

МИР ЗНАНИЙ

В. П. КАЗНЕВСКИЙ

Аэродинамика в природе и технике

*Книга для внеклассного чтения
учащихся 8—10 классов*

Издание третье, дополненное и переработанное

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1985

ББК 22.253.3
К14

ВВЕДЕНИЕ

Рецензенты:

(Мир знаний).

В книге в популярной форме изложены аэродинамические явления и законы в авиации, ракетно-космической технике, в

4306020000—587
103(03)—85 164—85

Кто откроет страницы этой книги? Молодой человек, желающий стать **физиком**, биологом, механизатором, летчиком, конструктором или строителем, а может быть, этой книгой заинтересуется юноша или девушка, еще не выбравшие, где им трудиться — в сельском хозяйстве, технике или в другом каком-нибудь направлении?

Не знаю как аэродинамикой в технике, а аэродинамикой в природе, думаю, заинтересуются все.

Кто из нас не любит природу? Кто из нас не задумывается над ее многообразием, загадками и мудростью?

С незапамятных времен люди с восхищением и завистью провожали взглядом пролетающую птицу, бегущие по небу облака, застывшую в воздухе стрекозу и вдруг метнувшуюся в сторону. Они видели, как разносятся в теплый, погожий день легкие белые паутинки, пушистые семена одуванчика, желтые листья деревьев.

Примеры полета в природе манили человека, заставляли самому что-то попробовать, что-то начать делать.

Предпринимались попытки летать с машущими крыльями, с неподвижно распластанными, подобно парящим птицам.

Полет человека совершенствовался постепенно. Были времена, когда летали в всячем положении, на «этажерках», сидя на скамейке в летных очках и пробковом шлеме. Затем **л**етали в открытых кабинах, защищенных небольшим ветровым козырьком, потом в закрытых кабинах с прозрачными фонарями. И всюду была своя романтика.

Далее, стали летать в герметически закрытых каби-

нах, в стесненных скафандрах. Постепенно уменьшалась связь с забортным пространством. Ощущение от полета становилось скудным и жестким от все увеличивающихся перегрузок, действующих на пилота.

Казалось бы, уходила романтика **полета**.

Но вот пришли сверхзвуковые и даже гиперзвуковые скорости, обуздать которые стало тоже **романтикой**.

С освоением больших скоростей были достигнуты и большие высоты, переходящие в космическое пространство.

На смену впечатлениям видеть Землю с высоты птичьего полета или с высоты Эйфелевой башни стало возможным взглянуть на нашу голубую, прекрасную планету со спутника, а позднее и с высоты корабля, удаляющегося в сторону Луны.

Стремительное развитие авиационной и ракетно-космической техники во многом связано с достижениями **науки**, называемой аэродинамикой.

Начало науки о полете летательных аппаратов в воздухе было положено **Н. Е. Жуковским**. Он создал много трудов по теории авиации, гребных винтов, полета птиц, явлений смерча, вихрей, ветродвигателей и т. д.

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

Рассматриваем ли мы движение самолета, ракеты, пули, **вертолета**, автомобиля, лопасти вентилятора, лопасти ветродвигателя, парашюта, а также полет птицы, насекомого, летучей рыбы, кленового семечка или явления водяного, песчаного смерча — везде, во всем этом многообразии мы встречаемся с особенностью аэродинамического воздействия воздуха.

Бесчисленны примеры в технике и в природе взаимодействия тел с воздушной средой. Что происходит в потоке воздуха? Что получится, если в этот поток поместить тело или, наоборот, тело заставить двигаться в неподвижной среде?

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

Со времени последнего издания настоящей книги **прошло** четверть века. Срок большой и малый. Совсем малый для обнаружения каких-либо аэродинамических **эволюций** в природе и очень большой в развитии техники,

взаимной с аэродинамикой. Здесь перемены разительны. И обусловлены они в первую очередь стремительностью развития научно-технической **революции**.

За последнее время родилась практическая космонавтика с ее гиперзвуковой аэродинамикой при движении в атмосфере планет. Созданы сверхзвуковые пассажирские самолеты. Прочно вошли в народное хозяйство вертолеты, шагнули вперед аппараты на воздушной подушке и многое другое.

Все эти перемены автором были учтены при переработке и дополнении книги для **третьего** издания.

1. ВОЗДУШНЫЙ ОКЕАН

Прозрачная синева воздушного океана — это колыбель, где человек **научился летать** сначала на аэростатических аппаратах, а затем на крыльях.

После **покорения** воздушного океана человека стали манить другие дали, простирающиеся далеко за его колыбель.

Человек вышел в космос!

Для этого выхода он воспользовался газодинамическим воздействием струи выходящего газа на стенки камеры ракетного двигателя, **т. е.** использовал силу реакции. Это был принципиально новый качественный скачок, потребовавший запастись газ — тело для отброса — на борту летательного аппарата. Этот шаг придал человечеству могущество в познании природы и позволил понять, сколь прекрасна наша Земля. Об этом говорили и космонавты, налетавшие миллиарды километров в космосе.

