский проводил опыты с летающими моделями. Модели приводились в движение пружинным двигателем и успешно летали.

Можайский не ограничился исследованием аэродинамических сил на летающих моделях. В 1876 г. он построил большой воздушный змей и сам поднялся на нём в воздух. Змей запускался в воздух с помощью быстро мчавшейся тройки лошадей.

Самолёт Можайского имел все основные части современного самолёта и самостоятельно отделился от земли, чего нельзя сказать о самолёте американцев братьев Райт, построенном на 20 лет позднее и имевшем громоздкое дополнительное катапультирующее устройство, помогающее взлёту.

Интересно отметить, что основные части современного самолёта — лодка-фюзеляж, колёсное шасси, элероны и др. — впервые были предложены А. Ф. Можайским. С тех пор они являются необходимой принадлежностью каждого самолёта.

Современный самолёт состоит из следующих частей (рис. 28): крыльев, поддерживающих самолёт в воздухе; двигательной установки, винтомоторной или реактивной, тянущей самолёт вперёд; фюзеляжа, т. е. корпуса, в котором размещаются: экипаж, грузы, командные рычаги управления и различное оборудование. К фюзеляжу крепятся все основные части самолёта: крылья, хвостовое оперение и часто двигательная

установка и шасси. У гидросамолётов фюзеляж выполняется в виде закрытой лодки.

Хвостовое оперение состоит из горизонтального и вертикального оперения. Горизонтальное оперение состоит из неподвижного стабилизатора и отклоняющихся рулей высоты. Рули высоты крепятся к стабилизатору на шарнирных опорах. Вертикальное оперение состоит из неподвижного киля и отклоняющегося руля направления. Руль направления крепится к килю на шарнирных

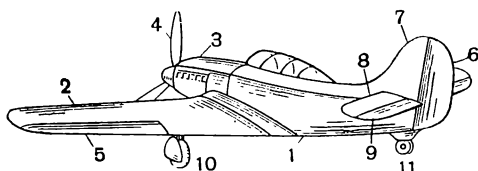


Рис. 28. Основные части самолёта:

1 — фюзеляж; 2 — крыло; 3 — мотор; 4 — винт; 5 — элерон; 6 — руль поворотов; 7 — киль; 8 — стабилизатор; 9 — руль высоты; 10 — шасси; 11 — хвостовое колесо.

опорах. Горизонтальное и вертикальное оперение обеспечивает самолёту устойчивое движение в воздухе.

Элероны служат органом поперечного управления самолётом.

Шасси состоит из двух главных колёс и одного небольшого колеса, размещающегося в носу или в хвосте самолёта. Шасси служит для поддержания самолёта на стоянке, для пробежки самолёта при посадке и для разбега при взлёте.

Главной частью самолёта является крыло. Работающий реактивный двигатель или винт винтомоторной установки тянут самолёт вперёд. Крыло при поступательном движении приобретает подъёмную силу, которая позволяет самолёту держаться и подниматься в воздухе. Подъёмная сила на крыльях возникает за счёт разности давлений воздуха над крылом и под крылом (см. ч. I, § 4). В поперечном сечении крыло имеет профиль, показанный на рисунке 15.

Величина подъёмной силы и лобового сопротивления во многом зависит от формы этого профиля.

У самолёта бывает одно крыло и два крыла. По числу имеющихся крыльев самолёты делятся на бипланы и монопланы. (По-гречески *би* — два, а *моно* — один). У биплана одно крыло помещается под другим на некотором расстоянии, как, например, у прославленного учебного самолёта «По-2» (У-2). В ранние годы развития авиации бипланы имели широкое распространение. В настоящее же время их применение крайне ограничено и лишь изредка они встречаются в учебной или грузовой тихоходной авиации.

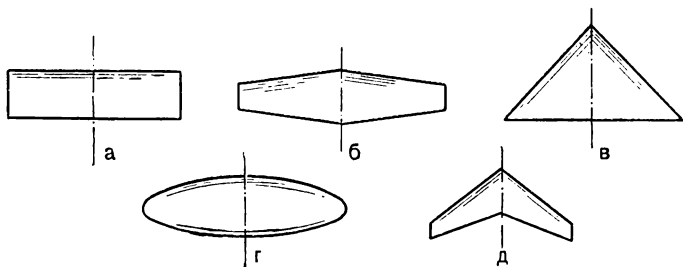


Рис. 29. Очертания крыльев самолёта.

Монопланная схема аэродинамически более выгодна и в настоящее время является господствующей. У биплана имеется вредное аэродинамическое влияние одного



Рис. 30. Реактивный гидросамолёт с треугольным крылом при взлёте с воды.

крыла на другое, уменьшающее подъёмную силу нижнего крыла. У моноплана оно отсутствует.

В плане (вид сверху на самолёт) крыло самолёта

может выполняться по различной форме (рис. 29): прямоугольной, трапецевидной, треугольной (рис. 30), эллипсовидной и стреловидной. Очертание крыла в плане влияет на величину лобового сопротивления. При прочих равных условиях, на малых скоростях полёта, эллипсовидное крыло является наивыгоднейшим, затем идёт трапецевидное и наихудшими аэродинамическими данными располагает прямоугольное крыло. Но в изготовлении оно проще, чем крылья с криволинейными очертаниями.

При малых скоростях аэродинамически выгодно иметь крылья с большими удлинением. Удлинением прямоугольного крыла называется отношение размаха крыла к его ширине. Чем длиннее и уже крыло, тем больше его удлинение. При дозвуковой скорости обтекания воздушные вихри, сбегаящие с концов крыла, оказывают вредное влияние на поток вдоль всего размаха крыла, создавая дополнительное сопротивление крыла, называемое индуктивным сопротивлением. Это сопротивление значительно уменьшается у крыльев с большим удлинением. У хорошо летающих птиц: чаек, буревестников, альбатросов и ласточек, крылья имеют значительные удлинения.

У самолётов, предназначенных для дальних полётов, крылья выполняются с большим удлинением; так, например, у рекордного самолёта «АНТ-25», на котором советские лётчики В. П. Чкалов и М. М. Громов летали через северный полюс в Америку, крыло самолёта имело удлинение, близкое к 13, в то время как обычно самолёты имеют удлинения, равные $5 \div 8$.

По соображениям прочности самолётные крылья нельзя изготовлять с весьма большими удлинениями, так как под действием аэродинамических сил такие крылья сильно прогибаются.

Прогибы конца крыла у существующих больших самолётов в полёте достигают более полуметра. При полёте в беспокойном воздухе, эти прогибы хорошо видны, если смотреть на крыло из кабины самолёта (рис. 31).

У скоростных самолётов волновое сопротивление намного больше индуктивного, поэтому удлинённые крылья перестают давать преимущества.

Аэродинамические силы — подъёмная сила и сила лобового сопротивления — действуют на поверхность крыльев в виде сил давления и сил трения. Эти силы

первоначально воспринимаются обшивкой крыла. С обшивки их действие передаётся на каркас крыла.

В полёте над крылом образуется разрежение, стремящееся отсосать — оторвать обшивку от крыла (рис. 32).

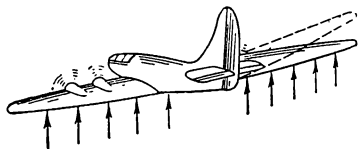


Рис. 31. Под действием аэродинамических сил крыло в полёте заметно прогибается.

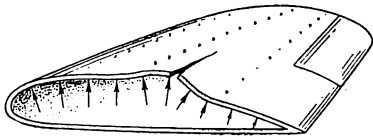


Рис. 32. В полёте над крылом образуется разрежение, стремящееся отсосать обшивку.

Естественно, обшивка должна надёжно крепиться. Крепление обшивки производится крепёжными соединениями — потайными заклёпками или точками контактной электросварки, не выступающими в поток и не нарушающими плавное обтекание потоком воздуха профиля крыла.

По аэродинамическим соображениям к обшивке современных скоростных самолётов предъявляются строгие требования в отношении её жёсткости, плавности и гладкости. Многим известно, как плавно и гладко выполняется поверхность современного легкового автомобиля, например «ЗИЛ»-а или «ГАЗ»-а. Поверхность же самолётных крыльев должна быть ещё более плавной и гладкой, чем у автомобиля.

Крыло несёт на себе элероны, они служат органами поперечного управления самолёта и имеют вид маленьких крылышек. В поперечном сечении элерон имеет форму, являющуюся как бы продолжением профиля крыла (рис. 33). Элерон отклоняется вверх и вниз на $12 \div 25^\circ$, сильно изменяя кривизну профиля крыла, а следовательно, и подъёмную силу правого или левого крыла самолёта.

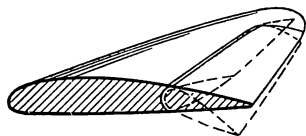


Рис. 33. Элерон является частью профиля крыла.

Перейдём к аэродинамическим формам фюзеляжа. Фюзеляжу всегда стремятся придать форму тела,

обладающего наименьшим лобовым сопротивлением. Для этого фюзеляж делают веретенообразной формы, без крупных и мелких местных выступов. Даже без выступов, которые могут образовать головки заклёпок.

В полёте фюзеляж испытывает аэродинамические нагрузки, приходящие от крыльев и хвостового оперения. Эти нагрузки воспринимаются конструкцией фюзеляжа.

Как известно, подъёмная сила самолёта создаётся крыльями. Фюзеляж же и хвостовое оперение с аэродинамической точки зрения являются «лишними», так как они значительно увеличивают сопротивление самолёта. Но как от них освободиться? Ведь фюзеляж нам нужен для размещения экипажа, грузов и т. д. Хвостовое оперение нужно для обеспечения устойчивости полёта и для управления. Оказывается от них можно освободиться. Представьте себе, что перед вами большой самолёт, у которого наибольшая толщина крыла равна росту человека и в нём можно ходить вдоль, как по коридору. Тогда экипаж и грузы можно разместить в крыле, а рули хвостового оперения перенести на крыло. Такой самолёт, внешне состоящий только из одного крыла, носит название «летающее крыло». В нём нет «лишних» частей

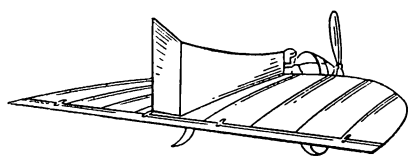


Рис. 34. Бесхвостый самолёт
Б. И. Черановского.

сопротивление воздуха сведено до минимума. С аэродинамической точки зрения самолёт «летающее крыло» является весьма заманчивым, но практически его трудно осуществить. Впервые в СССР опытные небольшие самолёты типа «летающее крыло» успешно строил советский конструктор Б. И. Черановский (рис. 34).

Если нельзя полностью освободиться от «лишних» частей самолёта, выступающих в поток воздуха, то находятся другие пути уменьшения сопротивления самолёта. Так, например, известно, что в полёте ноги у птиц вызывают лишнее добавочное сопротивление, поэтому они их поджимают, пряча в пушок перьев. Подобно этому и у самолётов шасси, после взлёта, прячут во внутрь фюзеляжа или крыла; такое шасси получило название убирающегося шасси.

После ознакомления с работой и аэродинамическими формами основных частей самолёта рассмотрим самый распространённый вид полёта самолёта.

Самолёт летит прямолинейно, горизонтально с постоянной скоростью. Можно утверждать, что самолёт находится под действием взаимно уравновешенных сил. Иначе говоря, равнодействующая всех сил, действующих на самолёт, равняется нулю. Это утверждение является следствием первого закона Ньютона.

Рассмотрим совокупность всех сил, возникающих при полёте самолёта (рис. 35, 36).

При полёте самолёт должен преодолевать силу сопротивления воздуха, для этого ему необходима сила тяги.

Наряду с появлением силы лобового сопротивления у крыла самолёта возникнет подъёмная сила. В горизонтальном равномерном полёте подъёмная сила направлена против силы тяжести самолёта и уравновешивает её.

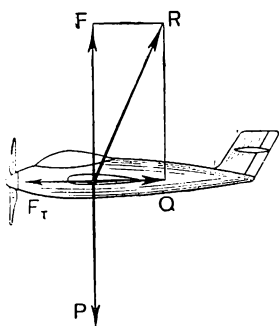


Рис. 35. Силы, действующие на самолёт в горизонтальном полёте.

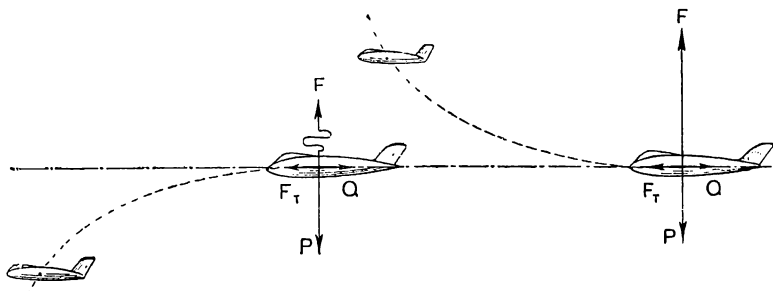


Рис. 36. Неравенство подъёмной силы и силы тяжести ведёт к отклонению полёта от горизонтали.

Таким образом, мы видим, что сила тяги уравновешивает силу лобового сопротивления, а подъёмная сила уравновешивает силу тяжести самолёта, т. е. все силы, действующие на самолёт в установившемся полёте, на-

ходятся в равновесии. Но равновесие сил ещё недостаточно для того, чтобы летящему самолёту придать в пространстве то или иное постоянное положение.

Необходимо ещё равновесие моментов всех сил. Напомним, что момент есть произведение величины действующей силы на её плечо. Он оказывает на тело поворачивающее действие.

Если сумма моментов всех сил равняется нулю, т. е. моменты, действуя в разные стороны, взаимно уравновешивают друг друга, то тело не будет вращаться. Если сумма моментов не будет равна нулю, то, очевидно, будет действовать какой-то неуравновешенный момент, который окажет на тело поворачивающее действие.

При поворотах самолёт вращается вокруг своего центра тяжести. Вращение самолёта можно разложить на повороты вокруг трёх осей. Для этого мысленно свяжем самолёт с прямоугольной системой координат x , y , z , с началом в центре тяжести самолёта (рис. 37).

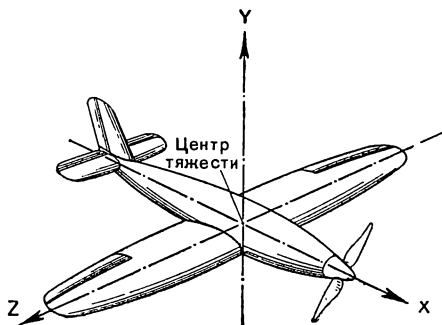


Рис. 37. Три оси самолёта.

Ось ox направим вдоль оси фюзеляжа и назовём продольной осью самолёта.

Ось oy проведём через центр тяжести самолёта перпендикулярно к плоскости xoz и назовём осью поворотов.

Ось oz направим вдоль размаха крыла перпендикулярно к плоскости xoy и назовём поперечной осью.

В летательных аппаратах — самолёте, вертолёте и ракете — принято называть:

поворот вокруг продольной оси *оx* — креном,
поворот вокруг оси поворотов *оу* — курсом,
поворот вокруг поперечной оси *оз* — тангажем.

У самолёта, как уже указывалось выше, поворот по крену достигается действием элеронов; поворот по курсу — действием руля поворотов; поворот по тангажу — работой рулей высоты.

Ознакомимся с действием органов устойчивости и управления самолёта.

Устойчивость и управляемость — понятия противоположные. Чем устойчивее самолёт, тем труднее его свернуть с пути, и наоборот. Величины устойчивости и управляемости у самолёта должны быть соблюдены в определённом соотношении. Это можно проследить на примере с лыжами. Очень длинные лыжи чересчур устойчивы, но их трудно свернуть с пути, в то же время очень короткие лыжи легко управляемы, но неустойчивы.

Первые самолёты не отличались достаточной устойчивостью и управляемостью. Потребовалось порядочно времени, чтобы полёт на них стал более или менее безопасен и не являлся бы исключительным событием.

Самолёту жизненно необходимо устойчиво летать и управляться.

Что значит устойчиво летать? Это значит легко сохранять, без вмешательства рулей раз принятое положение в воздухе. И если всё же ваш самолёт какими-то силами, например порывом ветра, выведен из этого положения, то устойчивый самолёт, несколько раз поколебавшись, всегда придёт в исходное положение.

В полёте на поверхность самолёта действует множество аэродинамических сил. Принято всё это множество заменять действием одной равнодействующей, называемой, как мы уже знаем, полной аэродинамической силой.

Точка приложения этой силы называется центром парусности или центром давления всех аэродинамических сил.

В самолёте можно мысленно представить две замечательные точки — это центр давления и центр тяжести (рис. 38).

От взаимного расположения этих точек зависит устойчивость самолёта. В устойчивом самолёте центр

давления лежит позади центра тяжести. У неустойчивого самолёта центр давления лежит впереди центра тяжести. Центр давления капризен. В полёте он может «гулять», т. е. менять своё положение, чего нельзя сказать про центр тяжести. Положение центра тяжести более или менее постоянно и зависит от расходования горючего из баков. Положение центра давления зависит

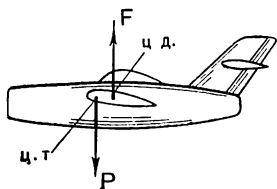


Рис. 38. Две замечательные точки у самолёта: центр тяжести и центр давления.

от угла атаки и скорости полёта. Если не принять мер, то на некоторых режимах полёта центр давления может оказаться впереди центра тяжести, и самолёт потеряет устойчивость. Всё искусство обеспечения устойчивости самолёта заключается в том, чтобы правильно задать положение центра давления и ограничить его перемещение на различных режимах полёта.

Необходимое положение центра давления на самолёте достигается соответствующим расположением крыла, хвостового оперения и центра тяжести.

Почему самолёт устойчив, если его центр давления лежит позади центра тяжести? Это легко понять на таком простом примере.

Рассмотрим полёт оперённого реактивного снаряда. Аэродинамическая форма этого снаряда крайне проста и состоит из корпуса в виде заострённого цилиндра и хвостового оперения — стабилизаторов. Крыльев и рулей снаряд не имеет. От этого принципиально дело не меняется, а понимание устойчивости упростится.

В воздухе этот снаряд должен быть безусловно устойчивым, иначе он не полетит туда, куда его направляют при выстреле.

Устойчивость и неустойчивость проследим на двух снарядах. У первого снаряда пусть центр давления лежит позади центра тяжести, у второго — центр давления лежит впереди центра тяжести (рис. 39).

Если порыв ветра отклонит первый снаряд и увеличит его угол атаки, то полная аэродинамическая сила будет стремиться уменьшить отклонение, и снаряд вернётся в первоначальное положение. Такой снаряд называется устойчивым.

Если порыв ветра отклонит второй снаряд и увеличит его угол атаки, то полная аэродинамическая сила будет стремиться увеличить отклонение. Нарастающий поворот приведёт к тому, что снаряд перевернётся. Такой снаряд называется неустойчивым. То же самое произойдёт и с самолётом, если у него центр давления аэродинамических сил от крыла, хвоста и фюзеляжа будет приложен впереди центра тяжести. Во избежание этого у самолёта всегда добиваются положения центра

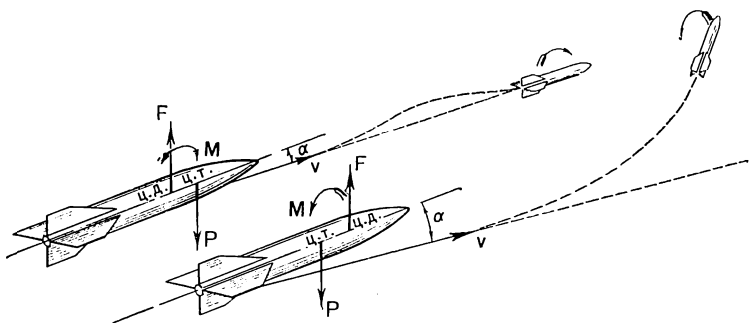


Рис. 39. При расположении центра тяжести позади центра давления летающий аппарат неустойчив — снаряд перевернётся.

давления позади центра тяжести, что достигается величиной и расположением хвостового оперения. У такого самолёта при порывах ветра полная аэродинамическая сила ликвидирует начавшееся отклонение, и самолёт сам приходит в первоначальное положение.

Что значит управляться? Это значит лететь туда, куда направляет самолёт лётчик. И лететь очень точно. При погоне самолёта-истребителя за вражеским самолётом и прицеливании чёткая управляемость крайне важна.

Потерять управление самолётом — это значит потерять всё. При потере управления самолёт становится таким же опасным, как мчащийся автомобиль, потерявший рулевое управление.

Как управляется самолёт? Самолёт в полёте управляется движением рулей, на которых возникают аэродинамические силы. Эти силы создаются благодаря давлению встречного воздуха на поверхность руля. У самолёта три руля: руль поворотов, руль высоты и элероны.

Руль поворотов и руль высоты размещаются на хвостовом оперении. Элероны — на крыле.

Если лётчик хочет изменить направление полёта, например повернуть самолёт вправо, то он правой ногой нажимает на правую педаль ножного управления (рис. 40, а). Педаль заставит руль поворотов через про-

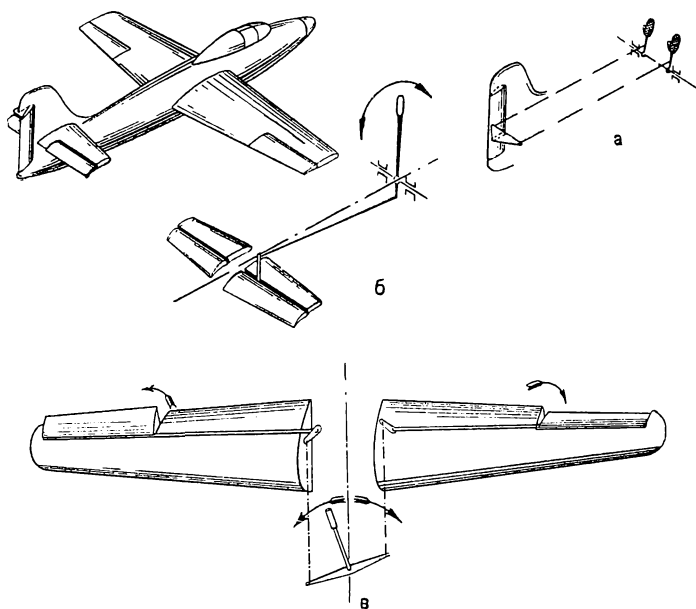


Рис. 40. Схемы управления:

а) рулём поворотов; б) рулём высоты; в) элеронами.

водку (тягу или трос) повернуться вправо. Руль поворотов, поставленный под углом к встречному потоку, будет испытывать давление воздуха, на нём возникнет аэродинамическая сила, которая заставит хвост, а с ним и весь самолёт, повернуться на некоторый угол.

Если лётчик желает опустить нос самолёта и поднять хвост самолёта, или, как говорят, повернуть самолёт относительно поперечной оси, то он отклонит руль высоты вниз. Для этого лётчик отодвигает ручку управления от себя (рис. 40, б). Ручка через проводку потянет

руль высоты, и он отклонится вниз. На руле высоты, поставленном под углом к встречному потоку воздуха, возникнет аэродинамическая сила, которая нажмёт на хвост снизу вверх, и самолёт повернётся вокруг поперечной оси.

Поворот самолёта вокруг продольной оси, проходящей вдоль фюзеляжа, достигается отклонением элеронов. Для этого пилот, передвигая ручное управление влево или вправо, отклоняет элероны в разные стороны (рис. 40, в). В результате подъёмная сила крыла с опущенным элероном возрастёт, а у крыла с поднятым элероном уменьшится.

Таким образом, самолёт повернётся вокруг продольной оси.

Почти с первых дней зарождения авиации началась борьба за скорость полёта.

На рисунке 74 показан рост по годам максимальной скорости рекордных самолётов. Из него видно, что за десятилетие, с 1903 по 1913 г., скорость самолёта увеличилась в 4 раза, за десятилетие, с 1913 по 1923 г., скорость возросла в 3 раза, в следующее десятилетие, с 1923 по 1933 г., скорость увеличилась в 1,75 раза и в период с 1933 по 1939 г. скорость увеличилась только в 1,07 раза.

Эти цифры относятся к самолётам с винтомоторной установкой. Они показывают замедление в росте скорости полёта. Это замедление обусловилось тем, что на скорости свыше $700\div 750$ км/час сопротивление самолёта резко возрастает, а тяга винта убывает. На большой скорости воздушный винт, как мы увидим далее, начинает тянуть самолёт всё с меньшей и меньшей силой. Значит, надо было отказаться от воздушного винта, а с ним и от всей винтомоторной установки и искать нового пути для достижения больших скоростей. Этот путь был указан нашим соотечественником знаменитым деятелем К. Э. Циолковским.

Его выдающиеся работы в области реактивного движения позволили ему пророчески сказать: «За эрой аэропланов винтовых должна следовать эра аэропланов реактивных...»

В 1937 г. был совершён первый в мире полёт на самолёте конструкции С. П. Королёва с реактивным двигателем.

В 1942 г. появился другой советский скоростной реактивный самолёт конструкции проф. В. Ф. Болховитинова.

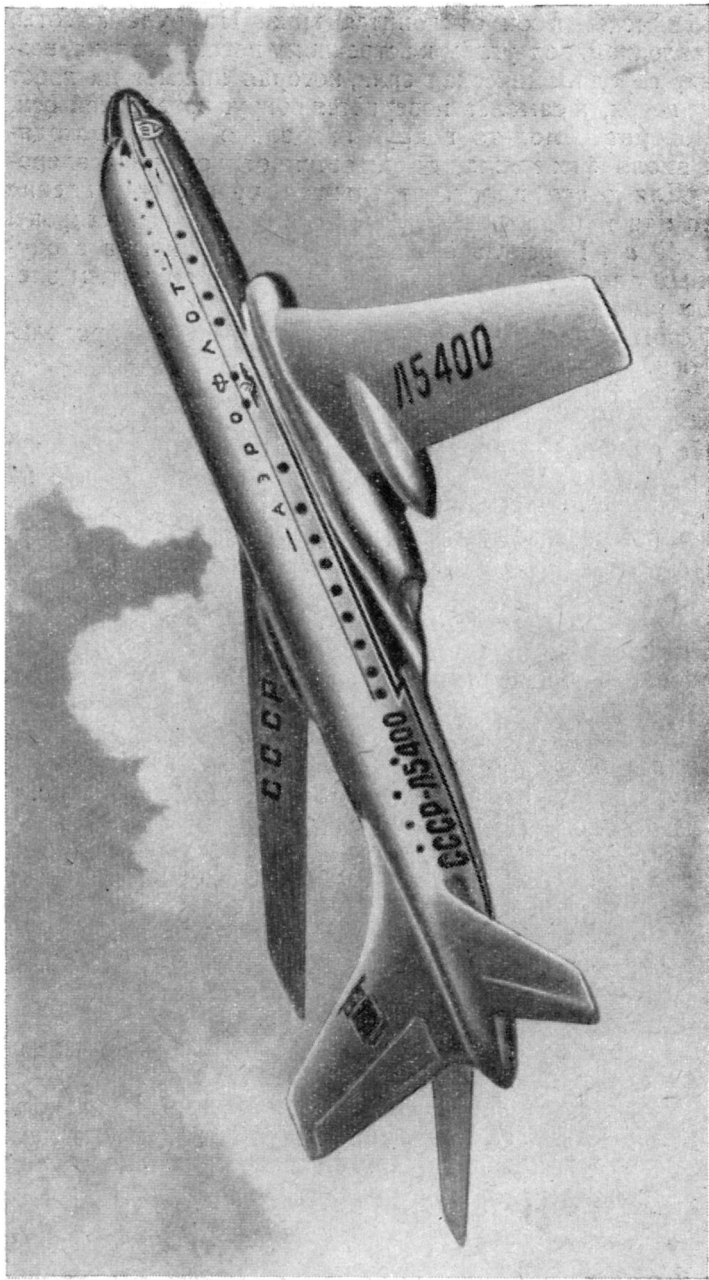


Рис. 41. Реактивный пассажирский самолёт ТУ-104.

Применение реактивного двигателя позволило получить невиданные скорости полёта, так как его тяга с увеличением скорости полёта не уменьшается, как у винтомоторной установки, а в некоторых случаях даже увеличивается.

Современные самолёты летают со скоростью, равной и даже большей скорости распространения звука в воздухе.

Стремление снизить огромное сопротивление воздуха на больших скоростях полёта заставило отказаться от угловатых, тупоносых форм тихоходных самолётов.

Внешние формы частей скоростного самолёта и их взаимное расположение или, как принято говорить, аэродинамическая компоновка самолёта, стала намного отличаться от самолёта малых скоростей (рис. 41).

У современных самолётов околозвуковых скоростей всё подчинено тому, чтобы отдалить появление скачков уплотнения перед движущимся телом. Дело в том, что у дозвукового самолёта скорость воздуха, набегающего на переднюю часть, является дозвуковой. Но если дозвуковой поток, обтекая тело, встретить на своём пути какую-нибудь выпуклость, например верхнюю часть крыла или кривизну на фюзеляже, которую надо успеть обогнуть, то на участке этой выпуклости поток становится звуковым и даже сверхзвуковым. А мы знаем, что на этих скоростях появляются скачки уплотнения. На выпуклость, как говорят, «сядет» скачок уплотнения (рис. 42, а). Эти скачки некоторые лётчики замечали в полёте в виде полос воздуха с иной оптической проницаемостью. Продвигать в воздухе самолёт, на поверхность которого «сел» скачок уплотнения, не так легко. Поэтому частям самолёта околозвуковых скоростей придают плавные заострённые формы с небольшой кривизной; так, например, фюзеляжу придают веретенообразную форму, а крылья делают тонкими, отогнутыми

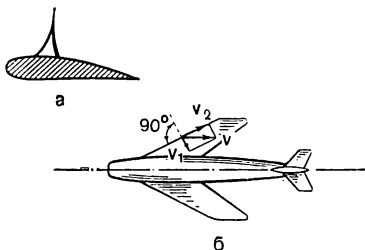


Рис. 42: а — местный скачок уплотнения при достижении в данном месте скорости звука; б — обтекание стреловидного крыла.

назад, придающими современному самолёту вид стремительно летящей стрелы.

Эти меры отдаляют появление скачков уплотнения.

Придание крыльям стреловидной формы отодвигает возникновение скачков уплотнения из-за обдувания их косым потоком воздуха. Как это получается, видно на рисунке 42, б. На нём показано, что на стреловидное крыло набегаёт поток со скоростью v . Скорость потока v по правилу параллелограмма можно разложить на две составляющие, одна из которых v_1 перпендикулярна к передней кромке крыла, а другая v_2 направлена вдоль крыла. В результате вместо одного потока со скоростью v мы получим два потока. Один поток со скоростью v_1 будет создавать нужную нам для образования подъёмной силы разность статических давлений над крылом и под крылом и ещё силу трения.

Другой поток со скоростью v_2 , направленный вдоль крыла, будет скользить вдоль крыла и создавать только одну силу трения.

Обратим внимание на то, что скорость потока v_1 , направленная перпендикулярно к крылу, значительно меньше полной скорости v , т. е. скорости полёта, а это означает, что придание стреловидности как бы равносильно некоторому уменьшению скорости полёта. А уменьшение скорости полёта отодвигает возникновение скачков уплотнения.

Таким образом, самолёт со стреловидным крылом может летать без скачков уплотнения на таких скоростях, при которых у самолёта с прямым крылом (без стреловидности) возникли бы скачки уплотнения.

Чем больше угол стреловидности, тем больше отодвигается момент возникновения скачков уплотнения на крыле. Обычно у самолётных крыльев угол стреловидности делается равным $35\div 45^\circ$.

У самолётов, летающих со сверхзвуковыми скоростями, скачки уплотнения воздуха неизбежны. Но ранее мы говорили, что скачки уплотнения могут быть прямые и косые. Прямой скачок возникает у тел с недостаточной заострённостью, косой — у заострённых тел. С косым скачком уплотнения (наклонённым к направлению движения) телу легче двигаться, чем с прямым.

Вот почему у сверхзвукового самолёта все передние части фюзеляжа, крыла, оперения заострены, и с ростом

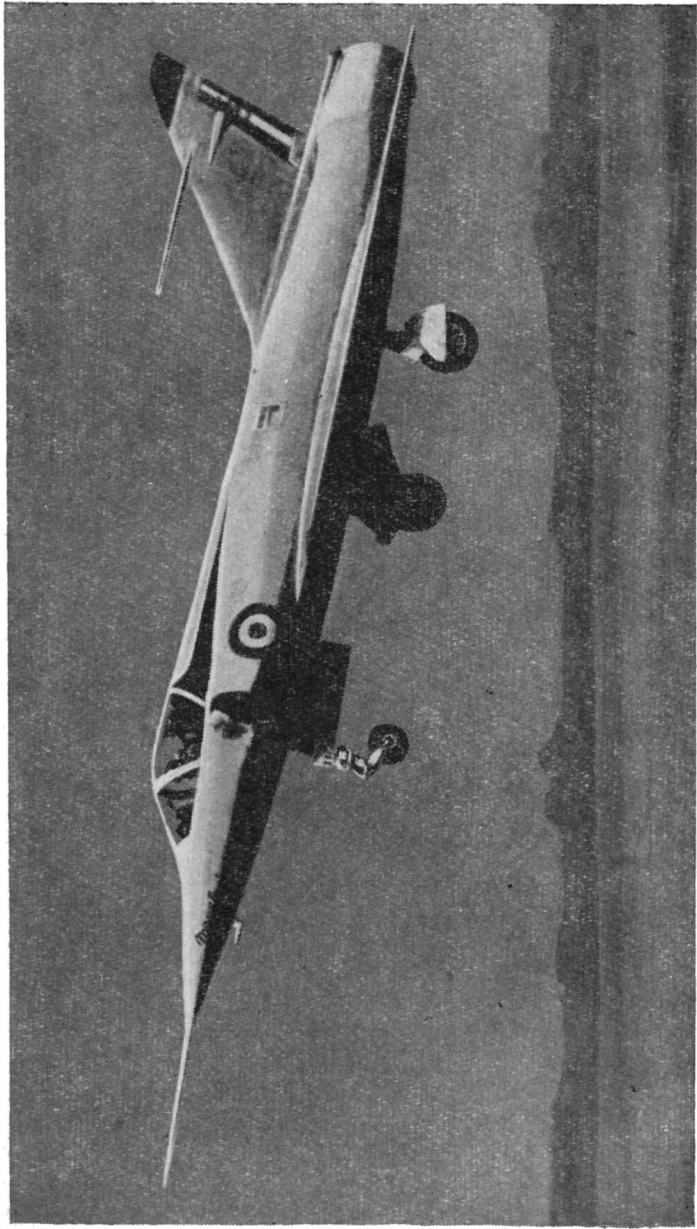


Рис. 43. Сверхзвуковой одноместный самолёт.

скорости передняя часть фюзеляжа приближается к форме кончика пули, а передняя часть крыла — к форме лезвия ножа (рис. 43).

При сверхзвуковых полётах скачки уплотнения будут возникать перед носовой частью фюзеляжа, перед крылом, перед всеми частями самолёта, вызывая дополнительное сопротивление воздуха.

Впервые правильный профиль крыла для сверхзвукового самолёта в виде двухстороннего клина был предложен нашим знаменитым учёным К. Э. Циолковским. На рисунке 44 показано изменение формы профилей крыльев, начиная от птичьего профиля и кончая сверхзвуковым профилем К. Э. Циолковского.

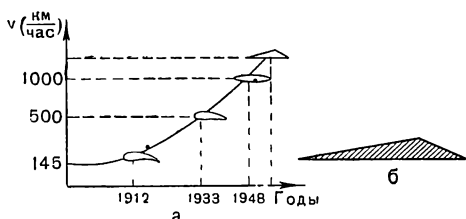


Рис. 44. От птичьего профиля до сверхзвукового профиля К. Э. Циолковского.

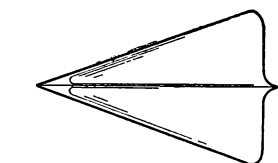


Рис. 45. Модель одного из проектировавшихся самолётов.

Можно предположить, что для сверхзвукового полёта выгодным окажется самолёт — летающее крыло с малым удлинением, треугольной формы в плане, со стреловидной передней кромкой (рис. 45).

Серьёзным препятствием при полёте на больших скоростях становится аэродинамический нагрев поверхности самолёта.

Главной причиной аэродинамического нагрева является торможение набегающего воздуха поверхностью самолёта. Это явление можно сравнить с выделением тепла при встрече пули с целью. Если пуля при встрече с каким-либо препятствием резко замедляет свой полёт, или, что всё равно, частичка воздуха резко затормаживается перед телом, то основная часть кинетической энергии движения пули и воздуха переходит в тепловую энергию. Это тепло в первом случае плавит свинец, из которого сделана пуля, и во втором случае нагревает

воздух. Подсчитано, что прирост температуры, связанный с полётом самолёта на скорости, в два раза превышающей скорость звука, составляет около 230°C . С таким нагревом трудно бороться.

Мы знаем, что на малых скоростях движения встречный поток воздуха охлаждает тело; например, воду в автомобильном или самолётном радиаторе двигателя. На больших же сверхзвуковых скоростях полёта получается так, что, несмотря на низкую температуру стратосферы, пилот сверхзвукового самолёта не имеет никакой возможности впустить внутрь своего самолёта хотя бы небольшую порцию холодного воздуха; для этого он должен затормозить воздух, набегающий на самолёт с большой скоростью, а при этом связанные с торможением превращения энергии движения воздуха обязательно проявляются в его нагревании. Поэтому для длительного полёта самолёта на сверхзвуковых скоростях фюзеляж и кабину пилота придётся оборудовать системой охлаждения.

3. Планёры

П л а н ё р — это безмоторный самолёт (рис. 46). По своей конструкции планёр похож на самолёт: он имеет крылья, фюзеляж, органы управления и взлётно-посадочное устройство. На планёре нет мотора — это его главное отличие от самолёта. Всякий самолёт, летящий с выключенным двигателем, с аэродинамической точки зрения становится планёром.

Русские учёные и изобретатели одни из первых в мире проложили верные пути к развитию авиации, открыв законы аэродинамики и практически доказав их на летающих моделях, воздушных змеях и планёрах. Симферопольский врач В. Я. Арендт провёл много интересных опытов с запуском в скольжение и в свободное парение различных замороженных птиц, которых поднимал на большую высоту с помощью воздушных змеев. В 1876 г. Арендт представил в Главное инженерное управление свой труд, в котором обосновал возможность подъёма и свободного полёта на планёрах. В 1888 г. им была издана книга «О воздухоплавании, основанном на принципе парения птиц», явившаяся первым в мире печатным трудом на эту тему.

После Великой Октябрьской социалистической революции планеризм получил в нашей стране широкое развитие. В 1919—1920 гг., по инициативе проф. Н. Е. Жуковского, предпринимаются первые шаги к возрождению



Рис. 46. Планёр в полёте.

отечественного планеризма. Им была создана лаборатория, объединявшая 45 любителей планёрного спорта. В 1920 г. организовался планёрный кружок «Парящий полёт», в мастерской которого советские конструкторы приступили к созданию планёров.

На протяжении нескольких лет советские планеристы проводили в горном районе Крыма, в Коктебеле (ныне

Планерское), плодотворные планёрные слёты, где испытывались новые аэродинамические схемы планёров и ставились рекорды безмоторного полёта.

В 1941 г. Советский Союз обладал 18 международными планёрными рекордами из которых многие до сих пор не превзойдены. Среди них рекорд дальности полёта по прямой, установленный планеристкой О. Клепиковой, — 749 км, полёт планериста Савцева в заранее намеченный пункт — 602 км. В 1951 г. замечательный рекорд дальности в заранее намеченный пункт, с возвращением к месту старта, равный 226 км, установила М. Пылаева. Полёт на дальность с возвращением к месту старта — один из самых трудных видов полёта на планёре. На высоте 600—1000 м планёр отцепляется от самолёта и, используя восходящие потоки, быстро набирает высоту, уходя к заданному пункту. Однако при возвращении не всегда можно быть уверенным в том, что воздушные потоки вас будут «ждать», особенно если полёт затянется до вечера. Под вечер ослабевают восходящие потоки воздуха, эти основные «двигатели» безмоторного аппарата.

В мае 1953 г. заслуженный мастер спорта В. Ильченко на двухместном рекордном планёре «А-10» конструкции О. К. Антонова, имея на борту пассажира-метеоролога, добился исключительного результата, пролетев по прямой из Москвы в южном направлении расстояние 829 км. При этих полётах очень важно правильно оценивать метеорологическую обстановку, связанную с восходящими потоками.

Поинтересуемся: почему летает планёр? Планёр летает, используя потенциальную энергию и энергию восходящих воздушных потоков. Потенциальную энергию планёр получает за счёт работы, совершённой для его подъёма на ту или иную высоту. Разберём два случая полёта планёра.

Первый случай — полёт планёра в спокойном воздухе. При этом планёр летит, используя потенциальную энергию, и подняться самостоятельно выше места старта не может. Самолёт, имея мотор и воздушный винт или реактивный двигатель, самостоятельно начинает полёт. Планёр же, не имея двигательной установки, не может самостоятельно начать движение. Для сообщения ему начальной поступательной скорости существует несколько

способов запуска планёра: с помощью натягивания резинового шнура (рис. 47), механической пусковой лебёдки и буксировки на тросе за самолётом.

Простейший запуск планёра с помощью растянутого резинового жгута заключается в следующем. Планёр за хвост прикрепляется к земле. На носовой крюк планёра

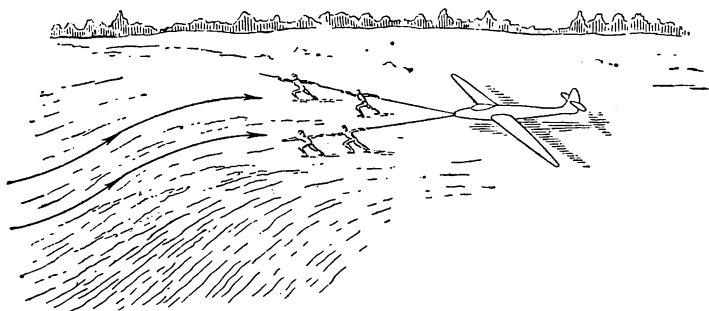


Рис. 47. Простейший запуск планёра в воздух.

надеваются два длинных конца резиновых жгутов. 5—8 человек стартовой команды натягивают эти шнуры. Пилот отцепляет хвост планёра от земли, и планёр, пробежав $10 \div 15$ м, как камень из детской рогатки, вылетает вперёд.

Затаскивая планёр на какую-нибудь гору или поднимая его в воздух за самолётом, мы сообщаем ему энергию, равную произведению веса планёра на высоту подъёма. Как известно, по закону сохранения энергии, энергия не исчезает и не возникает вновь, а лишь переходит из одной формы в другую. Затраченная на подъём планёра энергия не исчезает. Она идёт на работу против сил сопротивления при обратном спуске планёра. Но этот спуск в отличие от спуска бескрылого тела — камня, груза и т. д. будет не падением, а скольжением, или, как принято говорить, планированием.

Чему мы обязаны, что планёр будет скользить? — Крыльям планёра. При взаимодействии крыла с воздухом будет образовываться аэродинамическая сила, которая вместе с силой тяжести будет делать полёт скольльзящим. Планирующий (скользящий) полёт происходит по наклонной плоскости.

С точки зрения механики — это то же самое, что скольжение тела с наклонной плоскости под действием силы тяжести (рис. 48). Силой тяги у планёра, как и у скользящего по наклонной плоскости тела, будет являться составляющая силы тяжести, параллельная наклонной плоскости. У планёра она направлена против силы лобового сопротивления, у тела, скользящего по наклонной плоскости, —

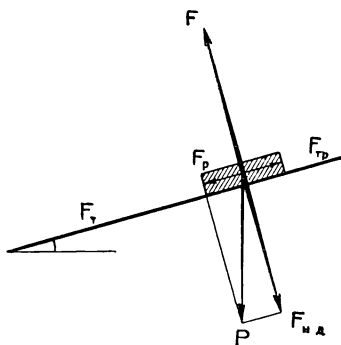
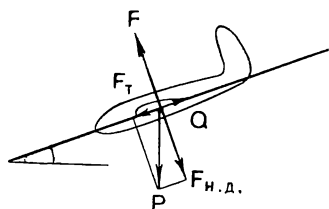


Рис. 48. Сравнение сил, действующих на снижающийся планёр и на тело, скользящее по наклонной плоскости.

против силы трения. Нормальная составляющая силы тяжести уравнивается силой давления плоскости на тело (в механике её называют реакцией опоры). У планёра нормальная составляющая силы тяжести уравнивается подъёмной силой крыльев, образующейся в результате движения планёра в воздухе.

Второй случай — полёт планёра в восходящих потоках. Используя их энергию, планёр может лететь без снижения или подниматься вверх — парить. Лететь, поднимаясь вверх, планёр может тогда, когда вертикальная скорость потока превышает вертикальную составляющую скорости снижения планёра.

Способ полёта в восходящих потоках человеком позаимствован у парящих птиц. Вот почему такой полёт называют парящим полётом.

На планёре можно парить в течение многих часов, совершать полёты на сотни километров, набирать высоту в несколько тысяч метров, достигая в отдельных случаях высоты полёта около 10 000 м.

Существует несколько видов восходящих потоков: потоки обтекания гор, потоки, образующиеся под кучевой

облачностью, потоки, образующиеся перед грозным фронтом, потоки над полями. Умело используя эти потоки, опытные планеристы могут летать на большие расстояния. Так, например, планеристка Ольга Клепикова на планёре «Рот-Фронт-7» конструкции О. Антонова пролетела из Москвы в Сталинградскую область, покрыв по прямой расстояние в 749 км. Естественно, что при этом она не затратила на свой полёт ни одного грамма горючего. Следует заметить, что для покрытия такого же расстояния на автомобиле типа «Победа» потребовалось бы более ста литров бензина.

Схема полёта планёра над равниной под кучевыми облаками обычно такова (рис. 49). Набрав высоту под

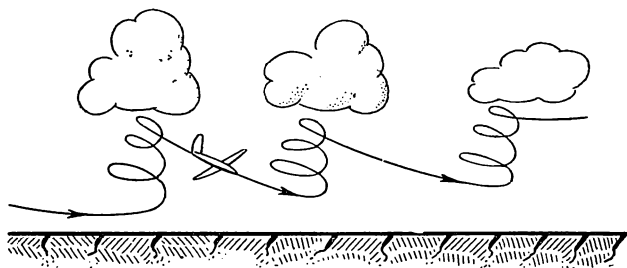


Рис. 49. Схема полёта на дальность под кучевыми облаками.

одним облаком, планер немного снижаясь, летит к другому облаку, где опять набирает высоту, и т. д. Получается своеобразная «облачная дорога». Возможна другая схема полёта на дальность, так называемый «полёт с грозным фронтом». Перед грозным фронтом (рис. 50) обычно имеется область сильных восходящих потоков. Находящийся в них планёр передвигается вместе с грозным фронтом. Обстановка полёта при таких условиях неприятна. Потемневшее небо бороздится молниями, и планёр швыряет мощными воздушными толчками, грозящими разрушить его. От пилота требуется исключительное самообладание.

Планёрам, особенно рекордным, присущи строгие аэродинамические очертания; крылья их имеют большое удлинение, т. е. большую длину и малую ширину, а это аэродинамически весьма выгодно. Мидель планёра силь-

но сжат. Фюзеляж имеет плавные обтекаемые формы. Колёса шасси заменены мало выступающей посадочной лыжей. Носовая часть «не испорчена» установкой двигателя. Крыло плавно сливается с фюзеляжем. На некоторых планёрах этот переход напоминает характерную изогнутость крыла, присущую прекрасному парителю — чайке. Эти качества, в совокупности с хорошей отделкой поверхности, обеспечивают планёру наименьшее сопротивление воздуха.

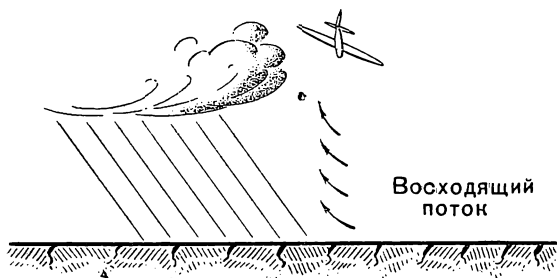


Рис. 50. Полёт на дальность с грозвым фронтом.

Из-за отсутствия мотора полёт на планёре сравнительно бесшумен, слышится только свист воздуха, обтекающего различные части планёра. При полёте на высоте 200 м можно даже разговаривать с планеристом с земли. Планеризм, особенно в первые десятилетия развития авиации, приносил большую пользу при изыскании наиболее выгодных аэродинамических форм летательных аппаратов.

В годы Великой Отечественной войны планёры использовались, как транспортные средства. В фюзеляже транспортного планёра размещаются всевозможные грузы. Планёр прицепляется на земле к самолёту-буксировщику тросом длиной 600÷800 м. Такой «воздушный поезд» прилетал в тыл противника и отцеплялся в воздухе. Благодаря своей малой посадочной скорости (около 80 км/час) и применению комбинированного лыжноколёсного шасси такой планёр может садиться на маленькие площадки с рыхлым грунтом.

В наши дни планеризм является полезным и захватывающим видом спорта, приобщающим молодёжь к авиационной технике.

Многие из наших прославленных авиационных конструкторов — Герой Социалистического Труда А. Н. Туполев, С. В. Ильюшин, А. С. Яковлев и другие — прошли школу планеризма, которая помогла им в работе по созданию замечательных боевых самолётов.

4. Воздушные винты

Мы уже рассказали, как, используя законы аэродинамики, можно создать крыло, способное поднять самолёт в воздух и поддерживать его во время полёта.

Но крыло, как и фюзеляж, хвостовое оперение, шасси и другие части самолёта, испытывает лобовое сопротивление воздуха. Чтобы самолёт мог совершать полёт, необходимо, чтобы какая-то сила тянула его вперёд, преодолевая лобовое сопротивление.

Какая же сила может тянуть самолёт вперёд? Ведь самолёт нельзя тянуть на верёвочке, как змей.

На самолёте есть двигатель. Но двигатель сам не может тянуть самолёт. Полезная работа двигателя идёт на то, чтобы сообщить валу энергию вращения. Когда подобный двигатель установлен на автомобиле, то энергия вращения вала передаётся колёсам. Колёса, отталкиваясь от земли, двигают автомобиль вперёд. А как же быть в воздухе?

Оказывается, можно сделать так, что аэродинамическая сила, сила воздействия воздуха на движущееся в нём тело, будет не только оказывать вредное сопротивление, но и тянуть самолёт вперёд. Для создания силы тяги в воздухе служат воздушные винты. Они применяются на самолётах, дирижаблях, аэросанях, глиссерах. До появления реактивных самолётов воздушный винт был единственным средством для сообщения самолёту тяги. Двигатели, установленные на автомобиле, пароходе, тракторе, винтовом самолёте, аэросанях, сами по себе ещё не могут создать тяги.

Для того чтобы создать тягу, эти двигатели нуждаются в промежуточных посредниках, которые в результате отталкивания от внешней среды — земли, воды или воздуха, развивают силу тяги, направленную вперёд. Такими посредниками, через которые передаётся работа двигателя, у автомобиля являются ведущие задние колёса, у корабля — водяной винт, у трактора — гусеницы,

а у винтомоторного самолёта — воздушный винт. Этих посредников принято называть д в и ж и т е л я м и. Однако есть замечательный двигатель — реактивный двигатель. Он не нуждается в движителе. В нём давление газов, без всяких промежуточных механизмов, толкает камеру реактивного двигателя, заставляя её перемещаться вперёд в любой среде и даже в безвоздушном пространстве. Реактивный двигатель — это, как говорят, двигатель прямой реакции.

При полёте самолёта с поршневым двигателем реактивное действие осуществляется не непосредственно, а через движитель — воздушный винт, вращаемый двигателем. Воздушный винт при своей работе засасывает воздух спереди и отбрасывает его назад, в сторону, обратную полёту. Воздух, который отбрасывается винтом, создаёт силу реакции, толкающую лопасти винта, а с ними и весь самолёт вперёд. При этом, чем большую массу воздуха в единицу времени отбрасывает винт, тем большую силу тяги получают его лопасти. Здесь уместна аналогия с гребцом: чем большую массу воды в единицу времени отбрасывает вёслами гребец, тем большей получается сила, толкающая лодку вперёд. Для создания требуемой тяги лопасти современного винта мощного мотора должны отбрасывать в секунду более 200 м³ воздуха. При этом отбрасывании воздуха лопасти винта испытывают давление, направленное вперёд, т. е. силу тяги. Чтобы при заданном диаметре винта и числе его оборотов увеличить количество отбрасываемого воздуха и скорость воздуха, винты делают с 3 и 4 лопастями. Лопасти винта укреплены во втулке под некоторым углом к плоскости вращения винта. Этот угол называется углом установки лопасти и может меняться. От этого угла зависит шаг винта. Шагом воздушного винта называется расстояние, на которое продвинулся бы винт за один оборот, двигаясь в воздухе, как в жёсткой гайке.

Основоположником теории воздушных винтов является проф. Н. Е. Жуковский. Лопасть винта в поперечном сечении имеет вид профиля крыла самолёта. Работа лопасти винта имеет много общего с работой крыла, но имеет и свои отличия. Так же, как и крыло самолёта, лопасть винта при своём движении атакует воздух под некоторым углом атаки α . В результате обтекания профиля лопасти на ней возникает полная

аэродинамическая сила R . Эту силу по правилу параллелограмма можно разложить на силу тяги F , действующую по направлению полёта, и на силу сопротивления вращению $F_{с.в.}$, которая преодолевается двигателем (рис. 51).

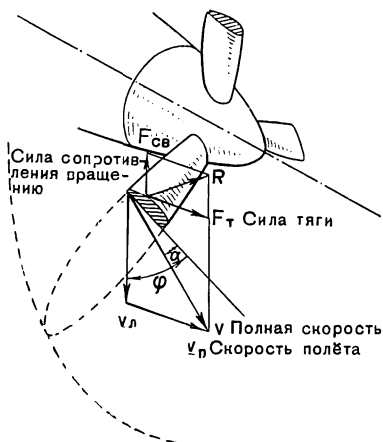


Рис. 51. Схема аэродинамических сил, действующих на лопасть винта в полёте.

Говоря об угле атаки лопасти α , надо сказать, что угол атаки есть угол между хордой лопасти и направлением геометрической суммы скоростей v . Дело в том, что в отличие от крыла самолёта, лопасть винта совершает не одно, а два движения. Она вращается и движется вперёд. На лопасть набегают как бы два потока: поток в плоскости вращения, от того что винт

вращается, и поток, направленный перпендикулярно к плоскости вращения винта, оттого, что винт движется поступательно со скоростью полёта вместе с самолётом. Скорости этих потоков являются векторными величинами. Если сложить эти два вектора по правилу параллелограмма, то получим величину и направление геометрической суммы скоростей потока.

Во втулке винта лопасти поворачиваются и их можно установить под различными углами к плоскости вращения.

Рассмотрим простейший винт в виде двух повернутых плоских лопастей с постоянным углом установки, т. е. без закрутки (рис. 52). Повернём лопасти во втулке так, чтобы они встали перпендикулярно к плоскости вращения, т. е. дадим угол установки 90° . Такой винт очень трудно вращать и полезной работы от такого винта нельзя получить, так как тяги он развивать не будет.

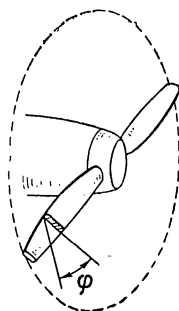


Рис. 52. Лопасти в виде плоских лопаток без закрутки при различных углах установки ϕ .

Он будет работать как мешалка в тесте или мулинетка для испытания двигателя. Принято говорить, что чем труднее вращать винт, тем он тяжелее. Самым тяжёлым винтом будет винт с углом установки лопасти 90° .

Возьмём другой крайний случай. Повернём лопасти во втулке так, чтобы угол установки стал равен нулю, т. е. поставим их в плоскости вращения винта. Лопасти легко будут рассекают воздух, встречая весьма малое сопротивление. Такой винт будет называться самым лёгким. Он также не даёт полезной работы, так как его тяга равна нулю. Если же мы поставим лопасти под наклоном к плоскости вращения, т. е. дадим угол установки лопасти, например, 30° , то в этом положении лопасти винта будут совершать полезную работу, возникает тяга. Таким образом, меняя углы установки или шаг винта, лётчик может на винте с изменяемым шагом, в зависимости от условий полёта, регулировать тягу винта, затягивая или облегчая винт.

До скорости полёта 750 км/час воздушные винты работают хорошо, переводя приблизительно $80\text{—}83\%$ мощности двигателя в работу продвижения самолёта. При скорости полёта больше 750 км/час к. п. д. винта падает. Это видно из следующего. Из механики вращательного движения известно, что линейная скорость точки увеличивается с увеличением расстояния её от оси вращения. Поэтому сечения лопасти, лежащие ближе к её концу, имеют наибольшую скорость. Например, при работе на месте винта, диаметром 3 м , при скорости $2\,300 \text{ об/мин}$ линейная скорость конца лопасти будет:

$$v_{\text{окр.}} = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 230}{60} = 360 \text{ м/сек},$$

т. е. больше скорости звука.

Это при работе винта на месте. В полёте же самолёта винт, помимо вращательного движения, имеет ещё поступательное движение. Это означает, что если самолёт летит, например, со скоростью $v = 750 \text{ км/час}$, то и все сечения лопасти будут перемещаться с такой же поступательной скоростью. Если линейную скорость конца лопасти геометрически сложить с поступательной, то мы получим скорость конца лопасти, равную примерно 1500 км/час , т. е. в $1,2$ раза больше скорости звука. А мы уже знаем (см. ч. I, § 5), что влекут за собой подобные

скорости. При таких скоростях на передней части лопасти возникнет скачок уплотнения, — сопротивление воздуха резко возрастёт и для его преодоления к лопастям винта потребуется подводить большую добавочную мощность двигателя, при этом к.п.д. винта сильно падает. И если бы самолёты стали штурмовать большие скорости полёта с винтомоторной установкой, то из этого ничего не вышло бы, так как мощность винтомоторной установки, а с ней и вес самолёта стали бы непомерно большими.

К недостаткам винта надо ещё отнести то, что в разреженных слоях атмосферы он отбрасывает меньше воздуха, чем у земли. Это ведёт к падению тяги. Поэтому для полётов на больших высотах винт непригоден.

Говоря о недостатках винтов на больших скоростях полёта, не следует думать, что воздушные винты отжили свой век. В авиации малых и средних скоростей (до 750 км/час) они вне конкуренции, так как на этих скоростях работа винтомоторной установки отличается большой экономичностью.

5. Вертолёты

Может ли самолёт садиться и взлетать с крыш домов, с улиц города? Взлетать и садиться в горных ущельях, подбирать в море тонущих людей? Нет, не может. Но это может сделать его собрат — летательный аппарат, называемый вертолётom (рис. 53). В воздух вертолёт поднимается прямо с места — без разбега. Опускается вертолёт на землю отвесно — без пробега. При надобности он может повисать в воздухе и с помощью верёвочной лестницы забирать на борт или высаживать людей.

Большинство современных вертолётom строится по классической схеме, предложенной в 1911 г. академиком Б. Н. Юрьевым и позаимствованной у нас иностранными авиационными фирмами.

Современный вертолёт (рис. 54) состоит из фюзеляжа — корпуса, над которым в горизонтальной плоскости помещаются большие вращающиеся лопасти несущего винта. Этот винт является главной частью вертолётom. На конце фюзеляжа укрепляются лопасти небольшого хвостового винта, вращающегося в вертикаль-



Рис. 53. Вертолёт в полёте.

ной плоскости. Фюзеляж стоит на земле на трехколёсном шасси.

Внутри фюзеляжа размещается экипаж и двигатель — поршневой или газотурбинный, который посредством трансмиссии вращает несущий винт. На некоторых вертолётах несущий винт приводится в действие реактивным двигателем.

Лопасті несущего винта представляют собой длинные и узкие крылышки. В поперечном сечении они имеют вид профиля крыла самолёта, только у самолёта крыло

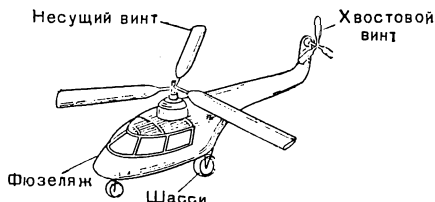


Рис. 54. Основные части современного вертолёта.

закреплено неподвижно и создаёт подъёмную силу при поступательном движении самолёта. У вертолёта же лопасти закреплены подвижно — они вращаются. При вращательном движении на лопастях вертолёта, установленных под некоторым углом атаки, как и у крыла самолёта, возникает подъёмная сила. В случае вертолёта подъёмная сила винта называется силой тяги несущего винта. Под действием этой силы вертолёт поднимается в воздух. Лопасти во втулке несущего винта могут поворачиваться и устанавливаться под различными углами к плоскости вращения винта. Эти углы называются установочными.

Одновременным изменением установочных углов всех лопастей достигается изменение общего шага несущего винта и тем самым изменение силы тяги несущего винта. Изменение шага винта производится из кабины лётчиком. Помимо этого, по желанию лётчика каждой лопасти можно придать различные установочные углы и получить на них неодинаковые подъёмные силы. В результате этого происходит смещение силы тяги винта. Смещённая сила тяги вызывает в итоге наклон вертолёта. Горизон-

тальная составляющая силы тяги будет тянуть вертолёт вперёд, благодаря чему вертолёт может лететь не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном. Наклонение силы тяги вправо или влево позволяет вертолёту лететь в боковом направлении. Наклонение силы тяги в сторону хвоста позволяет вертолёту лететь даже назад. Придание различных установочных углов каждой лопасти производится попеременно (циклически) при прохождении ими определённого сектора окружности. Это выполняется с помощью устройства, называемого автоматом перекоса, предложенного в 1910 г. Б. Н. Юрьевым. Автомат перекоса управляется из кабины лётчиком.

При вращении у каждого винта, в том числе и у вертолётного несущего винта, возникает реактивный момент, стремящийся повернуть фюзеляж вертолёта против вращения винта. Его необходимо парализовать. Он уравнивается моментом от тяги хвостового винта (рис. 55).

Выше (ч. II § 2) мы видели, что подъёмная сила крыльев, поддерживающая самолёт в воздухе, возникает в том случае, если самолёт имеет поступательную скорость относительно воздуха. В силу этого самолёт не может остановиться в воздухе. С уменьшением скорости полёта до весьма низких пределов самолёт будет проваливаться в воздухе, терять управление и перейдёт в штопор или иное беспорядочное падение.

Самолёт вынужден перед взлётом некоторое время разгоняться по аэродрому, пока подъёмная сила крыльев не поднимет его в воздух.

Самолёт вынужден перед посадкой полого заходить к аэродрому и затем некоторое время пробежать по земле.

Чем быстрее самолёт, тем значительнее становятся у него перечисленные недостатки. Так, например, перед взлётом современный скоростной самолёт-истребитель бежит по земле около 1000 м. Садится же на землю

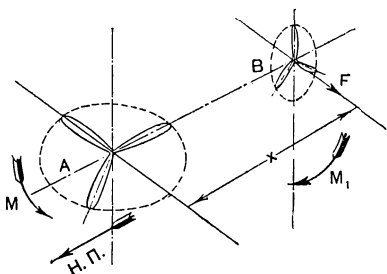


Рис. 55. Реактивный момент от главного винта уравнивается моментом от тяги хвостового винта.

со скоростью, достигающей до 250 км/час (в два раза больше максимальной скорости, развиваемой автомобилем «Победа»).

Освободиться от этих недостатков самолёт не может, а для того, чтобы их уменьшить, надо увеличивать площадь крыла. Однако это невыгодно, так как с увеличением площади крыла растёт сопротивление крыла и уменьшается максимальная скорость самолёта.

От всех этих недостатков свободен вертолёт. Подъёмная сила у вращающегося несущего винта вертолёта может образоваться при полном отсутствии поступательной скорости, поэтому фюзеляж вертолёта может оставаться неподвижным относительно воздуха, т. е. стоять на месте или, как говорят, висеть в воздухе.

Если у несущего винта тяга больше веса вертолёта, то он может без разбега, прямо с места, вертикально взлететь в воздух. Если тяга несущего винта уменьшится и станет меньше веса вертолёта, то вертолёт будет вертикально опускаться.

У вертолёта есть и свои недостатки. По сравнению с самолётом у него значительно меньшая скорость, дальность и высота полёта. Однако у вертолёта большая будущность в использовании его в таких областях, как связь, санитарная авиация, сельское хозяйство, лесное хозяйство, рыболовство и т. д.

Так же, как и самолёт, вертолёт — русское изобретение. Изобретателем вертолёта является гениальный русский учёный М. В. Ломоносов. Им была разработана и спешно испытана действующая модель летательного аппарата, подъёмная сила которого создавалась несущими винтами. Вертолёт М. В. Ломоносова предназначался для подъёма метеорологических приборов с целью исследования верхних слоёв атмосферы (рис. 56).

У вертолёта М. В. Ломоносова было два несущих четырёхлопастных винта, расположенных на одной геометрической оси, один над другим, и вращающихся в разных направлениях под действием пружинного часового механизма. Благодаря противоположному вращению винтов их реактивные моменты взаимно уравновешивались.

В разработку теоретических основ вертолёта много вложил труда и другой русский учёный — Н. Е. Жуковский, а его ученик Б. Н. Юрьев в 1908—1910 гг. спроек-

тировал и построил первый, практически пригодный для полёта вертолёт.

В дальнейшем советские вертолёты, созданные по схеме Б. Н. Юрьева, в 1932 г. установили мировой рекорд высоты по классу вертолёт, поднявшись на вы-

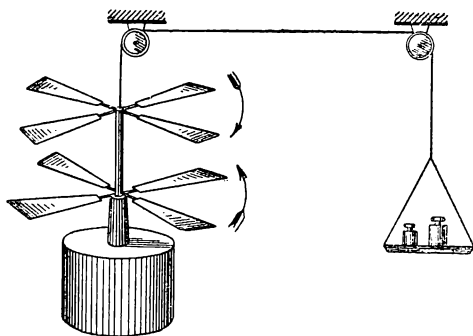


Рис. 56. Схема вертолёта М. В. Ломоносова.

соту 605 м, перекрыв тем самым в 30 раз существовавший рекорд.

В 1940 г. советский конструктор И. П. Братухин построил вертолёт оригинальной схемы с двумя разнесёнными несущими винтами.

Строительство советских вертолёт быстро идёт вперёд. На воздушных парадах в Тушино, на Московском стадионе «Динамо» перед сотнями тысяч зрителей демонстрировались выдающиеся достижения советских вертолёт, созданных советскими конструкторами М. Л. Милем, А. С. Яковлевым, И. П. Братухиным, Н. И. Камовым и другими.

6. Парашюты

Во всей выше рассмотренной технике заметно стремление свести до минимума лобовое сопротивление движущегося тела.

В парашютной технике, наоборот, стремятся как можно больше увеличить лобовое сопротивление с тем, чтобы больше затормозить движение падающего тела. Это достигается, как видно из формулы лобого сопротивления:

$$Q = C_x \cdot S \frac{\rho v^2}{2},$$

увеличением площади движущегося тела. Парашют, прикреплённый к какому-нибудь телу, в сложенном виде занимает мало места. Тот же парашют с раскрытым куполом будет обладать большой аэродинамической поверхностью, следовательно, большим лобовым сопротивлением.

Применение парашютов крайне разнообразно. Пилотские парашюты применяются для спасения пилотов, грузовые парашюты — для спуска с самолёта различных грузов и различной десантной техники: оружия, пушек, грузовиков. Парашюты применяют: для спасения метеорологических приборов, для высадки десантных войск, а также для торможения пробега самолёта при посадке на аэродром с ограниченными размерами.

Изобретателем первого ранцевого авиационного парашюта является наш соотечественник Г. Е. Котельников. Предложенный им в 1911 г. парашют для спасения лётчиков впервые был испытан русским студентом Петербургской консерватории В. Оссовским. Опытные испытания проводились в г. Руане (Франция) на реке Сене при прыжках с моста. Испытания прошли успешно.

С тех пор парашюты системы Г. Е. Котельникова спасли немалое количество жизней лётчиков и являются необходимой принадлежностью экипажа военных и экспериментальных самолётов.

Парашюты системы Г. Е. Котельникова и его продолжателя — лауреата Ленинской премии Н. Лобанова способствовали развитию массового советского парашютного спорта. С 1932 г. советские парашютисты прочно удерживают за собой большинство мировых рекордов по прыжкам с парашютом и постоянно занимают первенствующее положение во всём мире. Об этом ещё в 1935 г. говорил Маршал Советского Союза К. Е. Ворошилов:

«Парашютизм — это область авиации, в которой монополия принадлежит Советскому Союзу. Нет страны в мире, которая могла бы сказать, что она может в этой области хоть приблизительно равняться с Советским Союзом».

Среди парашютных рекордов особенно выделяется достижение советского парашютиста-спортсмена В. Романюка, совершившего прыжок с высоты 13 400 м.

Парашютист, в зависимости от обстоятельств, не сразу открывает парашют. Например, при затяжных

прыжках парашютист продолжительное время падает в воздухе, не раскрывая парашюта. При этом вначале он падает ускоренно, и, хотя аэродинамическая форма человеческого тела мало обтекаема, всё же через некоторое время в верхних слоях атмосферы достигается скорость падения более $180 \div 200$ км/час. В дальнейшем заметного увеличения скорости не произойдёт, так как на этой скорости сила аэродинамического сопротивления человеческого тела уравнивается его весом. После раскрытия парашюта скорость падения резко уменьшится и с некоторого момента, когда аэродинамическое сопротивление купола парашюта станет равным весу парашютиста вместе с парашютом, наступит спуск с постоянной скоростью (рис. 57, а). Эта скорость легко подсчитывается, если приравнять силу тяжести спускаемого тела силе аэродинамического сопротивления.

Тогда из формулы

$$P = Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2}$$

находим, что

$$v_{\text{спуска}} = \sqrt{\frac{2P}{C_x \rho S_{\text{параш}}}}.$$

Так, например, принимая вес парашютиста плюс вес парашюта равным

$$P = 80 \text{ кг} + 10 \text{ кг} = 90 \text{ кг},$$

коэффициент лобового сопротивления парашютного купола $C_x = 0,75$, площадь купола $S = 70 \text{ м}^2$ и плотность воздуха у земли $\rho = 0,125 \frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^4}$ и подставляя указанные величины в формулу, найдём, что скорость спуска парашюта для таких условий будет:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 90}{0,75 \cdot 0,125 \cdot 70}} \approx 5,2 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Парашют используется для торможения самолёта во время пробега по земле.

Ранее говорилось, что с ростом максимальной скорости самолёта посадочная скорость его увеличивается, а следовательно, растёт и пробег самолёта. Торможение колёсами уменьшает пробег самолёта, но недостаточно,

и тогда на помощь приходит тормозной парашют (рис. 57, б). Он «выбрасывается» сзади самолёта в тот момент, когда самолёт чуть коснётся колёсами земли, и тянет самолёт назад, значительно сокращая пробег. Тормозной парашют становится особенно необходимым, когда самолёт садится на мокрый травяной или грязный аэродром (в этих случаях эффективность тормозов из-за

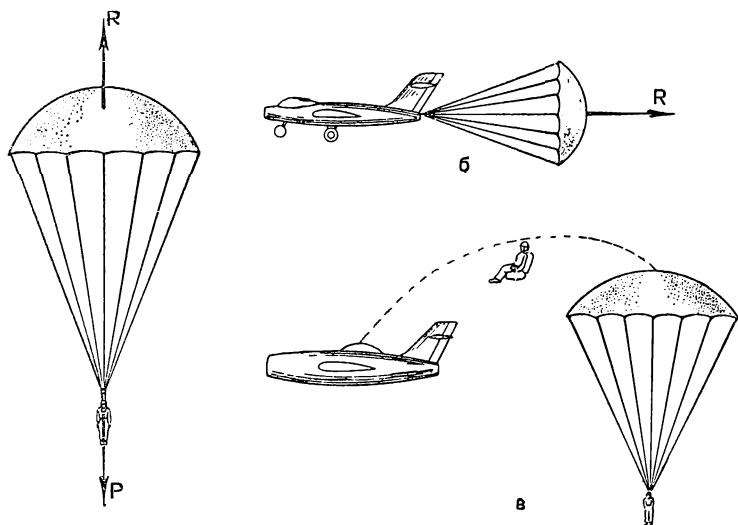


Рис. 57. Применение парашюта:

а — спуск парашютиста; *б* — сокращение пробега самолёта с тормозным парашютом; *в* — схема действия катапультируемого кресла пилота.

сравнительно маленького коэффициента трения колёс сильно падает) или когда лётчик при посадке ошибётся, не рассчитав длину аэродрома, тогда парашютный способ торможения исправляет ошибку лётчика.

При полёте на скоростном самолёте лётчику, терпящему аварию, не так легко воспользоваться услугами парашюта. Дело в том, что на больших скоростях полёта аэродинамическое сопротивление человеческого тела столь велико, что покинуть самолёт обычным образом невозможно. В таких случаях пользуются (рис. 57, в) установкой, носящей название «катапультируемое кресло». Лётчик нажатием кнопки принудительно «выстреливается» вместе с креслом в поток воздуха за пределы

хвостового оперения самолёта. При дальнейшем свободном падении скорость уменьшается и лётчик, освободившись от кресла, раскрывает свой парашют.

При больших скоростях полёта скоростной напор воздуха $\left(\rho \frac{v^2}{2} [\text{кг/м}^2]\right)$ столь велик, что человеческое лицо приходится защищать от разрушительного действия аэродинамических сил специальным козырьком и маской.

Так, например, скоростной напор при скорости полёта $v = 1000 \text{ км/час}$ на высоте 500 м давит на квадратный сантиметр тела человека, в том числе и лицо, с силой равной 0,460 кг.

Парашюты находят применение и для спасения исследовательской аппаратуры при полётах метеорологических ракет, достигающих в отдельных случаях высоты 400 км.

7. Ракетные тележки

Кто из вас не знает, что в воздухе можно летать со скоростью более 2 тысяч километров в час.

А удаётся ли по земле передвигаться с такой скоростью?

Переберём в памяти все известные виды самого скоростного наземного транспорта.

...Гоночный автомобиль, экспресс... Нет, им далеко до таких скоростей!

Однако есть такой наземный аппарат, который мчится со скоростью $3 \div 3,5$ тысячи километров в час, т. е. быстрее сверхзвукового самолёта. Огненной молнией проносится он мимо Вас.

Имеются ввиду так называемые ракетные тележки (рис. 58).

Мало кто ещё видел эти тележки. Они только появляются на свет и служат сейчас испытательным целям. Как и современный самолёт, такие тележки обязаны большим скоростям реактивному двигателю.

Установленные позади тележки мощные пороховые или жидкостнореактивные двигатели с огромной скоростью мчат ракетную тележку по железнодорожному полотну.

Читатель, наверное, удивится: какие же колёса могут выдержать столь быстрое вращение при движении тележки? Ведь при скорости тележки, например

3,6 тысячи километров в час колесо диаметром в 1 метр должно вращаться со скоростью приблизительно 300 оборотов в секунду! Такая скорость вращения недоступна

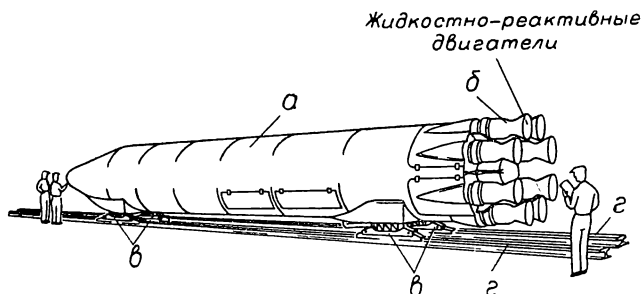


Рис. 58. Сверхзвуковая ракетная тележка:

а — корпус; б — жидкостные реактивные двигатели; в — ползья;
г — рельсы.

сейчас даже лучшим авиационным колёсам. Максимальная скорость передвижения самолёта по земле составляет около 500 километров в час.

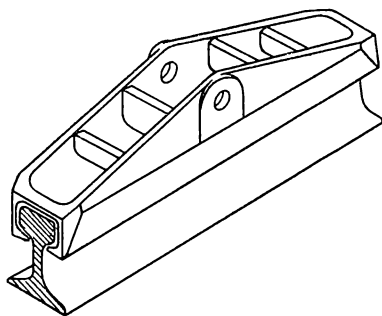


Рис. 59. Полоз ракетной тележки.

В чём же секрет, почему ракетная тележка может передвигаться по земле с такой колоссальной скоростью? А секрет прост!

Ракетная тележка вовсе не имеет колёс. Она обходится без них. Ракетная тележка не катится по рельсам, а скользит по железнодорожному полотну. Для этого она оборудована четырьмя ползьями. Каждый полоз (рис. 59) выполнен в виде башмака, плотно обтягивающего головку рельса. Башмак не даёт тележке сойти с рельс. Поверхности башмака, трущиеся о рельс, сделаны из особо прочного сплава — стеллита — и обильно смазываются маслом.

Мчится такая тележка по многокилометровой трассе железной дороги.

Однако приходит время, когда тележку надо остановить. Для этого её нужно затормозить. Обычные тормоза здесь не помогут. Они сгорят. И тогда в действие вступает не совсем обычный тормоз — водяной тормоз. На протяжении последнего километра пути между рельсами располагают жёлоб с водой. Снизу к тележке прикреплён заборник воды, захватывающий воду и поворачивающий её на угол почти 180° . Такой заборник (рис. 60), врезающийся в воду с большой скоростью, энергично тормозит, не вызывая при этом большого нагрева¹, свойственного другим видам торможения.

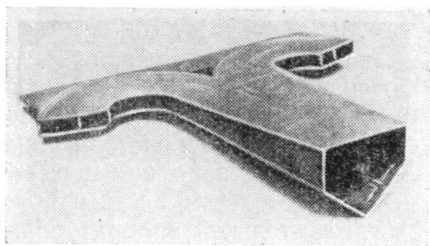


Рис. 60. Водяной тормоз.

Мощнейшие струи воды выбрасываются впереди тележки, скорость уменьшается и ракетная тележка плавно останавливается.

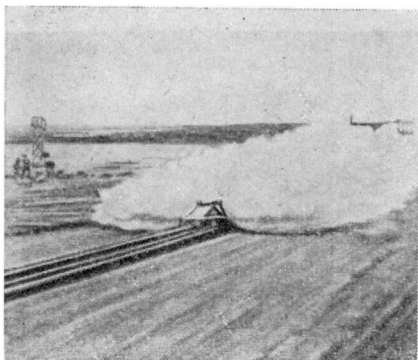


Рис. 61. Торможение ракетной тележки.

Вот она стоит перед вами тихая и спокойная. Трудно представить себе, что за несколько секунд до этого она неслась с разрушительной силой, хлопотала огнём, извергающимся из реактивного двигателя, а потом при торможении окутала всю местность водяным облаком (рис. 61).

Уместно теперь задать вопрос, а где находят применение подобные ракетные тележки? Оказывается, в аэродинамике, в авиационной медицине. С их помощью исследуются самолёты, парашюты, бомбы, перегрузки и вибрации на самолёте. Для этого испытывае-

¹ Вследствие большой теплоёмкости воды.

мый объект устанавливают на тележку и крепят к специальным аэродинамическим весам, замеряющим действующие силы.

Эксперимент, проводимый на ракетной тележке, весьма ценен, во-первых, потому, что условия, в которых он протекает, максимально приближаются к натуральным, а во-вторых, вследствие удобства измерений. По сравнению с аэродинамическими трубами у ракетной тележки — нет «стенок», мешающих эксперименту: модель свободно обдувается потоком воздуха. По сравнению с летающими аэродинамическими моделями, сбрасываемыми с самолётов, здесь удобнее и надёжнее пользоваться измерительной аппаратурой. На ракетной тележке могут испытываться самолёты в натуральную величину, что невозможно проделать в современных сверхзвуковых аэродинамических трубах, из-за их небольших размеров. С помощью ракетных тележек можно производить запуск экспериментальных ракет (рис. 62).

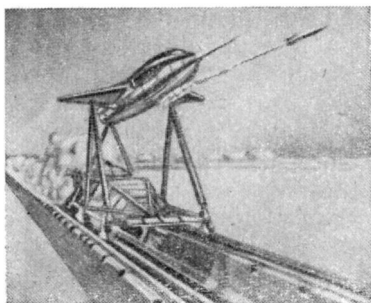


Рис. 62. Запуск ракет с установки, имитирующей самолёт.

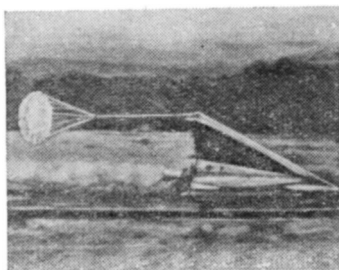


Рис. 63. Испытания парашюта при сверхзвуковой скорости.

Особенно ценные результаты приносят испытания на ракетных тележках катапультируемых кресел пилота на сверхзвуковых скоростях. Выбрасывание кресла может производиться как с манекеном, заменяющим пилота, так и с подопытными животными, в частности с обезьянами. Ракетные тележки позволяют исследовать поведение парашютных систем на сверхзвуковых скоростях (рис. 63).

Надёжное проведение эксперимента по катапультированию кресла пилота и изучение сверхзвуковых пара-

шютов в аэродинамических трубах сопряжено с неимоверными трудностями, связанными в первую очередь с маленькими масштабами трубных моделей. Крохотные аэродинамические модели кресла пилота и парашюта не могут достоверно повторить всё своеобразие подлинных образцов.

Постановка и изучение подобных экспериментов жизненно важно для сверхзвуковой авиации. От результатов этих экспериментов зависит сохранение жизни от важных лётчиков.

Известно, что с увеличением скорости полёта всё сложнее становится проблема спасения экипажа гибнущего самолёта. С какими трудностями здесь приходится встречаться лётчику, видно на примере испытания одного американского сверхзвукового самолёта. Испытания на этом самолёте проводил лётчик-испытатель Молланд. Потеряв управляемость, самолёт Молланда вошёл в отвесное пикирование и с нарастающей скоростью мчался к земле. Лётчик решил покинуть самолёт при помощи катапультируемого кресла. Он выбросился на высоте приблизительно 7600 м, когда скорость полёта превосходила скорость звука в 1,1 раза, т. е. при скорости 1230 км/час. Перед катапультированием лётчик левой рукой подтянул на кресле шторку, предохраняющую лицо и голову от действия встречного потока воздуха, а правой рукой нажал рычаг сбрасывателя фонаря кабины. Мгновение... и лётчик был выброшен. Оглушительно ревущим потоком воздуха его правая рука была отброшена за спину и сломана о спинку кресла, были сорваны шлем, кислородная маска и перчатки. От удара потока воздуха в лицо под глазами пилота образовались синяки.

При дальнейшем падении скорость из-за сопротивления воздуха уменьшилась, и на высоте приблизительно 3500 м над креслом пилота автоматически раскрылся купол парашюта. Через несколько минут Молланд приземлился.

Приведённый пример показывает, что средства спасения пилота должны проходить предварительно всесторонние испытания, и ракетные тележки в этом отношении сыграют немаловажную роль.

Ещё большее значение приобретут ракетные тележки, когда на них смогут проверять действие аэродинамиче-

ского нагрева на кабину пилота, на парашют и на конструкцию самолёта в целом.

Для испытаний на аэродинамический нагрев потребуются ракетные тележки с большим временем действия, так как при малом времени действия конструкция самолёта не успеет достаточно прогреться.

С целью увеличения продолжительности эксперимента, казалось бы, надо увеличивать длину рельсового пути. Однако это привело бы к непомерно большим затратам на создание такой длинной железной дороги.

Поэтому техническая мысль идёт в другом направлении.

В настоящее время для подобных экспериментов проектируются замкнутые круговые рельсовые дороги, на которых максимальная скорость и продолжительность испытания ограничиваются только лишь возмож-

ностями двигательной установки ракетной тележки.

На круговой рельсовой дороге ракетные тележки не нуждаются в специальных тормозных устройствах. Они останавливаются сами за счёт сил трения и аэродинамического торможения. Естественно, что при движении по круговому рельсовому пути будет возникать большая центробежная сила, стремящаяся опрокинуть ракетную тележку на бок.

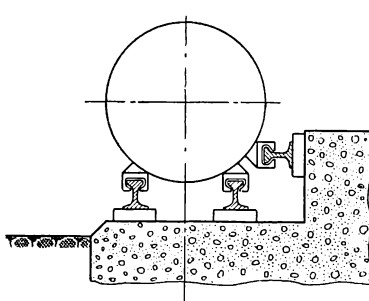


Рис. 64. Схема установки дополнительного третьего рельса при движении сверхзвуковой ракетной тележки по треку.

Для борьбы с этим мыслится применять дополнительный, третий, боковой рельс, препятствующий опрокидыванию ракетной тележки (рис. 64).

8. Ствольная и ракетная артиллерия

Раньше всех с полётом быстрее звука, а следовательно, и с резким скачкообразным увеличением сопротивления воздуха встретились в артиллерийской технике. Ещё в XIX в. артиллерийские снаряды достигли

скорости полёта, равной скорости распространения звука, а в настоящее время летают со скоростью полёта, превышающей 1100 м/сек.

Исследования и фотографии полёта пуль и снарядов (рис. 65) показали, что при сверхзвуковом обтекании впереди пули образуется головная волна уплотнения воздуха, видимая на фотографии в виде узкой, косой и тёмной полоски. На поверхности головной волны возникает нам уже знакомый скачок уплотнения, в котором давление, плотность и температура воздуха скачком повышаются, а скорость скачком понижается. Выйдя из скачка уплотнения, поток воздуха начнёт разгоняться.

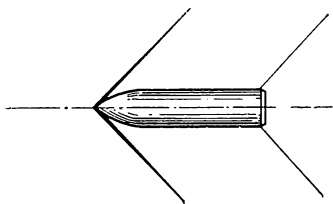


Рис. 65. Обтекание снаряда.

За хвостовой частью пули возникает хвостовой скачок уплотнения воздуха, меньший по силе в сравнении с головным. За донной частью пули или снаряда образуется область вакуума различной интенсивности, куда срывается бесчисленное количество воздушных вихрей, вследствие чего за телом образуется длинный вихревой след. Для уменьшения интенсивности скачков уплотнения, а следовательно, для уменьшения сопротивления воздуха головной части придают заострённую форму. Заострение головной части и удлинение цилиндрической части снаряда благотворно влияют на увеличение дальности полёта.

Дальность полёта снаряда сильно зависит от его начальной скорости. В ствольной артиллерии снаряду сообщается начальная скорость с помощью колоссальных давлений (3000 ÷ 4000 ат), развивающихся в стволе орудия. Дальнейшее повышение давления в стволе орудия крайне затруднено, так как вызывает значительное повышение температуры при взрыве заряда. Всё это в свою очередь вызывает необходимость увеличения массивности ствола, вес орудия становится непомерно большим, кроме того, при большом давлении и температуре нарезки в стволе орудия быстро изнашиваются. Эти соображения ограничивают дальнейшее развитие ствольной артиллерии.

Дальность полёта снаряда сильно зависит от его начальной скорости.

В ствольной артиллерии снаряду сообщается начальная скорость с помощью колоссальных давлений (3000 ÷ 4000 ат), развивающихся в стволе орудия.

Дальнейшее повышение давления в стволе орудия крайне затруднено, так как вызывает значительное повышение температуры при взрыве заряда. Всё это в свою очередь вызывает необходимость увеличения массивности ствола, вес орудия становится непомерно большим, кроме того, при большом давлении и температуре нарезки в стволе орудия быстро изнашиваются. Эти соображения ограничивают дальнейшее развитие ствольной артиллерии.

Значительно ранее ствольной артиллерии зародилась ракетная артиллерия (Китай, Индия), но её развитие шло крайне медленно. Лишь в XIX в. ракетная артиллерия вновь приобрела интерес и в настоящее время развилась в реактивную технику. И здесь честь многих открытий и усовершенствований принадлежит русским учёным и изобретателям. Ещё при Петре I в России было учреждено ракетное заведение, где изготавливались стандартные сигнальные и осветительные ракеты для русской армии. В первых годах XIX в. генерал Александр Дмитриевич Засядко создал русскую боевую ракету, которая была поставлена на вооружение армии и успешно применялась в боевых условиях. В середине XIX в. русский учёный — артиллерист генерал Константин Иванович Константинов значительно усовершенствовал русскую ракету, превзошедшую зарубежные как по лёгкости, подвижности, кучности поражения, так и по безопасности в обращении.

В 1881 г. русский изобретатель революционер-народоволец Николай Иванович Кибальчич, казнённый за покушение на Александра II, впервые в мире обосновал и составил смелый проект реактивного летательного аппарата для подъёма человека в воздух.

Начиная с 1898 г. появляются замечательные работы по реактивной технике смелого русского учёного и изобретателя Константина Эдуардовича Циолковского. Впервые в мире им сделан расчёт реактивного двигателя и создан проект первой жидкостной ракеты, где порох заменён жидким горючим и окислителем.

В 1903 г. Циолковский разработал теорию полёта ракеты и научно обосновал применение ракет для межпланетных сообщений. К. Э. Циолковский первый предложил клинообразный аэродинамический профиль и придание стреловидности крыльям для сверхзвуковых полётов. Им впервые предложено использование ракет для метеорологических целей.

Ученик К. Э. Циолковского, советский учёный и конструктор М. К. Тихонравов в 1934 г. создал успешно летавшую метеорологическую ракету с жидкостным реактивным двигателем.

В период Великой Отечественной войны появилась первоклассная советская ракетная установка «Катюша»,

наводившая страх и панику на немецко-фашистских захватчиков.

Ракета (рис. 66) состоит из заострённого, вытянутого, цилиндрического корпуса, имеющего тонкую оболочку. В корпусе ракеты размещаются: реактивный двигатель,

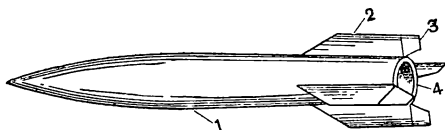


Рис. 66. Основные части ракеты:

1 — корпус; 2 — стабилизатор; 3 — воздушный руль;
4 — реактивный двигатель

горючее и полезный груз. В конце корпуса для стабилизации полёта размещается хвостовое оперение. Иногда ракетам добавляют крылья, и тогда они называются крылатыми ракетами. Из-за наличия крыльев дальность полёта у них больше, чем у бескрылых ракет. Крылья позволяют удлинить полёт в разреженных и плотных слоях атмосферы.

Кроме того, крылья позволяют ракете лучше маневрировать в воздухе. Эти манёвры нужны, например, зенитным управляемым ракетам для преследования самолёта противника. Идея крылатой ракеты впервые предложена талантливым советским инженером Ф. А. Цандером. Крылатая ракета имеет много общего с самолётом.

Чем же отличается бескрылая ракета от самолёта? В основном — способом образования подъёмной силы.

Летающие аппараты тяжелее воздуха могут совершать полёты в воздухе, используя два динамических способа образования подъёмной силы — аэродинамический и реактивный.

Аэродинамический способ, как мы знаем, заключается в отбрасывании крылом массы воздуха вниз, а реактивный способ — в отбрасывании массы газов из камеры сгорания реактивного двигателя. Как следует из второго закона Ньютона, величина реактивной силы будет тем больше, чем больше отбрасываемая за секунду масса газов и чем больше скорость этих газов.

Аэродинамический способ образования подъёмной силы используют при своём полёте самолёты, вертолёты, планёры, птицы, насекомые и некоторые животные.

Бескрылая ракета использует для своего подъёма реактивный способ образования подъёмной силы. Установленный на ней реактивный двигатель развивает тягу, которая преодолевает силу тяжести ракеты.

Понятно, что в безвоздушном пространстве, куда залетают ракеты, аэродинамический способ образования подъёмной силы отпадает. Остаётся для использования только реактивный способ. Он-то впервые и был предложен К. Э. Циолковским для передвижения в межпланетном пространстве.

Сердце ракеты — это её реактивный двигатель.

Во всяком реактивном двигателе есть камера сгорания и сопловая часть. В камере сгорания происходит соединение горючего с окислителем. В результате сгорания образуется большое количество сильно нагретых газов (температура больше 2000°C), и давление в камере повышается. Из камеры газы устремляются в сопловую часть двигателя, где они расширяются и с большей скоростью (около 2500 м/сек) вылетают наружу. Сопловая часть имеет форму, предложенную инженером Лавалем.

Реактивная сила вытекающей струи газов приложена к стенкам камеры и толкает двигатель в направлении, обратном направлению вытекающих газов.

В камере реактивного двигателя может сгорать порох, тогда двигатель называют **п о р о х о в ы м**.

В камеру сгорания может подаваться жидкое горючее — спирт, керосин и жидкий окислитель — азотная кислота, жидкий кислород, и тогда двигатель называют **ж и д к о с т н ы м р е а к т и в н ы м д в и г а т е л е м**, сокращённо — **ЖРД**.

И наконец, в камеру сгорания может подаваться керосин и воздух, и тогда двигатель называют **в о з д у ш н о - р е а к т и в н ы м д в и г а т е л е м**, сокращённо — **ВРД**. Воздушно-реактивный двигатель всегда характерен наличием большого заборника воздуха. Это уже не та маленькая трубка, по которой течёт жидкий окислитель, а большой канал, имеющий в поперечном сечении площадь 1 м^2 и более.

Воздушно-реактивный двигатель применяется на самолётах. На ракетах же чаще употребляются пороховые и жидкостные реактивные двигатели. Эти двигатели страшно «прожорливы». Жидкостно-реактивный двигатель на ракете «Фау-2» за одну минуту проглатывает 9 т спирта и жидкого кислорода, но зато за эту минуту уносит ракету на высоту 40 км.

Ракете, летающей только в безвоздушном пространстве, можно было бы придать любую геометрическую форму — шар, куб, эллипсоид и т. д. Но так как начало и конец полёта, например у ракеты «Фау-2», протекает в плотных слоях атмосферы, а средняя часть полёта — в разреженных, то ей придают современную аэродинамическую форму, имеющую много общего с формой удлинённой пули или остро отточенного круглого карандаша.

Известный романист Жюль Верн в своём научно-фантастическом романе «Путешествие на луну» не считался с аэродинамическим сопротивлением воздуха и придал своему аппарату недостаточно заострённую и удлинённую форму. И если бы такой аппарат был построен, то он много бы затрачивал энергии на преодоление сопротивления воздуха.

Дальняя ракета «Фау-2» весом около 13 т имеет длину около 14 м, состоит из сигарообразного корпуса — фюзеляжа диаметром 1,7 м и хвостового горизонтального и вертикального оперения. На стреловидных стабилизаторах расположены воздушные рули. В воздушном пространстве её полёт, так же как и полёт самолёта, стабилизируется и управляется воздушными рулями.

Но как управлять ракетой в безвоздушном пространстве? Ведь там, как ни отклоняй воздушный руль, аэродинамической силы не возникнет. На помощь опять приходит силовое взаимодействие тела с газом. К. Э. Циолковским в 1903 г. изобретены так называемые газ о в ы е ру л и, которые повсеместно стали применяться и в современной зарубежной реактивной технике.

Газовый руль имеет форму, близкую к воздушному рулю, но ставится он не в воздушный поток, а в поток раскалённого газа, выходящего из сопла реактивного двигателя (рис. 67). Отклоняясь в ту или иную сторону, т. е. изменяя свой угол атаки (угол встречи руля с газовым потоком), газовый руль будет испытывать несимметричное обтекание. А мы уже знаем, что при несиммет-

ричном обтекании возникает аэродинамическая сила, направленная под углом к направлению движения. Эта сила, будучи приложена на некотором плече относительно центра тяжести ракеты, создаёт тот момент, который окажет поворачивающее действие на корпус ракеты в полёте. Газовыми рулями можно управлять по тангажу,

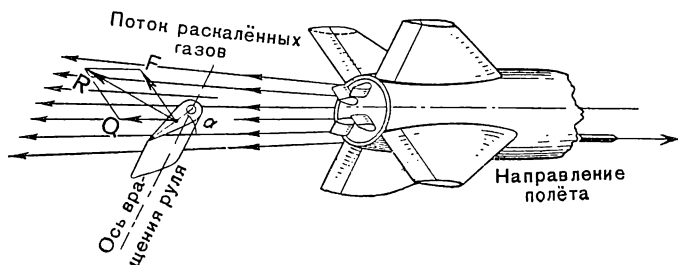


Рис. 67. Работа газовых рулей.

крену и курсу. Понятно, что газовый руль, работая в раскалённой газовой среде с температурой около 2000°C , должен быть выполнен из жароупорного материала, например из графита. Газовый руль также нужен для стабилизации ракеты при старте, когда из-за маленькой скорости полёта воздушные рули ещё не эффективны.

Ракета «Фау-2» стартует вертикально и некоторое время летит в том же положении. В этом случае она быстрее может выйти из плотных слоёв атмосферы, где аэродинамическое сопротивление её полёту весьма велико. В отличие от вылета снаряда из ствола орудия ($700 \div 900 \text{ м/сек}$) ракета в первые секунды старта взлетает с небольшой скоростью ($3 \div 4 \text{ м/сек}$). Её начальный полёт можно видеть простым глазом. На пусковом столе ракета вздрагивает, потом медленно, как бы нехотя отрывается от стола, а затем всё быстрее и быстрее уходит вверх и исчезает из глаз наблюдателя.

На высоте около 30 км приборы управления переводят полёт на наклонный подъём. К концу работы двигателя на высоте около 40 км ракета развивает максимальную скорость около 5500 км/час или около $1,5 \text{ км/сек}$, двигатель кончает свою работу, и ракета летит по инерции, как брошенный камень. Далее километров 200 полёт происходит на высоте примерно 100 км со скоростью

около 5000 км/час. В конце полёта под действием силы тяжести ракета возвращается в плотные слои атмосферы и падает на землю со скоростью около 3000 км/час. Дальность полёта ракеты около 300 км.

Из рассмотрения схемы полёта (рис. 68) видно, что ракета «Фау-2» будет иметь при входе в нижние плотные слои атмосферы скорость, почти в три раза превышающую скорость звука. При такой скорости входа

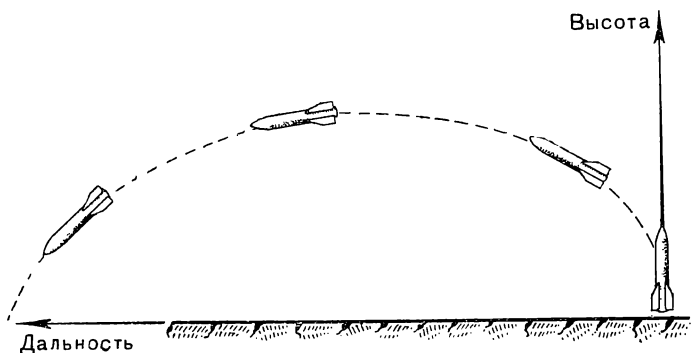


Рис. 68. Траектория полёта ракеты «ФАУ-2».

в плотные слои атмосферы возникают мощные скачки уплотнения воздуха, ведущие к большим силам сопротивления воздуха, к резкому возрастанию аэродинамических нагрузок на корпус ракеты и, самое главное и опасное, к большим температурам нагрева тонкой оболочки корпуса. У головной части образуется сильное сжатие воздуха, сопровождающееся повышением температуры. Эта температура ещё более увеличивается вследствие трения ракеты об уплотнённый воздух.

Ракета «Фау-2» нагревалась настолько сильно, что, по наблюдениям жителей Лондона, ночью светилась тёмно-красным светом.

Современное состояние аэродинамики и реактивных двигателей позволяет принципиально думать об огромных скоростях полёта ракет.

При полёте в безвоздушном пространстве такие скорости не вызовут осложнений, но при проходе ракеты через атмосферу нагрев будет настолько сильным, что в конструкции ракеты потребуется применение жароупор-

ных материалов и охлаждение поверхности ракеты теми или иными способами.

Естественно, что применение установки оборудования для охлаждения вызовет увеличение веса конструкции ракеты, а это крайне нежелательно по следующим соображениям.

К. Э. Циолковский вывел формулу, по которой скорость полёта в свободном пространстве (пространство, где нет сопротивления воздуха и на ракету не действуют силы тяготения) зависит только от скорости истечения газов из двигателя и отношения веса ракеты в конце работы двигателя (конечная масса ракеты) к её стартовому весу (начальная масса). Скорость, по Циолковскому,

$$v_{ц.} = -v_{истечен.} \cdot 2,3 \lg \frac{M_{кон.}}{M_{нач.}},$$

где: $v_{истечен.}$ — скорость истечения газов из двигателя ракеты,

$M_{нач.}$ — начальная масса ракеты,

$M_{кон.}$ — конечная масса ракеты.

Из формулы К. Э. Циолковского следует, что увеличение конечного веса вызывает уменьшение скорости полёта ракеты.

Отсюда понятно стремление конструкторов к уменьшению отношения конечного веса к начальному весу ракеты.

Для ракеты «Фау-2» это отношение было равно:

$$\frac{4T}{13T} \cong 0,3.$$

При уменьшении этого отношения скорость ракеты в свободном пространстве будет безгранично возрастать.

С целью уменьшения отношения конечной массы к начальной массе ракеты весьма целесообразно использование составных ракет или ракетных поездов. В таком поезде двигатели каждой ракеты работают поочерёдно и часть опустошённых от топлива ракет автоматически отделяется и, таким образом, не является бесполезным инертным грузом, препятствующим интенсивному наращиванию скорости.

Последняя ракета такого поезда может развить огромную скорость.

По принципу составной ракеты была запущена первая в мире советская дальняя межконтинентальная ракета.

Первому в мире советскому искусственному спутнику Земли космическая скорость тоже была сообщена при помощи составной многоступенчатой ракеты.

Последняя ракета-носитель сообщила шарообразному искусственному спутнику Земли скорость около 8 км/сек на высоте около 900 км . Как известно из аэродинамики шар является плохо обтекаемой формой тела, однако на этой высоте, из-за малой плотности воздуха, аэродинамическое сопротивление столь незначительно, что позволило выполнить спутник в виде шара с диаметром 58 см .

9. Ветряные двигатели

Сколько бесполезно растрачивается энергии в природе!

Возьмите энергию морских приливов и отливов или волнений, когда громады воды, вздымаясь на большую высоту и обрушиваясь, бесполезно растрачивают свою энергию, шлифуя прибрежную гальку, или разрушают скалы и портовые сооружения. Или энергия ветра. Сколько её в атмосфере!

Люди упорно стремятся использовать дешёвую энергию, особенно для мирных целей, и часто это удаётся.

Энергия рек путём установки плотин приводит в действие турбогенераторы, вырабатывающие дешёвую электроэнергию.

Другим примером использования дешёвой энергии является использование энергии ветра с помощью ветродвигателей. Ветер обладает большим количеством энергии. Сильный ветер гнёт деревья, иногда срывает крыши с домов, а ураган сбрасывает железнодорожные вагоны и, вырывая деревья, бросает их на далёкие расстояния.

Энергия ветра улавливается ветроколесом (рис. 69). Ветроколёса бывают многолопастными и малолопастными.

Но не вся энергия ветра, проходящая через поверхность, ометаемую ветроколесом, может превратиться ветродвигателем в механическую работу. Аэродинамики теоретически доказали, что только около 60% этой энергии можно перевести в механическую работу. А практи-

чески современные ветродвигатели превращают в механическую работу только $25 \div 30\%$ энергии ветра.

Теория и экспериментальные исследования ветродвигателей базируются на аэродинамике.

Рассмотрим, как создаются аэродинамические силы, заставляющие ветроколесо вращаться и производить полезную работу.

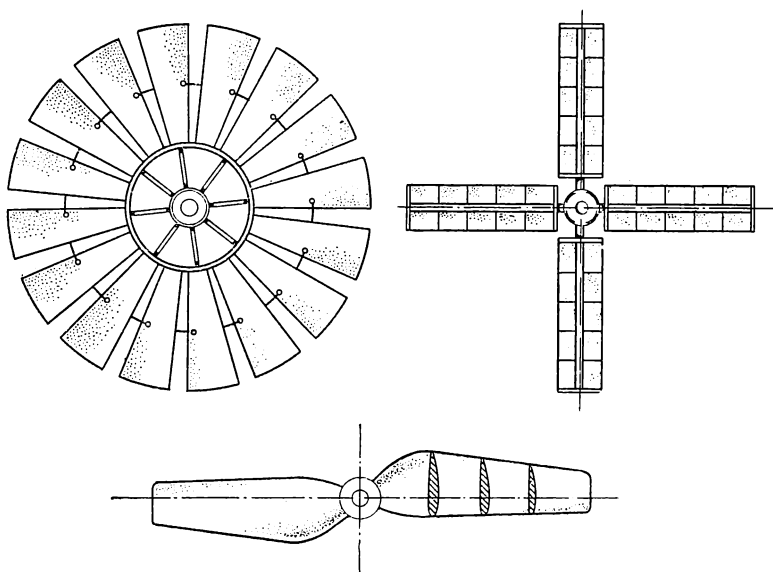


Рис. 69. Форма ветродвигателей.

У ветродвигателя на горизонтальном валу закреплены лопасти. Лопасти образуют с плоскостью вращения угол, называемый углом установки. В поперечном сечении лопасть современного ветродвигателя имеет вид профиля крыла самолёта. Набегающий на лопасть воздушный поток атакует лопасть под некоторым углом атаки α . В результате обтекания на лопасти (рис. 70) возникает сила полного аэродинамического сопротивления R . Силу R раскладывают по правилу параллелограмма на силы P_x и P_y . Сила P_x производит давление в направлении ветра и называется лобовым давлением. Она создаёт вредное трение в подшипниках ветродвигателя. Сила P_y

действует в плоскости вращения ветроколеса и создаёт полезный крутящий момент.

Угол атаки лопасти ветродвигателя есть угол между хордой лопасти и направлением суммарной скорости потока. На лопасть набегают как бы два потока — первый поток есть сам ветер, направленный перпендикулярно к плоскости вращения ветроколеса. Второй поток

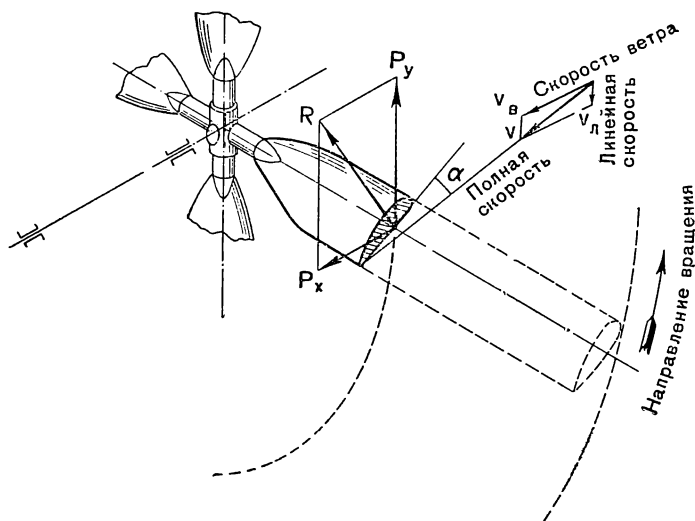


Рис. 70. Аэродинамические силы, действующие на лопасть ветродвигателя.

возникает от того, что ветроколесо вращается, он действует в плоскости вращения лопасти. Скорости потоков можно обозначить так же, как и силы, — через векторы. Если эти две скорости сложить, то получим направление и величину суммарной скорости набегающего воздуха. Заметим, что если ветроколесо не вращается, то на лопасть будет набегать только один поток — ветер, направленный перпендикулярно к плоскости вращения колеса.

На основе теории воздушного винта, созданной проф. Н. Е. Жуковским, его ученик В. П. Ветчинкин в 1914 г. впервые разработал теорию ветряка. В 1920 г. проф. Н. Е. Жуковский изложил теорию ветродвигателя в труде «Ветряная мельница Н. Е. Ж.» (Николай Егорович Жуковский).

Работами советских учёных В. П. Ветчинкина и Г. Х. Сабинина ветродвигательная техника намного продвинулась вперёд. Большую роль в её развитии сыграл ЦАГИ, разработавший целый ряд ветродвигателей.

Иногда ветродвигатели устанавливаются на самолётах и планёрах для вращения электрогенератора.

Ветродвигатели имеют большое народнохозяйственное значение, особенно в механизации трудоёмких работ сельского хозяйства. Различают ветронасосные установки, ветряные мельницы и др.

Наряду с малыми ветродвигателями, как, например, «ТВ-8», у которого диаметр ветроколеса 8 м и мощность 6,2 л. с., при среднем ветре 8 м/сек, бывают более мощные ветродвигатели. Среди них примечательна советская ветроэлектростанция, построенная у Балаклавы в Крыму. Эта станция не имела себе равных во всём мире. В 1942 г. станция была разрушена немецко-фашистскими захватчиками. Размер её трёхлопастного ветроколеса достигал в диаметре 30 м. Ветродвигатель при 30 оборотах в минуту давал мощность, равную 135 л. с.

В настоящее время встречаются ветродвигатели с диаметром ветроколеса более 50 м и мощностью свыше 1000 л. с.

10. Аэродинамика автомобиля

При малой скорости движения автомобиля, порядка 30 км/час, об аэродинамическом сопротивлении кузова автомобиля не приходится много говорить — оно слишком мало. Но при увеличении скорости движения автомобиля, например с 30 км/час до 90 км/час, т. е. втрое, сила аэродинамического сопротивления (лобовое сопротивление), как мы знаем из формулы

$$Q = C_x S \frac{\rho v^2}{2},$$

возрастает в 9 раз. И тогда с сопротивлением воздуха нужно считаться и придавать автомобилю такую форму, которая обеспечивала бы автомобилю минимальное сопротивление при движении. Это особенно важно для гоночных автомобилей (рис. 71).

На магистральных дорогах легковой автомобиль может мчаться со скоростью около $100 \div 140$ км/час. Эта

скорость равна скорости ураганного ветра, который валит железнодорожные вагоны, вековые деревья, срывает крыши с домов, производит опустошения. Автомобиль преодолевает это воздействие воздуха, если его форма обтекаема.

Лучшие современные советские легковые автомобили могут развивать скорости: «Москвич» — 90 км/час при мощности двигателя 23 л. с., «Победа» — 110 км/час при мощности двигателя 50 л. с., комфортабельный

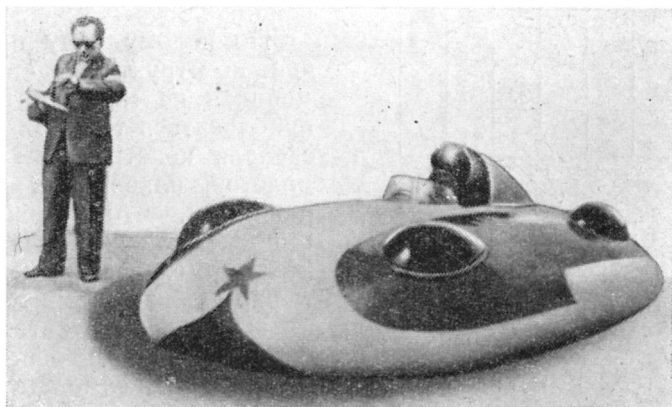


Рис. 71. Аэродинамические формы гоночного автомобиля «Звезда».

«ЗИЛ-110» — 140 км/час при мощности двигателя 140 л. с. Отдельные гоночные автомобили развивают скорость свыше 500—600 км/час.

Автомобиль при движении по горизонтальной дороге испытывает двоякое сопротивление: во-первых, сопротивление, обусловленное трением качения колёс по дороге, и, во-вторых, сопротивление воздуха.

На рисунке 72 показана диаграмма примерного расхода мощности на преодоление сопротивления воздуха и на преодоление сопротивления, обусловленного трением качения колёс при движении автомобиля с кузовом достаточно обтекаемой формы.

Из диаграммы видно, что на скорости движения автомобиля, равной 40 км/час, 80% мощности затрачивается на преодоление сопротивления качения колёс и

20% на преодоление сопротивления воздуха. На высоких скоростях движения на преодоление сопротивления воздуха расходуется около половины мощности двигателя.

Наилучшей обтекаемой формой обладает веретенообразное тело или тело в форме вытянутой капли, имеющее наибольшее поперечное сечение, расположенное на расстоянии $\frac{1}{3}$ длины тела от переднего конца.

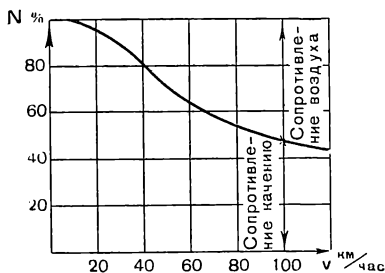


Рис. 72. График, показывающий расход мощности двигателя автомобиля на преодоление силы трения и аэродинамического сопротивления в зависимости от скорости движения.

Результатом является то, что автомобиль в отличие от самолёта и дирижабля движется не в свободном воздушном пространстве, а по дороге. В силу этого, при выборе форм автомобиля учитывают аэродинамическое влияние, связанное с близостью кузова автомобиля к дороге.

У гоночных автомобилей приходится считаться с вредным действием подъёмной силы кузова. Подъёмная сила возникает при действии скоростного напора на наклонённый кузов. Этот наклон появляется при подпрыгивании автомобиля на неровностях дороги. Подъёмная сила уменьшает так называемый сцепной вес автомобиля, благодаря чему уменьшается давление колеса на дорогу, а с ним и движущая сила, приложенная к покрышкам баллона. Для уменьшения подъёмной силы кузова гоночного автомобиля ему придают наклон вперёд.

Отдельным частям легковых автомобилей по соображениям удобства обзора, компоновки или в угоду приятному зрительному впечатлению придают необтекаемый вид. Так переднее ветровое стекло часто

делается плоским, задняя часть кузова автомобиля выполняется с уступом. Введение заднего уступа объясняется тем, что плавно спускающаяся до заднего буфера обтекаемая крыша, как например у автомобиля «Победа», из-за большого объёма создаёт зрительное впечатление утяжелённой задней части кузова. Чтобы этого не получалось, заднюю часть кузова выполняют с уступом, т. е. с выступающим багажником (рис. 73), как например у автомобилей «Волга», «ЗИЛ-110» и др.

В целом же для снижения лобового сопротивления современному легковому автомобилю стремятся придать плавные обтекаемые формы: покатый капот, сильно наклонённое ветровое окно, фары, утопленные в корпусе кузова, запасное колесо спрятано в багажник, крылья на колёсах объединены с корпусом кузова («Победа») колёса сбоку прикрываются щитками, гладкое днище кузова и т. д.

Благодаря применению этих мероприятий коэффициент лобового сопротивления в новейших отечественных автомобилях уменьшен в 2—2,5 раза по сравнению с автомобилями прошлых лет.

В грузовых автомобилях большое сопротивление воздуха возникает из-за угловатой и сверху открытой платформы. Обтекаемость фургонов и автобусов значительно лучше, чем грузовых автомобилей.

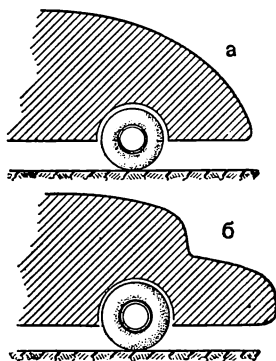


Рис. 73. Задняя часть кузова автомобилей:
а — «Победа»; б — «ЗИЛ-110».

ЧАСТЬ
Ш
АЭРОДИНАМИКА
В ПРИРОДЕ



Мы привыкли отмечать аэродинамику в технике и часто не замечаем аэродинамических явлений в природе, а они встречаются в ней на каждом шагу. Попробуйте при прогулке в лесу или в поле понаблюдать природу: вот повисла в воздухе и скользнула в сторону стрекоза, с куста вспорхнула птичка и скрылась в чаще леса, высоко в небе, почти не взмахивая крыльями, парит ястреб. А вот подул ветерок, закружились и, поднявшись высоко в воздух, отправились в дальнейшее путешествие пушинки тополя и парашютики одуванчика.

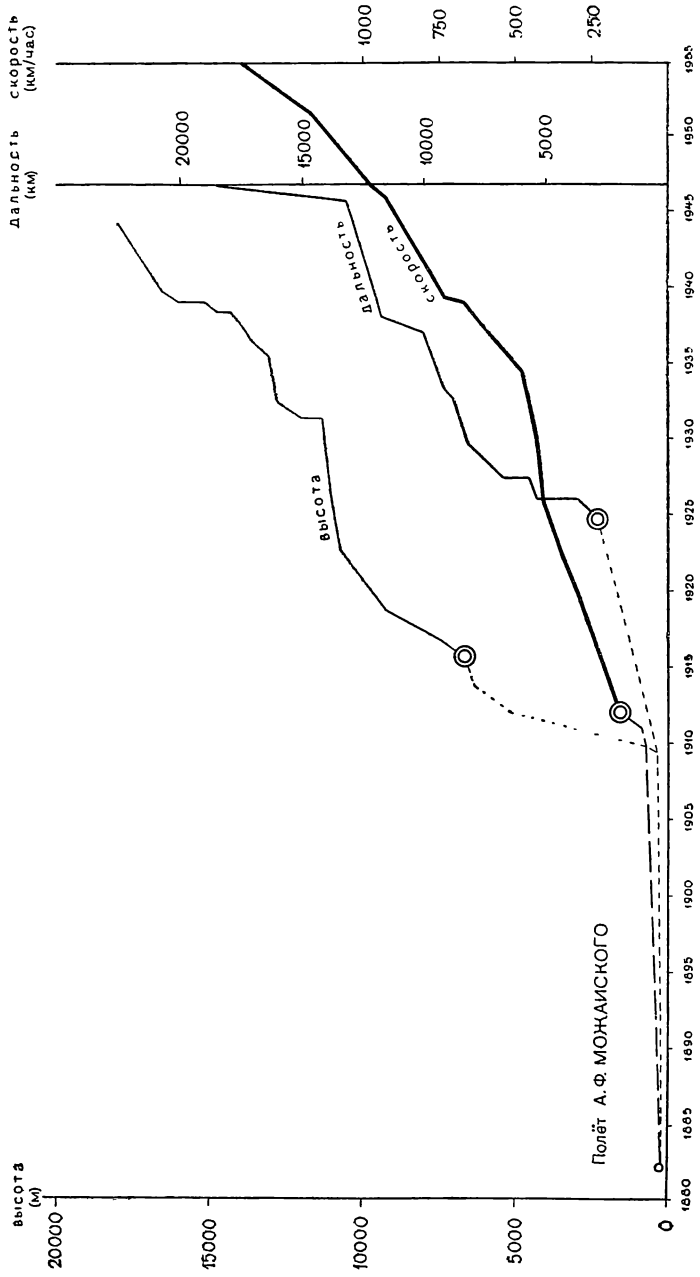
Все эти полёты в природе подчиняются законам аэродинамики. Ознакомимся с наиболее характерными примерами использования аэродинамики в природе.

1. Полёт птиц

С давних пор человека привлекал полёт птиц.

Пытливый ум человека добился того, что человек с 1916 г. летает выше птиц — орла, грифа, кондора, залетающих иногда на высоту 6000—7000 м; что человек с 1912 г. стал летать быстрее птиц, в частности стрижа, летающего со скоростью 144 км/час. И, наконец, с 1924 г. человек летает без посадки дальше птиц, в частности дальше перелётных птиц ржанок, при благоприятных условиях пролетающих без посадки 3000÷3500 км (рис. 74).

Птицы в воздухе выполняют всевозможные фигурные полёты. Они могут совершать вираж, глубокий разворот, «мёртвую петлю», обратную «мёртвую петлю»



Полёт А. Ф. МОЖАЙСКОГО

Рис. 74. Максимальные скорости, высоты и дальности, достигнутые на рекордных самолётах по годам. Пунктиром указаны рекорды самолётов, не превзошедшие лучших показателей у птиц, достигнутых при благоприятных условиях.

и т. д. Человечество отняло у птиц и эту монополию. Начало этому было положено в 1913 г. выдающимся русским лётчиком, штабс-капитаном П. Н. Нестеровым, впервые совершившим вираж, глубокий разворот и «мёртвую петлю», по случаю которой петербургская газета от 28 августа 1913 г. сообщала: «Полёт русского лётчика вниз головой» (по телеграфу).

«Киев. Сегодня в 6 часов вечера военный лётчик второй авиационной роты поручик Нестеров в присутствии офицеров-лётчиков, врача и посторонней публики сделал на Ньюпоре на высоте 600 м «мёртвую петлю», т. е. описал полный круг в вертикальной плоскости, после чего спланировал к ангарам».

Если учесть несовершенство и примитивность тогдашней авиационной техники и отсутствие парашюта, то можно понять всю смелость дерзновенного полёта русского лётчика.

До настоящего времени человек не превзошёл птиц по экономичности полёта. Так, например, у самого наилучшего современного самолёта на одну лошадиную силу двигателя приходится около 14 кг полётного веса, а у птицы кондора, который может поднять на воздух целую овцу, на одну лошадиную силу приходится около 80 кг полётного веса.

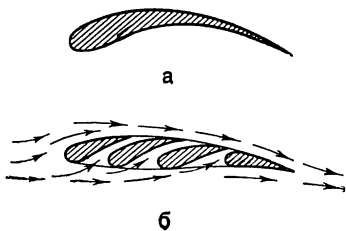


Рис. 75

а — птичий профиль, б — щелевой профиль крыла.

Изучению полёта птиц посвятили много работ Н. Е. Жуковский, В. П. Ветчинкин, М. К. Тихонравов и др.

Рассмотрим, как летают птицы. Предварительно кратко ознакомимся с устройством крыла птицы. Крыло птицы покрыто маховыми и кроющими перьями, образующими лёгкую и гибкую аэродинамическую поверхность. Если крыло птицы рассесть поперёк размаха, то мы увидим характерный аэродинамический профиль, как говорят, — птичий профиль (рис. 75, а). Этим профилем часто пользовались строители первых самолётов. Профиль крыла птицы весьма гибок и в зависимости от условий полёта может принимать различный вид, сильно меняя свою вогну-

тую и кроющими перьями, образующими лёгкую и гибкую аэродинамическую поверхность. Если крыло птицы рассесть поперёк размаха, то мы увидим характерный аэродинамический профиль, как говорят, — птичий профиль (рис. 75, а). Этим профилем часто пользовались строители первых самолётов. Профиль крыла птицы весьма гибок и в зависимости от условий полёта может принимать различный вид, сильно меняя свою вогну-

тость. Сплошное крыло птицы может стать многоцелевым, обладающим большим коэффициентом подъёмной силы.

Щелевое крыло, применяемое на некоторых самолётах (рис. 75, б), позаимствовано человеком у птиц.

Для полёта любого аппарата нужна подъёмная сила и сила тяги. Они также нужны и для полёта птицы. Как известно, у самолёта эти силы создаются отдельно — подъёмная сила крыльями, а тяга — винтовым или реактивным двигателем. У птицы же подъёмная сила и сила тяги создаются совместно в одном месте и одним органом — машущими крыльями. Для создания указанных сил птица взмахивает крыльями и одновременно поворачивает их вокруг оси, проходящей параллельно размаху крыла. Этот поворот (наклон) птице нужен для придания различных углов атаки крыльям, т. е. для различных встреч профиля крыла с воздухом. Полный взмах крыла делится на взмах вверх и взмах вниз. Весьма распространено ошибочное мнение, что только при взмахе вниз крылья совершают полезную работу, взмах же вверх бесполезен. Ниже мы увидим, что взмах вверх тоже является полезным. Разновидностей способов махания крыльями много; разберём один из них.

Перед нами летит птица (рис. 76, а) в установившемся горизонтальном полёте. Опытами и наблюдениями установлено, что в этом случае направление махания близко к вертикальному. Поэтому истинное движение крыла относительно воздуха должно рассматриваться как равнодействующая, полученная от сложения двух направлений движений — движения крыла в вертикальной плоскости и поступательного движения крыла вместе с корпусом птицы в горизонтальной плоскости, равного скорости полёта птицы.

При опускании (взмахе вниз) (рис. 76, в) равнодействующую скорость движения крыла получим, сложив по правилу параллелограмма вертикальную скорость крыла v_y , направленную вниз, с горизонтальной скоростью v_x , равной скорости полёта птицы. Получим истинное направление скорости и её величину:

$$v = \sqrt{v_y^2 + v_x^2}.$$

Исследования махания крыльями, произведённые известным советским учёным М. К. Тихонравовым,

показывают, что если крыло при опускании будет иметь положительный угол атаки α , то относительно направления скорости в этих условиях обтекания возникнет аэродинамическая сила R , направленная вверх и вперёд. Разлагая её по правилу параллелограмма на две силы,

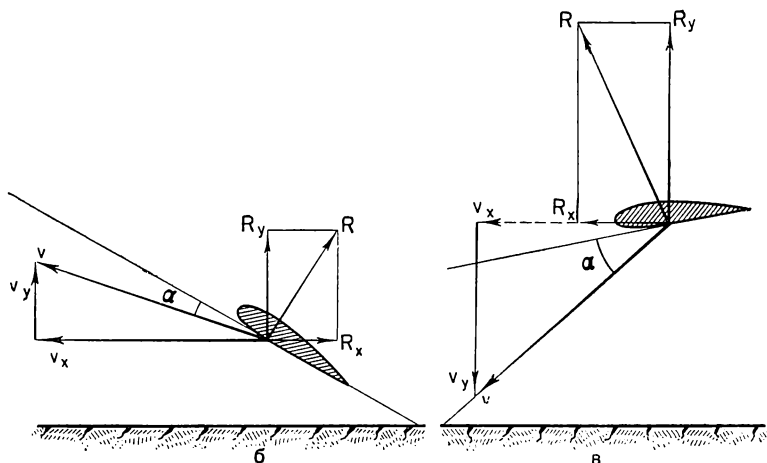
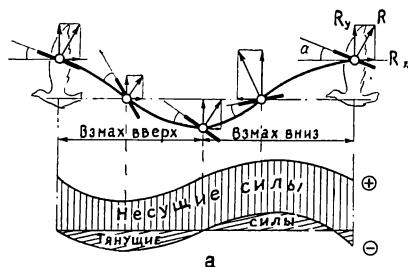


Рис. 76. Аэродинамические силы, действующие на крыло птицы.

получим вертикальную силу, противодействующую весу птицы, и горизонтальную силу, направленную вперёд, т. е. тягу, тянущую птицу вперёд. Эта сила уравновешивает лобовое сопротивление птицы.

При подъёме (при взмахе вверх) (рис. 76, б) крыло имеет вертикальную скорость v_y , направленную вверх, и одновременно горизонтальную скорость v_x . Складывая эти скорости, получим истинную скорость. Если крыло к направлению этой скорости расположено под положи-

тельным углом атаки α , то при таком обтекании возникнет аэродинамическая сила, направленная вверх и назад. Разлагая её, получим вертикальную силу, поднимающую птицу вверх, и горизонтальную силу, тянущую крыло назад — отрицательную тягу.

Из рассмотрения взмахов видно, что птица получает поддерживающую силу как при опускании, так и при подъёме крыла. Тянущую же силу птица получает при опускании крыла, но она по величине перекрывает отрицательную тягу, в результате чего птица летит вперёд. Построенные модели с машущими крыльями, производящие взмахи по разобранному выше способу, успешно летали.

Помимо машущего полёта, птица может совершать парящий полёт. Парящим полётом называется такой полёт, при котором птица может набирать или сохранять высоту, не прибегая к взмахам крыльев. Парящий полёт птицами совершается с широко распростёртыми крыльями. Парение птицами достигается за счёт использования различных восходящих потоков (рис. 77). Подчеркнём отличие парения от планирования. Как было сказано ранее, планирование — это полёт со снижением, при нём птицы, не пользуясь взмахами, с распростёртыми крыльями производят снижение.

В зависимости от того, к какому способу полёта приспособлена птица, они делятся на птиц-парителей, малопарящих птиц и птиц-непарителей, летающих исключительно за счёт взмахов крыльями. Все дневные хищники — орлы, коршуны, ястребы, соколы, кондоры, грифы — и большая часть морских птиц — альбатросы, чайки, пеликаны и др. — являются прекрасными парителями. Непарящими птицами являются: горлица, воробей, колибри.

Аэродинамические формы птиц весьма совершенны. Клюв, голова, шея плавно вытянуты по направлению полёта, ноги поджаты и почти не выступают из перьев, напоминая самолётное «убранное шасси». Переход крыла к корпусу плавен (особенно у чаек). Хвостовое оперение минимально.

Современный планёр является летающим аппаратом, во многом позаимствованным у птиц-парителей. Взгляните на птиц-парителей, высоко летящих с распластанными крыльями. Как много у них общего с планёрами —

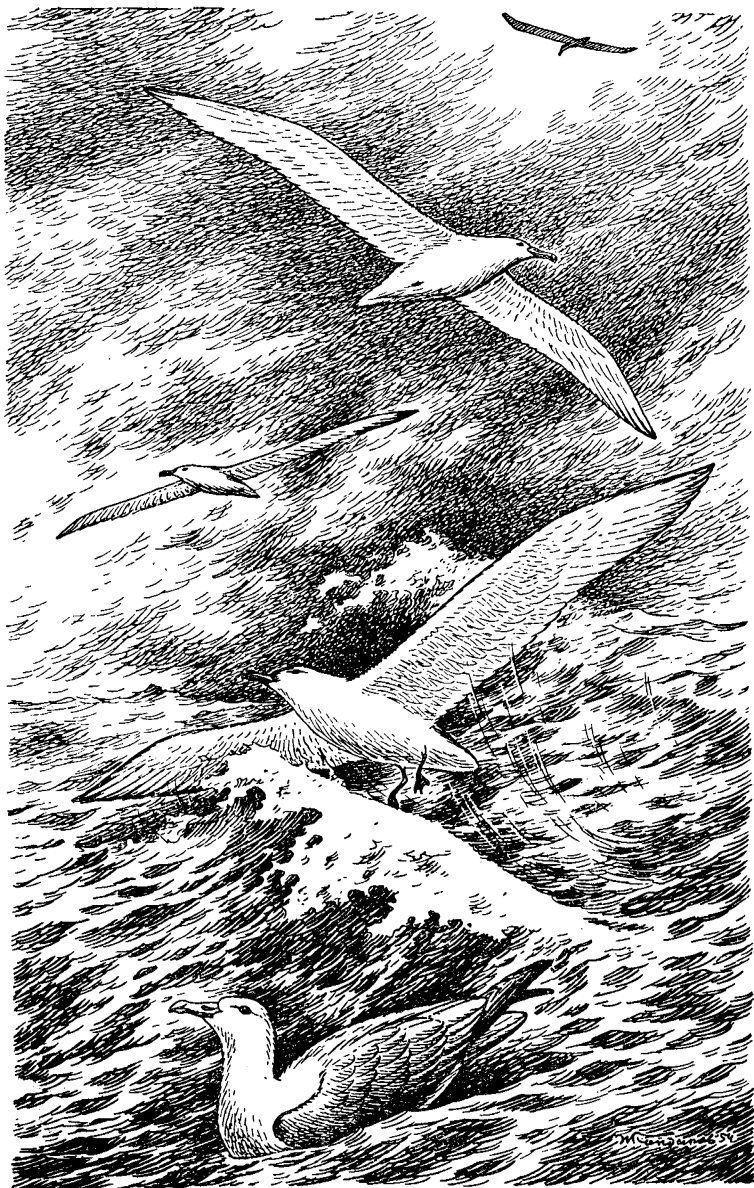


Рис. 77. Альбатросы поднимаются с волны, используя восходящие воздушные потоки.

большое удлинение крыльев, плавные линии, обтекаемый корпус.

Планёру не хватает только гибкости крыла и тех приборов, которые заменили бы человеку чутьё птицы к восходящим потокам воздуха. Особенно планёры близки к морским парителям — альбатросам, чайкам, буревестникам. Заметим, что наиболее совершенной птицей в аэродинамическом отношении является альбатрос. Он имеет самый большой среди птиц размах крыльев, достигающий 4,2 м, и наибольшее удлинение крыльев, равное $\lambda = 17,65$ (рис. 78).

Для сравнения птиц-парителей и планёров приводим таблицу 1:

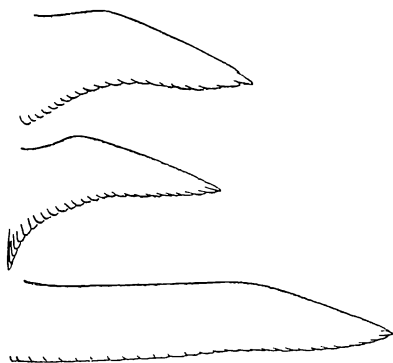


Рис. 78. Формы крыльев птиц. Вверху — крыло белого сокола, в середине — большого улита, внизу — альбатроса.

Таблица 1

Наименование птицы	λ — удлинение крыла	Удельная нагрузка на крыло кг/м^2	Минимальная скорость снижения при планировании м/сек	Наименование планера	Удлинение крыла λ	Удельная нагрузка на крыло кг/м^2	Минимальная скорость снижения при планировании м/сек
Альбатрос . . .	17,65	12,0	0,51	«Темп» «Рот-Фронт-7»	12,9	16,1	0,8
Пеликан . . .	10,86	8,8	0,42		22,3	27,4	0,62
Чайка серебристая	9,8	2,52	—	Учебный «УС—6»	10,5	18,4	1,2
Гриф	9,8	7,66					
Беркут	8,46	7,37					

Данные таблицы показывают близость таких величин, как удлинение крыльев, удельные нагрузки на единицу поверхности крыла, вертикальные скорости снижения при планировании в спокойном воздухе у птиц-пари-

телей и у планёров. Особенно сильно влияет на аэродинамические качества удлинение крыльев. У альбатроса оно достигает рекордной величины $\lambda = 17,65$.

Взлётно-посадочные качества птиц безупречны, за исключением тяжёлых водоплавающих птиц.

Большинство птиц «висеть» в неподвижном воздухе не может, но некоторые птицы, как жаворонок, зимородок, пустельга и колибри, обладают этим свойством. Колибри могут «висеть» перед цветком, беря из него сок.

Кстати, наибольшее число взмахов в секунду из всех птиц делает колибри — 38 взмахов.

Наряду с посадочными и взлётными данными летными характеристиками птицы являются: скорость, дальность и высота полёта. По наблюдениям наибольшей скоростью горизонтального полёта $v = 144$ км/час обладает стриж. Это не значит, что птицы в ином виде полёта не могут летать быстрее. В пикирующем полёте сокол-сапсан, преследуя добычу, развивает скорость до 360 км/час. В горизонтальном же полёте он развивает скорость 90 км/час.

Наблюдениями с гор и самолётов установлено, что наибольшая высота полёта ворон и галок около 2000 м, жаворонка — 1900 м, журавлей — 4500 м.

Птицы-парители, используя восходящие потоки воздуха, залетают на большие высоты. На Кавказе горные орлы (бородачи) поднимаются на высоту 5000 м. В Тибете грифы и кондоры летают на высоте около 7000 м.

Дальность полёта без посадки у птиц весьма велика. Окольцовыванием птиц установлено, что при благоприятных условиях чибисы перелетали из Англии в Ньюфаундленд через Атлантический океан, покрыв расстояние в 3500 км, золотые ржанки днём и ночью летели из Новой Шотландии в Южную Америку, пройдя путь около 4000 км.

Человек, научившись летать, раньше всего превзошёл птицу по скорости полёта, затем по высоте полёта и лишь позднее по дальности полёта. Полёты на дальность в сильной степени связаны с экономичностью полёта.

Экономичность полёта летательного аппарата (в том числе и птицы) можно охарактеризовать отношением веса аппарата к мощности его двигателя. Это отношение называется коэффициентом нагрузки на единицу мощности. От него сильно зависят

показатели летательного аппарата. Чем выше этот коэффициент, тем совершеннее летательный аппарат. Проведём сравнение по экономичности полёта между самолётом и птицей.

Таблица 2

Название птиц	Нагрузка на единицу мощности в кг/л. с.	Самолёт	Нагрузка на единицу мощности кг/л. с.
Аист белый . .	135	Рекордный на дальность	14
Чайка	81	Пассажирский . . .	8
Грач	66	Учебный	6
Голубь сизый .	56	Бомбардировщик .	4
Ворона серая .	53	Истребитель	1,5

Таблица 2 показывает, что наибольшей нагрузкой на лошадиную силу, а следовательно, и наибольшей грузоподъёмностью, обладают рекордные самолёты на дальность. Им приходится иметь с собой большой груз в виде горючего. Нагрузка на единицу мощности у них в среднем равна около 14 кг/л.с.

Нагрузка на 1 л. с. у различных птиц весьма велика и колеблется от 35 до 135 кг/л. с., т. е. в 3÷6 раз больше, чем у самолёта. Это подтверждает высокую экономичность полёта птиц и заставляет продолжать изучение летательного аппарата, где бы функции продвижения и поддержания были соединены в одном агрегате. Этим агрегатом являются крылья. Соединение указанных функций в одном агрегате является экономически выгодным.

В летательном аппарате с машущими крыльями аэродинамически выгодно иметь гибкое крыло, позволяющее изменять форму его поперечного сечения, т. е. профиль крыла. Такое крыло можно наилучшим образом приспособлять к конкретным условиям обтекания.

Машущий полёт в технике ещё не удалось воссоздать, хотя было сделано много попыток. Правда, отдельные модели с машущими крыльями летают. Не надо думать, что здесь мыслится слепое подражание природе, копирование полёта птиц. Бесплодны попытки тех, кто

думает, что осуществить машущий полёт можно, прикрепив к спине человека крылья, подобные птичьим, и, взмахивая ими, оторваться от земли и лететь с помощью мускульных усилий. Осуществить машущий полёт возможно на аппарате, летающем при помощи взмахов крыльями, приводимыми в действие мотором.

2. Полёт насекомых

Считается, что из всех, известных в настоящее время видов живых существ приблизительно $\frac{3}{4}$ их способны к полёту. Сюда входят птицы — их около 10 000 видов, летучие мыши — их около 600 видов и главным образом летающие насекомые — их насчитывается около 350 000 видов. К ним относятся стрекозы, бабочки, всевозможные жуки, мухи, комары, саранча, кузнечики и т. д.

Полёт многих насекомых отличается большим совершенством. Было отмечено, что крупная стрекоза-дозорщик из семейства коромысел не отставала от самолёта, летевшего со скоростью 144 км/час. По другим данным у стрекоз отмечалась скорость полёта, равная 96 км/час. У бабочек бражников максимальная скорость полёта доходит до 54 км/час. Стрекозы, слепни, бражники по скорости полёта могут быть сравнены с некоторыми птицами. Громадное большинство других насекомых летает гораздо медленнее.

Дальность полёта без посадки у некоторых насекомых, как например у саранчи, весьма велика. В данном случае имеется в виду перелёт саранчи через Красное море, при котором промежуточные посадки этих насекомых были невозможны. С промежуточными же посадками американская бабочка (*Danaïs*) при своих миграциях покрывает расстояние до 4000 км, как например при полёте из Мексики в Канаду и Аляску.

Некоторые насекомые способны создавать достаточную для полёта аэродинамическую силу при подъёме на большую высоту, хотя плотность воздуха там значительно меньше. Так, например, бабочки крапивницы и стрекозы залетают в седловину Эльбруса на высоту 5300 м.

Насекомые пользуются планирующим и машущим видами полётов. Некоторая часть их, как например поденки, может парашютировать. Для этого они, взлетев

вертикально вверх на $1 \div 2$ м, останавливают крылья в несколько приподнятом состоянии и медленно опускаются вертикально вниз.

Планирующий полёт у бабочек и стрекоз состоит в том, что они, прекратив махание крыльями, некоторое время скользят в воздухе, затем несколько раз ударяют крыльями и снова планируют.

Отдельные насекомые могут планировать в течение $4 \div 5$ минут, а стрекозы даже парить, используя восходящие потоки воздуха от нагретой земли. Однако планирующий вид полёта, а тем более парящий полёт, у насекомых встречается редко.

Машущий полёт является основным видом полёта насекомых. Число взмахов в секунду сильно колеблется. У некоторых насекомых взмахи столь часты, что они сопровождаются гудением, жужжанием и писком.

Число взмахов в секунду:

бабочки капустницы	—	9	взмахов в секунду		
стрекозы	—	80—100	»	»	»
осы	—	110	»	»	»
шмеля	—	240	»	»	»
комнатной мухи	—	330	»	»	»
пчелы	—	400	»	»	»
комара	—	594	»	»	»

Комары «толкунчики», рой которых часто вьётся столбом, предвещая хорошую погоду, делают около 800 взмахов в секунду.

Управление полётом осуществляется исключительно посредством изменения углов наклона плоскости махания крыльев и изменением углов атаки крыла. Всякого рода «воздушные рули» в полёте у насекомых отсутствуют.

Большинство насекомых прекрасно маневрируют в воздухе. С полного хода они могут резко повернуть в сторону. У некоторых видов мух и других насекомых это достигается внезапным прекращением работы крыльев той стороны тела, куда насекомое должно повернуть, что вызывает своего рода резкий и далёкий прыжок летящего насекомого в сторону. Управляемым полётом хорошо владеют стрекозы: они при охоте за мелкими летающими насекомыми или драке между собой могут резко отклоняться в сторону и, следуя друг за другом, в точности повторять маневры впереди

летающего насекомого. Кроме этого, стрекоза, преследуя ускользящую от неё вверх добычу, может взлетать на короткое расстояние вверх почти вертикально.

Не присаживаясь на цветок и запуская на лету в него хоботок, бражник может долгое время «висеть» перед цветком, покачиваясь из стороны в сторону, то удаляясь от него, то, наоборот, приближаясь, подобно тому, как это делают крохотные птички колибри.

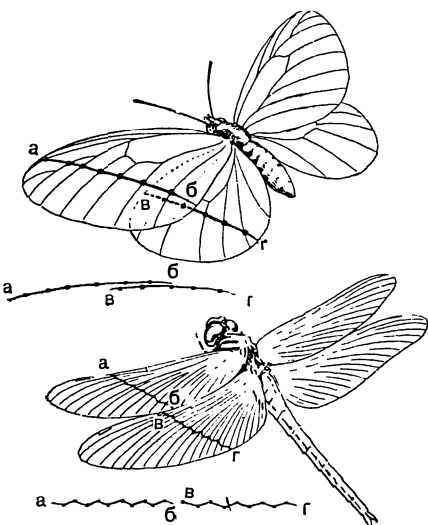


Рис. 79. Профили крыльев у насекомых.

можно лишь убедиться, что насекомое из прежнего места исчезло и появилось вновь в другом месте.

Наряду с этим часть насекомых плохо управляет своим полётом. Не умея в короткое время создать должную аэродинамическую силу, способную изменить направление полёта, они часто налетают на различные препятствия. К таким относятся навозные жуки, жуки-дровосеки и др. Крылья насекомых сплошные, поэтому они ближе к самолётным чем к птичьим. Они представляют собой гибкие, эластичные, чаще всего прозрачные хитиновые пластинки, имеющие в продольном направлении утолщения — жилки, играющие роль самолётных лонжеронов. В поперечном направлении также имеются жилки, укрепляющие крыло. Жилки прочнее

других частей крыла, состоят также из хитина и наиболее концентрированы у передней кромки крыла.

Аэродинамический профиль машущих крыльев и их очертания в плане показаны на рисунках 79, 80.

Размах крыльев у насекомых колеблется в больших пределах, начиная примерно с 2 мм и достигая у самого длиннокрылого насекомого — у американской бабочки «тизании» — 300 мм.

У ископаемых насекомых аэродинамические поверхности были ещё больше. Например, у стрекозы, найденной советским палеонтологом Ю. М. Залесским в пермских отложениях на Урале (Вишера), размах крыльев достигал 1,15 м.

Как и всякому летательному аппарату, для полёта насекомого нужна подъёмная сила и тяга. Эти аэродинамические силы создаются крыльями. Аэродинамика полёта насекомых в настоящее время изучена мало, меньше, чем аэродинамика птиц.

В отличие от птиц плоскость махания крыльев у насекомых значительно отклоняется от вертикали.

В полёте движение конца крыла можно рассматривать двояко. С одной стороны, крыло перемещается относительно тела, с другой стороны, конец крыла перемещается относительно горизонтальной поверхности. Относительно тела крыло описывает своим концом характерную кривую в виде цифры восемь (рис. 81). При обычном горизонтальном полёте ось этой кривой наклонена к горизонту в среднем приблизительно на 45°. Для исследования восьмёркообразной кривой приклеивались

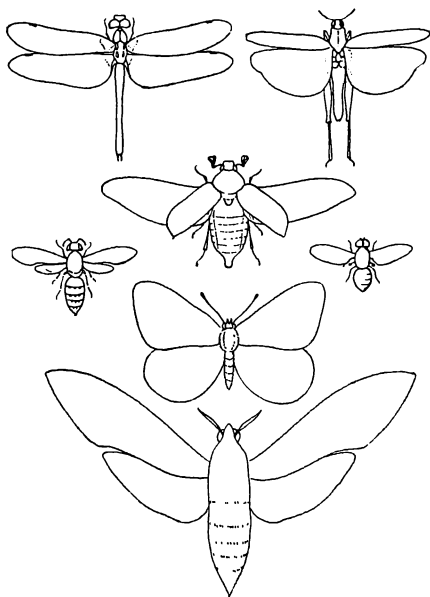


Рис. 80. Форма и количество крыльев у насекомых.

кусочки сусального золота к концу крыла осы, закрепляли ее неподвижно и заставляли работать крыльями под прямыми лучами солнца. В воздухе блестящее золото вычерчивало восьмёрку подобно тому, как это получается, когда горящим углем быстро машут в темноте.

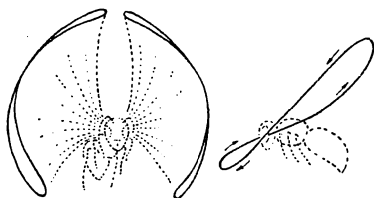


Рис. 81. Восьмёркообразная кривая, описываемая концом крыла насекомого.

По отношению к неподвижному наблюдателю крыло описывает своим концом волнообразную кривую, по своему виду напоминающую синусоиду (рис. 82).

В разных точках кривой, которую описывает

машущее крыло, резко меняется наклон пластинки (профиля) крыла. При движении крыла вниз и одновременно вперёд наклон очень мал, крыло почти горизонтально. В восходящей части кривой (при взмахе вверх) наклон резко меняется и профиль крыла располагается почти вертикально. Ось вращения профиля близка к передней кромке крыла.

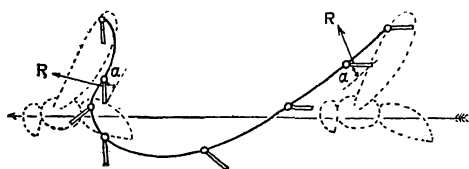


Рис. 82. Кривая, описываемая концом крыла насекомого.

Для выяснения аэродинамических сил, возникающих при машущем полёте, необходимо знать углы, под которыми находится профиль крыла, относительно направления движения.

При взмахе, т. е. при движении по нисходящей линии синусоиды, в её нижней части профиль крыла, приобретая всё увеличивающийся угол атаки, испытывает большую аэродинамическую силу.

Крыло при взмахе вверх, т. е. переходя на восходящую линию синусоиды, резко меняет своё положение,

переворачиваясь по оси переднего края и двигаясь с большей быстротой, чем при взмахе вниз, толчками получает силу тяги.

Таким образом, при движении вниз крыло, обладая подъёмной силой, поддерживает тело в воздухе; при движении крыла вверх крыло создаёт силу тяги.

В целях дальнейшего изучения полёта насекомых проводились интересные опыты над стрекозами по замене их собственных крыльев крыльями «протезами». Для этого у стрекозы обрезались все четыре крыла, оставались лишь маленькие культы, на которые наклеивались гуммиарабиком крылья другой стрекозы. Несмотря на такое механическое соединение крыльев, стрекозы продолжали несколько хуже, но все же летать.

В настоящее время исследования полёта насекомых и птиц успешно осуществляются с помощью скоростной киносъёмки, которая производится в специальных помещениях — инсектариях¹. Замедленный просмотр результатов съёмки позволяет внимательно проследить за процессом махания, за малейшими поворотами и изгибами крыльев насекомых.

3. Полёт млекопитающих, рыб и растений

Некоторые млекопитающие и рыбы могут летать по воздуху. Для этого у них есть аэродинамические поверхности. У одних они развиты сильно, у других менее заметно. К животным, у которых аэродинамические поверхности сильно развиты и являются главными органами передвижения, относятся представители группы рукокрылых — летучие мыши и крыланы. Особенно многочисленны разновидности летучих мышей. К ним относятся: ночевки, ушаны, нетопыри, а также вампиры, водящиеся в лесах Южной Америки и питающиеся насекомыми и соками плодов. Крыланы, или, как их иногда называют, летучие собаки, обитают в тропической части Америки, в Индии и в Австралии.

Животными, у которых аэродинамические поверхности развиты слабо и служат только вспомогательными органами, являются: простые белки, белки-летяги,

¹ Последнее время делаются попытки проводить съёмки в естественных условиях, в частности Ю. М. Залесским.

водящиеся в лесах Сибири (рис. 83), австралийские белки-летяги, шерстокрылы (рис. 84), живущие на островах Индийского океана, и когуаны, иногда называемые летучими маки. Их пассивные, не машущие, аэродинамические поверхности позволяют им после прыжка совершать только планирующий полёт.

Обыкновенная белка имеет пушистый хвост, обладающий относительно большой аэродинамической поверхностью. Им белка ловко пользуется при прыжках

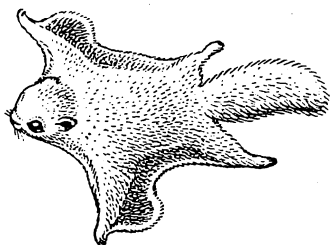


Рис. 83. Сибирская белка-летяга в полёте.

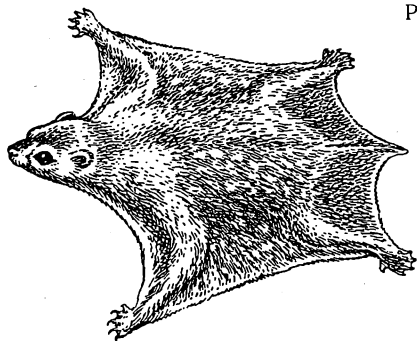


Рис. 84. Шерстокрыл.

с ветки на ветку. Возникающая на распушённом хвосте аэродинамическая сила удлинняет и стабилизирует прыжок и до некоторой степени позволяет белке управлять своим прыжком. Обыкновенная белка совершает прыжки длиной около 10 м, а вот белка-летяга прыгает в длину на $40 \div 50$ м. Как ей это удаётся? Оказывается, увеличение дальности прыжка в $4 \div 5$ раз стало возможным благодаря наличию у белки-летяги увеличенной аэродинамической поверхности.

У сибирской белки-летяги по бокам туловища между передними и задними лапками имеются перепонки, по-

крытые пушистым мехом. Белка-летяга, делая прыжок с дерева, раскрывает перепонки и дальше летит в распластанном виде, с сильно увеличенной аэродинамической поверхностью. В воздухе на этой поверхности создаётся достаточная подъёмная сила, позволяющая белкам-летягам совершать планирующие полёты.

Белка-летяга при помощи своих аэродинамических поверхностей может немного изменять направление своего полёта, выбирая для посадки более удобное и безопасное место. Перед посадкой она несколько изменяет свой угол атаки, поднимается немного вверх и, теряя скорость, смягчает посадочный толчок.

Все эти качества помогают белке-летяге успешнее ускользать от своих врагов — куницы, ласки и др.

У другого животного — когуана — перепонки имеются не только между передними и задними лапами, но также между шеей и передними лапами и между хвостом и задними лапами. Отмечен случай прыжка когуана с высоты 14 м на длину 70 м.

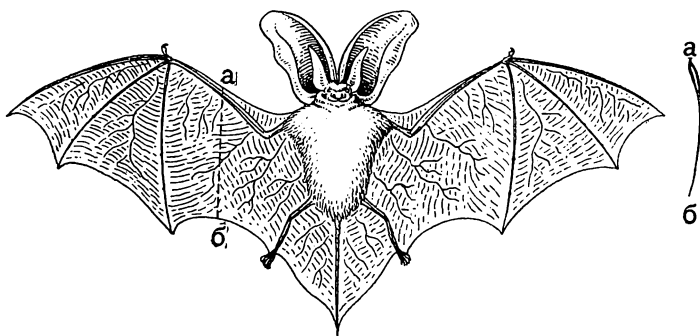


Рис. 85. Летучая мышь и её крыло.

С аэродинамической точки зрения у рассмотренных животных мы не обнаруживаем тех совершенств, которые имеются у птиц и некоторых насекомых. Эти животные не могут парить или совершать машущий полёт. Они могут только планировать. Другое дело такие животные, как летучие мыши и крыланы. Особенно летучие мыши. У них хорошие аэродинамические формы. Они прекрасные летуны. У летучих мышей и крыланов кожные перепонки имеются не только между туловищем и конечностями, но также между весьма

длинными пальцами передних конечностей, образующих крылья. Крылья летучих мышей имеют удлинение $\lambda = 6 \div 8$ (рис. 85). Летучие мыши и крыланы летают при помощи взмахов крыльями. Полёт летучих мышей лёгок и быстр. Они хорошо маневрируют в воздухе, а некоторые из них, как ушан, могут висеть в воздухе на одном месте подобно птицам — зимородку и пустельге. Летучие мыши могут совершать большие перелёты и подниматься на высоту до 2000 м. Обладая хорошими лётными качествами, летучие мыши интересны и тем, что имеют сплошное крыло, образованное не перьями, а голыми сплошными перепонками. Это лишний раз доказывает, что полёт с помощью взмахов крыльями можно совершать не только на крыльях, покрытых перьями, но и на сплошных и что машущий полёт не является монополией пернатых.

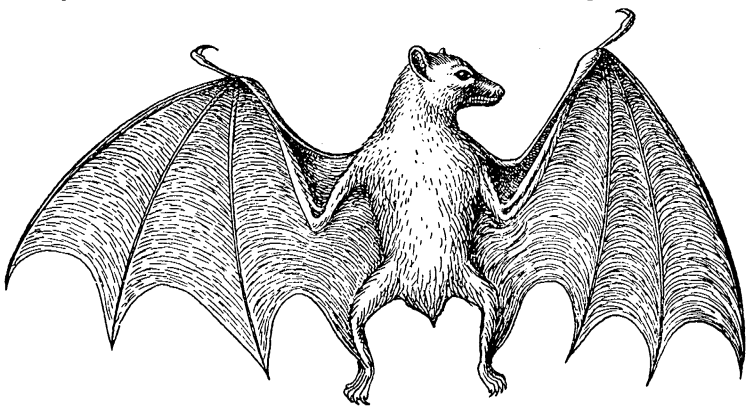


Рис. 86. Крылан-калонг.

Крыланы также имеют перепончатые крылья, подобные крыльям летучих мышей, но эти животные значительно больше по размерам. Размах крыльев у их представителей — калонга (рис. 86) достигает 1,5 м, а у будуля — 1,25 м. Они неплохие летуны и могут совершать полёты до 150 км (рис. 87).

Моряки, плавающие в Средиземном море и тропических частях Атлантического и Индийского океанов, часто бывают свидетелями любопытных зрелищ: из воды поднимаются стаи рыб и, как птицы, уносятся вдаль и снова скрываются в волнах. Иногда сильный порыв



Рис. 87. На утренней заре тысячные стаи калонгов летят на ночлег.

ветра забрасывает их на палубу проходящего корабля. Если рассмотреть такую рыбу, то в глаза бросается большая длина грудных и хвостовых плавников (рис. 88). Расправленные грудные плавники по форме напоминают удлинённые крылья, обладающие сравнительно большой площадью, на которой при полёте летучей рыбы в воздухе возникают аэродинамические силы. Летучая рыба, предварительно разогнавшись в воде, сильным движением хвоста вырывается в воздухе и, пользуясь распростёртыми плавниками, как крыльями,

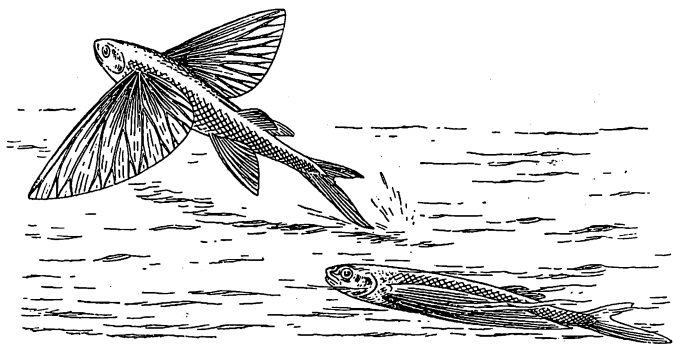


Рис. 88. Летучие рыбы.

совершает пологий планирующий полёт. Этот полёт летучей рыбе нужен для защиты от преследования морских хищников — акул, касаток и др.

Полёт летучей рыбы стабилизируется хвостовыми плавниками. Аэродинамические поверхности летучих рыб не активны, как у птиц, и не обладают удовлетворительной управляемостью; поэтому летучих рыб часто можно видеть заброшенными ветром на палубу корабля.

Удлинение «крыла» у летучих рыб колеблется от 7 до 22, а удельная нагрузка, приходящаяся на единицу поверхности «крыла», равна $10 \div 30 \text{ кг/м}^2$. Полёты летучие рыбы совершают со скоростью около 30 км/час , поднимаясь при этом до 3 м. Дальность полёта летучих рыб достигает $100 \div 150 \text{ м}$, редко больше. Продолжительность пребывания в воздухе равняется $10 \div 18 \text{ сек.}$

Аэродинамические поверхности встречаются не только у птиц, животных и рыб, но и у некоторых семян деревьев и растений. Ими растительный мир пользуется для увеличения дальности разлёта созревших семян.

Семена клёна (рис. 89), иногда называемые «носи-ками», имеют сравнительно большую аэродинамическую поверхность в виде двух, симметрично расположенных лопастей. Лопастей семечка клёна имеют некоторую аэродинамическую закрутку. Поэтому, падая на землю,



Рис. 89. Аэродинамические формы семян: берёзы, клёна, ясеня.

они совершают быстрое вращательное движение, несколько напоминая авторотацию (самовращение) вертолётного несущего винта. При таком вращении аэродинамические силы увеличивают время падения семечка, а следовательно, увеличиваются шансы на относ ветром семечка в сторону.

Семя ясеня в отличие от клёна имеет одну длинную лопасть, тоже вращающуюся при падении созревшего семечка. Семена берёзы имеют по бокам два лёгких симметричных крылышка. Лёгкие семена тополя окружены маленьким пухообразным комочком. Эта своеобразная аэродинамическая поверхность увеличивает площадь сопротивления воздуха и позволяет семенам тополя в тёплые сухие дни подниматься высоко в воздух и долго парить, далеко улетая от родного дерева.

Аэродинамические поверхности имеются у семян одуванчика, чертополоха, мать мачехи, рогоза и т. д. Природа придала этим семенам лёгкую пушистую аэродинамическую поверхность, обладающую большой парусностью (рис. 90).

В атмосфере всегда есть передвижения воздуха величиной от малейших дуновений до сильного ветра. Они-то, воздействуя на поверхность созревшей шапки одуванчика, раздувают её и создают аэродинамические силы, уносящие на многие километры семена-путешественники.

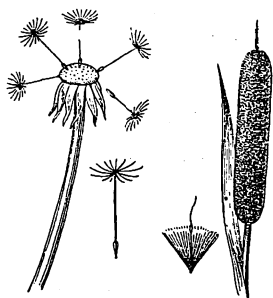


Рис. 90. Аэродинамическая форма семян одуванчика и рогоза.

Полёт опушённых семян напоминает редкий случай, когда группа парашютистов, прыгнув с самолёта близ г. Минска, попала в болтанку, насыщенную сильными восходящими потоками, стала подниматься вверх и скрылась в облаках. Парашютистам удалось приземлиться лишь за 14 км от предполагаемого места приземления.

На опушённое семечко слабые дуновения производят такое же воздействие, как мощные восходящие потоки в случае с парашютистами.

Воздушные течения не только несут семена по воздуху, но и перемещают их по поверхности земли. У ели и сосны семечко снабжено одним прозрачным крылышком. В зимнее время с помощью этого крылышка семечко под воздействием ветра быстро, как буер, скользит по насту, передвигаясь на десятки километров от материнского дерева (рис. 91).

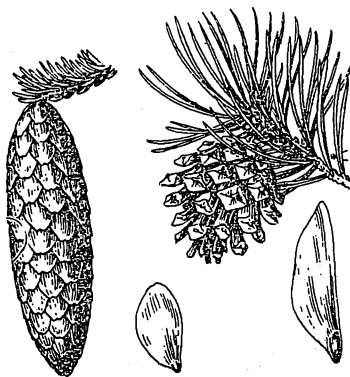


Рис. 91. Аэродинамическая форма семян сосны и ели.

У степных растений — курай, рогачку, качима, катрана и др. — (рис. 92), известных в народе под именем «перекати-поле», само семечко не имеет аэродинамической поверхности, но зато высушенные стебли этих кустов образуют шарообразную форму, представляющую

собой значительную аэродинамическую поверхность. Осенью такие растения под действием ветра отламы-

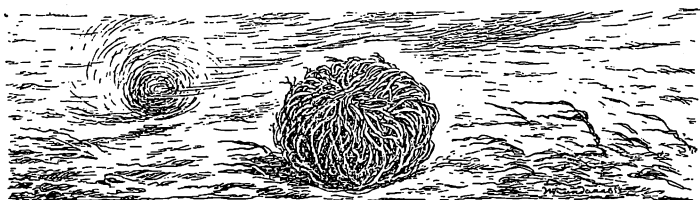


Рис. 92. Аэродинамическая форма-растений «перекати-поле».

ваются у корня и перекатываются ветром на сотни километров, по дороге высевая свои семена.

4. Аэродинамические явления в атмосфере

Над поверхностью земли постоянно наблюдаются воздушные течения. Они крайне разнообразны и могут быть как слабыми дуновениями ветерка, так и наводящими ужас тайфунами, разрушающими всё на своём пути.

Солнце неравномерно нагревает земную поверхность благодаря её неоднородности (моря, суша, горы, степи, леса), это и является основной причиной возникновения местных воздушных течений. Более нагретый воздух, расположенный над обнажённой землёй, сухими степями, песком и скалами, расширяется и поднимается вверх. Наверху начинается движение в сторону холодного воздуха, находящегося над лесами, болотами, водными пространствами и т. д. А в нижнем слое менее нагретый воздух направляется в сторону тёплого.

Кроме того, мощные воздушные течения возникают вследствие большого нагрева земного шара у экватора по сравнению с полярными областями.

Течения бывают горизонтальными и вертикальными, их направление и скорость часто меняются, особенно при обтекании всевозможных препятствий. При этом движение становится беспорядочным и поток насыщается вихрями больших или малых размеров. Наблюдать вихревое движение приходится часто. При случае понаблюдайте завихрённое движение воды за устоями

мостов или бурлящую полосу воды за гребным винтом моторной лодки.

В чистом воздухе вихри невидимы, тем не менее их можно наблюдать, когда они кружат дорожную пыль, сухие листья или пушинки ив и тополей.

Встречающиеся в природе циклоны также являются вихрями, только колоссальных размеров.

Иногда в месте встречи двух различных по температуре и скорости воздушных масс возникают вращающиеся столбы воздуха, поперечник которых достигает десятков и даже сотни метров. Одновременно столб несётся вперёд. Воздух в нём вращается вокруг вертикальной оси и при этом перемещается вверх. Скорость движения внутри него около 100 м/сек (рис. 93). При

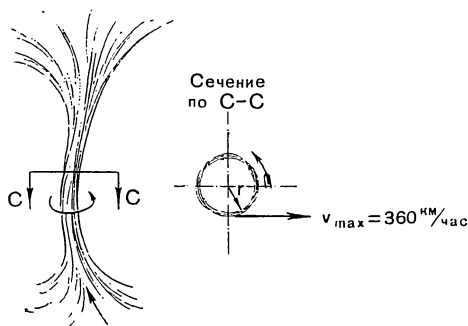


Рис. 93. Схема смерча.

столь быстром вращении воздуха внутри вихря возникают центробежные силы, благодаря чему воздух там разрежен и давление понижено. Когда такой столб приближается к воде, то засасывает её в себя, образуя колоннообразную вращающуюся массу воды. Такой вихрь носит название водяного смерча, а вихрь, проносящийся над сушей, — трюмба. Водяные смерчи образуются на морях (рис. 94), озёрах и реках. Особенно эффективны, но вместе с тем и опасны громады водяных смерчей на море. В старину при приближении водяного смерча к парусному судну полагалось расстреливать его из пушек.

Кроме водяных, бывают ещё и песчаные смерчи.

Вместе с водой смерч втягивает в себя все достаточно лёгкие предметы: рыб, медуз, раков, лягушек и другие мелкие существа и водяные растения.

Когда смерч выходит на сушу, он превращается в воздушный смерч, часть же втянутых и высоко поднятых предметов и воды продолжает под действием

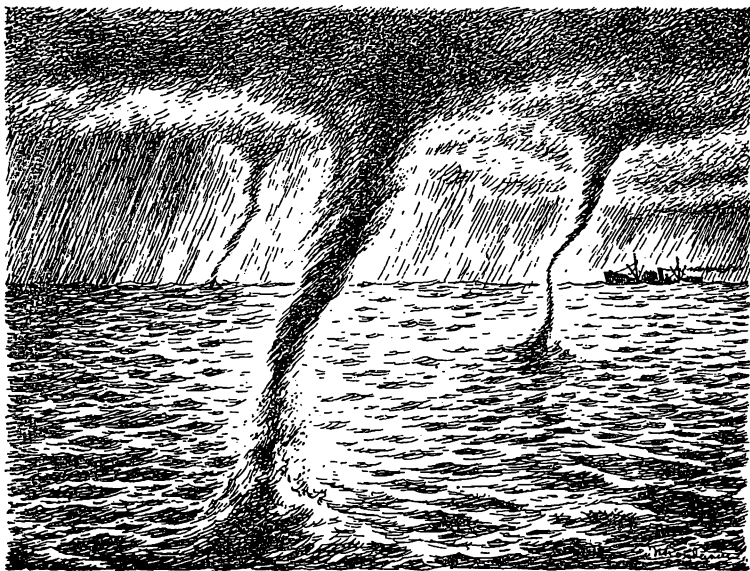


Рис. 94. Смерч на Охотском море.

вихря оставаться на высоте. Позднее, когда смерч пройдёт некоторое расстояние и интенсивность его ослабнет, они падают на землю вместе с дождём. Иногда это происходит в большом отдалении от воды.

Такой случай произошёл в 1933 г. на Дальнем Востоке, в 50 км от Тихого океана: вместе с дождём падали морские медузы. Позднее, в 1949 г., в Новой Зеландии был обильный дождь с тысячами морских рыбок, причём произошло это на расстоянии около 20 км от берега.

В природе смерчи — частое явление; так, например, в Америке за год проходит около ста пятидесяти смерчей, причиняя смерть в среднем за год более чем 200 че-

ловекам и большой материальный ущерб. Вот одно из описаний смерча.

«Весь день 8 июня 1953 г. тяжёлый гнетущий зной стоял над штатами Мичиган и Огайо. С юга неслись тёмные кучевые облака. Они затянули небо сплошной свинцово-серой пеленой. Температура сильно поднялась.

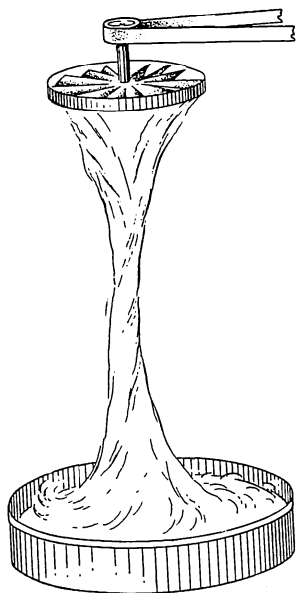


Рис. 95. Установка проф. Н. Е. Жуковского для искусственного воссоздания смерча.

Слой раскалённого воздуха, как одеяло, покрывал землю. Поверх же этого «одеяла» дули прохладные ветры с северной части Скалистых гор. Чёрные грозовые тучи протянулись до побережья озёр Гурон и Эри. И вдруг в разных местах из туч свесились до земли 6 хоботообразных воронок. То были смерчи, или, как их называют в Америке, торнадо. В 8 ч. 30 м. вечера в несколько мгновений множество жилых домов было обращено в руины».

В одной из книг Н. Е. Жуковского, который посвятил много замечательных трудов изучению вихревого движения, описана установка для получения искусственного смерча. В этой установке над чаном с водой размещается на расстоянии 3 м полый шкив диаметром 1 м, имеющий несколько радиальных перегородок

(рис. 95). Если шкив привести в быстрое вращательное движение, то он начнёт закручивать столб воздуха. Внутри крутящегося столба воздуха, т. е. внутри воздушных вихрей, давление понижено, а следовательно, вода, находящаяся под этим столбом, устремится вверх и одновременно из-за наличия трения о крутящийся воздух придёт во вращательное движение.

Аналогично водяному смерчу искусственно можно создать и песчаный смерч.

Из большого числа видов воздушных течений большой интерес представляют восходящие и нисходящие

потоки. В атмосфере вертикальные течения образуются как в результате неравномерного нагрева поверхности Земли, так и вследствие разнообразного рельефа местности. Горизонтальный поток воздуха, встречающий на своём пути возвышенность, отклоняется ею вверх. За возвышенностью поток будет снижаться.

Восходящие и нисходящие потоки могут ещё образовываться в области грозových и кучевых облаков, достигая скорости $10\div 30$ м/сек. Кучевые облака — это вершина восходящих воздушных потоков.

Законы образования воздушных течений необходимо знать пилотам планёров, самолётов и вертолётov.

При полёте в восходящих и нисходящих течениях самолёты испытывают сильную «болтанку». При встрече с такими потоками резко и часто меняются углы атаки крыльев. Так, например, если самолёт летит под углом атаки 1° со скоростью 100 м/сек и под него поддул восходящий поток со скоростью 20 м/сек, то угол атаки увеличится в 12 раз (рис. 96). Если на тот же самолёт

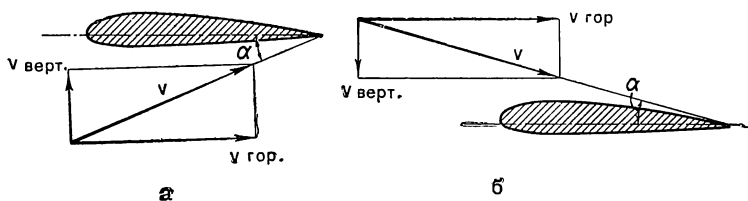


Рис. 96. Изменение угла атаки самолёта при полёте: а — в восходящем потоке, б — в нисходящем потоке.

подействует нисходящий поток со скоростью 20 м/сек, то угол атаки уменьшится, примет отрицательное значение, при котором подъёмная сила станет отрицательной и самолёт начнёт проваливаться.

Таким образом, изменение углов атаки влечёт за собой резкое изменение аэродинамических сил, что вызывает сильные толчки, подбросы и провалы самолёта.

Эти явления часто и неправильно объясняют наличием в воздухе каких-то «воздушных ям». У человека, летящего на самолёте, воздушная «болтанка» вызывает ощущение, близкое к тому, что испытывают при качке на море.

В таких, резко меняющихся условиях, особенно у передних кромок грозowych облаков, летать опасно. Самолёт может разрушиться. По имеющимся лётным наставлениям грозовые облака надо обходить.

Другим интересным явлением в атмосфере, относящимся к аэродинамике больших скоростей, является полёт в ней метеоритов. Полёт метеорита можно видеть в ясную ночь, когда внезапно на небе появляется яркая «падающая» звезда. Она беззвучно прочерчивает светящийся след среди неподвижных звёзд и так же тихо исчезает.

Метеоритные тела бывают размером от мельчайших крупинок до крупных металлических и каменных глыб. Каждый час на нашу Землю обрушивается большое число, иногда достигающее до 20 000, метеоритов — пришельцев из далёких пространств. И если бы воздух атмосферы не оказывал им сопротивления, то наша Земля подверглась бы варварской небесной бомбардировке. Воздух, окутывающий Землю, служит надёжной «броней» от метеоритов. Но иногда эта «броня» ими пробивается, и тогда на землю выпадают метеориты. Эти метеориты являются единственными небесными телами, которые мы можем взять в руки. Метеоритные камни влетают в атмосферу холодными, имея в среднем на высоте $100 \div 120$ км скорость $12\,000 \div 70\,000$ м/сек.

Сколь велико аэродинамическое торможение даже при полёте в очень разреженном воздухе, видно из того, что скорость метеорита на высоте 40 км за 1 сек иногда уменьшается с 55 до 40 км/сек.

Мелкие метеоритные камни весом в несколько граммов встречают в воздухе огромное сопротивление, полёт замедляется и их кинетическая энергия переходит в тепловую. Такие метеориты раскаляются, испаряются и, превращаясь в газы, оставляют за собой светящийся след.

Крупные метеориты, если они не успевают распаться в воздухе, израсходовав кинетическую энергию на преодоление сопротивления воздуха, в конце пути замедляют полёт. Зона, где задерживается полёт метеорита, называется зоной задержки. Из неё метеорит падает на Землю, как обычно брошенный с большой высоты камень, достигая при встрече с Землёй скорости $100 \div 200$ м/сек.

Из ознакомления с аэродинамикой больших скоростей (ч. I, § 5) мы знаем, что перед телом, например, перед пулей, снарядом, летящим со сверхзвуковой скоростью, образуется волна уплотнения со скачком, где давление и температура резко повышаются. То же самое происходит и перед головной частью метеорита, только здесь давление и температура оказываются несравненно большими (рис. 97). Волна уплотнения от метеорита, распространяясь в воздухе, доходит до поверхности Земли, порождая звуковые и ударные волны.

Мы знаем, что сопротивление воздуха на больших скоростях зависит от числа M . У ракет это число доходит до 25. У метеоритных тел оно может достигать 100.

Летательным аппаратам будущего предстоит летать со скоростью метеоритов, поэтому изучение полёта метеоритов представляет большой интерес. Недалеко то время, когда аэродинамики, вооружённые знаниями об обтекании газами тел на больших скоростях, смогут в аэродинамических трубах воспроизводить картину обтекания метеоритных тел. И не случайно, что астрономы при изучении метеоритов обратились за помощью именно к аэродинамике.

Полёт метеоритов в атмосфере напоминает нам о тех трудностях, с которыми придётся встретиться человечеству при осуществлении первых космических полётов.

Однако полёт некоторых метеоритных тел, благополучно достигающих поверхности земли, даёт нам надежду на успешное преодоление этих трудностей.

Космическому кораблю придётся дважды пронизать атмосферу Земли — в начале и в конце полёта. При взлёте корабль пересечёт атмосферу со скоростью, значительно меньшей, чем при возвращении, поэтому аэродинамическое сопротивление и аэродинамический нагрев в этом случае не будет иметь столь грозного значения.

При возвращении из «рейса», врезаясь с колоссальной скоростью в атмосферу, космический корабль встретит огромное сопротивление воздуха, которое вызовет высокий аэродинамический нагрев.



Рис. 97. Схема обтекания метеорита.

Однако скорость космического корабля при входе в атмосферу будет много меньше скорости метеоритных тел, а форма его более удобообтекаема. Поэтому у космического корабля аэродинамическое сопротивление все-таки не вызовет столь резкого торможения и столь высокого нагрева, как это наблюдается у метеоритных тел. Тем не менее обшивка корпуса корабля начнёт нагреваться и подобно метеориту может раскалиться добела, и на время даже засветится как звезда.

Но это не значит, что космический корабль сгорит. От сгорания его предохранит применение жаропрочных и неокисляющихся материалов, тепловая изоляция и искусственное охлаждение.

Толстая тепловая изоляция задержит большую часть тепла, а проникшую внутрь корабля часть тепла встретит мощная система искусственного охлаждения.

Для искусственного охлаждения в качестве холодильного тела можно использовать воду или сжиженные газы — воздух, аммиак, кислород и т. п. Холодильное тело, испарясь, заберёт тепло и унесёт его в окружающую атмосферу.

Приближаясь к Земле, космический корабль будет иметь огромную скорость, которую необходимо снизить для благополучного приземления.

Так же как и в случае падения метеоритов космический корабль, летящий с огромной скоростью, испытает сильное и резкое торможение, обусловленное аэродинамическим сопротивлением воздуха.

Кроме аэродинамического способа торможения, возможно ещё торможение при помощи собственного двигателя, выбрасывающего струю газов по направлению полёта. Такое торможение для достаточного снижения скорости космического корабля требует дополнительно большого количества топлива, да вдобавок к этому количеству потребуется ещё топливо, которое необходимо, чтобы унести с собой посадочное топливо. Из этого следует, что аэродинамический способ торможения является более обещающим.

При аэродинамическом способе торможения скорость сначала уменьшается за счёт сопротивления, испытываемого корпусом корабля. Когда сопротивления, оказываемого корпусом, становится недостаточно, можно ввести в действие относительно небольшой специальный пара-

шют. Конечно, такой тормозной парашют мыслится не из лёгкого шёлка или капрона, а из жаропрочного материала возможно с применением искусственного охлаждения.

Для дальнейшего уменьшения скорости и безопасности приземления, советский учёный Ф. А. Цандер предложил снабдить космический корабль выдвигающимися крыльями, которые при обычном полёте втянуты в корпус корабля и выдвигаются лишь при посадке. На этих крыльях предполагается планировать не только в атмосфере Земли, но и в атмосфере других планет — Венеры, Марса.

Кроме описанного назначения крыльев, их предполагается использовать при возвращении на Землю в качестве средства для удержания корабля в пределах атмосферы.

Для этого, при подходе корабля к атмосфере, чтобы он её не проскочил, крылья устанавливаются к направлению потока воздуха так, чтобы их подъёмная сила была направлена к центру Земли. В этом случае подъёмная сила прижмёт корабль к Земле, заставляя его по спирали огибать Землю и постепенно, на большом участке пути, плавно снижать космическую скорость.

При этом корабль не испытывает чрезмерных нагрузок.

В дальнейшем полёте, когда центостремительная сила станет меньше веса корабля, крылья устанавливаются под таким углом атаки, при котором будет создаваться подъёмная сила, направленная от центра Земли. При этом космический корабль переходит на обычное планирование.

Из всего сказанного видно, что учёным придётся много поработать над аэродинамикой космического корабля. Но настанет время, когда аэродинамики, совместно с другими учёными дадут все исходные данные, необходимые для создания первого беспилотного космического корабля.

На Венской сессии Всемирного Совета Мира президент Академии наук СССР академик А. Н. Несмеянов заявил, что «наука достигла такого состояния, когда реальна посылка ракеты на Луну...»

4 октября 1957 года Советский Союз, запустив первый в мире искусственный спутник Земли, возвестил

всему миру о том, что человечество вплотную подошло к полётам в межпланетное пространство. Если ракетостроители добьются увеличения скорости на 3 км/сек к скорости спутника, то такая ракета сможет значительно углубиться в околоземное космическое пространство.

Там её движение не будет стеснено аэродинамическим сопротивлением и мощным панцирем земного тяготения. Привычный земной полёт сменится специфическим космическим движением, отличающимся поразительной скоростью, плавностью, бесшумностью, уменьшением веса до полной потери весомости. Ракета с выключенным двигателем сможет покрывать расстояния в миллиарды километров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочитав эту книгу, читатель ознакомился с основами аэродинамики и многочисленными примерами и явлениями, взятыми из техники и природы. Это поможет читателю познать сущность аэродинамических явлений, часто встречающихся в нашей жизни.

Значение аэродинамики далеко не исчерпывается приведёнными примерами. Аэродинамика, как и всякая наука, позволяет глубже проникать в тайны природы и помогает человечеству устранить преграды, стоящие на его пути, на пути достижения больших скоростей передвижения и на пути создания совершенных машин, облегчающих как труд, так и условия жизни человека.

В наши дни советскими аэродинамиками совместно с лётчиками-испытателями скоростных самолётов проделана большая работа по достижению сверхзвуковых и звуковых скоростей. Много сделано по улучшению воздушно-реактивных двигателей, по созданию совершенных вентиляционных установок и обтекаемых форм автомобилей и по внедрению ветродвигателей в народное хозяйство.

Перед учёными и инженерами, работающими в аэродинамических лабораториях, на заводах и участвующими в лётных экспериментах, стоит задача дальнейшего усовершенствования скоростных самолётов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
--------------------	---

Часть I. Краткие сведения по аэродинамике

1. Воздушный океан	7
2. Два уравнения аэродинамики	11
3. Движение тел в воздухе	17
4. Возникновение подъёмной силы	24
5. Аэродинамические силы на больших скоростях	32

Часть II. Аэродинамика в технике

1. Аэродинамические трубы	36
2. Самолёты	43
3. Планёры	61
4. Воздушные винты	68
5. Вертолёты	72
6. Парашюты	77
7. Ракетные тележки	81
8. Ствольная и ракетная артиллерия	86
9. Ветряные двигатели	95
10. Аэродинамика автомобиля	98

Часть III. Аэродинамика в природе

1. Полёт птиц	102
2. Полёт насекомых	112
3. Полёт млекопитающих, рыб и растений	117
4. Аэродинамические явления в атмосфере	125
Заклучение	135

Казневский Виктор Павлович

АЭРОДИНАМИКА В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Редактор *Т. В. Михалкевич*. Художники *Н. Н. Кондаков, С. В. Филиппович*

Художественный редактор *Н. А. Володина*.

Технический редактор *Б. Н. Головкин*. Корректор *С. М. Березина*

Слано в набор 9/1 1958 г. Подписано к печати 13/V 1958 г. $84 \times 108^{1/2}$
 Печ. л. 8,5 (6,97). Уч.-изд. л. 6,82 Тираж 17 тыс. экз. 3 А 03978

Цена 1 р. 85 к.

Заказ № 2697

Учпедгиз. Москва, 3-й проезд Марьиной Роши, 41.

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Ленсовнархоза.
 Ленинград, Измайловский пр., 29

Цена 1 р. 85 к.