По современным представлениям, атмосферная **оболочка** простирается приблизительно до 20 000 км. Резкой верхней границы ее не существует. Атмосфера постепенно переходит в межпланетную среду.

У поверхности Земли (на уровне моря) давление и плотность воздуха достигают наибольшего значения. С высотой давление и плотность воздуха уменьшаются.

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

Насколько быстро падает плотность с высотой, видно из того, что на высоте 5 км плотность в 1,6 раза меньше, чем у поверхности Земли, а на высоте 20 км в 15,6 раза меньше. С уменьшением плотности уменьшается и сопро-

тивление движущегося тела. Так, ракета, летящая на высоте 12 км, где плотность в 4 раза меньше, чем у поверхности Земли, будет испытывать в 4 раза меньшее сопротивление, а на высоте 32 км плотность еще меньше и сопротивление уменьшится в 100 раз.

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 числа молекул в единице объема газа. На уровне моря давление столба воздуха высотой во всю толщу **атмосферной оболочки** принято равным $1,013 \cdot 10^5$ Па при 0°C (рис. 1).

Как частицы воды у дна океана испытывают большее давление, 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 массой всего воздуха, расположенного над ними.

Для практических целей можно принять, что в нижних слоях тропосферы на каждые 100 м высоты давление уменьшается приблизительно на 1010 Па.

Свойства атмосферы на одной и той же высоте непостоянны. Давление воздуха у поверхности Земли в наших широтах может колебаться примерно от $9,7 \cdot 10^4$ до $10,37 \cdot 10^4$ Па, а температура от -45 до $+35^\circ\text{C}$. Меняется плотность воздуха, а с ней и аэродинамические силы, действующие на тело. Из-за этого результаты испытаний одних и тех же самолетов или моделей, произведенных в разное время и различных местах, будут отличаться друг от друга. Поэтому для удобства аэродинамических расчетов и для возможности сравнения резуль-

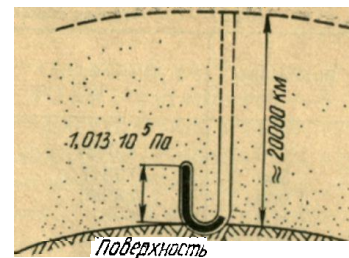


Рис. Давление атмосферы на уровне моря.

Таблица стандартной атмосферы

Г Высота, м	Давление, Па $p \cdot 10^5$	Температура, °C	Плотность кг/м ³
0	1,0137	4-15,0	1,225
500	0,9547	11,8	1,167
1 000	0,8986	8,5	1,111
1 500	0,794	2,0	1,006
2 000	0,701	-4,5	0,909
2 500	0,616	-11,0	0,819
3 000	0,540	-17,5	0,736
3 500	0,472	-24,0	0,660
4 000	0,410	-30,5	0,590
4 500	0,354	-37,0	0,525
5 000	0,307	-43,5	0,467
5 500	0,264	-50,0	0,413
6 000	0,226	-56,5	0,364
6 500	0,121	-56,5	0,194
7 000	0,055	-56,5	0,088
7 500	0,025	-56,5	0,040
8 000	0,011	-56,5	0,017
8 500	0,00001	-88,0	0,002
9 000		-63,9	
10 000			

татов испытаний условились считать, что для данной высоты давление, температура, плотность и скорость распространения звука остаются постоянными, не зависящими от времени и места проведения испытания. В соответствии с этим была разработана таблица *стандартной атмосферы*, в которой давление, температура, плотность воздуха, скорость звука близки к усредненным данным, соответствующим летнему состоянию атмосферы средних широт. По таблице на уровне моря принято: давление $p = 1,013 \cdot 10^5$ Па, температура $T = 15^\circ\text{C}$, плотность $\rho = 1,225$ кг/м³, скорость распространения звука $c = 341$ м/с. Изменение этих величин по высотам видно из приведенной таблицы стандартной атмосферы.

Атмосфера делится на тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу. Нижний слой атмосферы в умеренных широтах до высоты в среднем 11—16 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. Часть атмосферы, которая расположена над тропосфе-

рой и поднимается до высоты около 16—50 км, называется стратосферой.

Из таблицы видно, что температура на высоте 15 км около $-56,5^\circ\text{C}$, на высоте 80 км составляет -88°C . В стратосфере водяные пары присутствуют в ничтожных количествах. Изредка в ней появляются облака. В стратосфере наблюдаются сильные ветры. Нижние слои стратосферы достаточно изучены, особенно советскими аэронавтами и метеорологами. Известны героические полеты советских стратостатов «СССР» в 1933 г. на высоту 19 км, «Осоавиахим-1» в 1934 г. на высоту 22 км; полеты радиозондов конструкции профессора П. А. Молчанова на высоту 40—42 км с автоматически регистрирующей аппаратурой.

Для исследования высоких слоев атмосферы прибегают к различным методам. К ним относятся полеты метеорологических ракет, наблюдения за «падающими звездами» — метеорами (130—80 км) и полярными сияниями, полыхающими иногда на высотах до 1000—1200 км, и радиофизические методы.

2. ДВА УРАВНЕНИЯ АЭРОДИНАМИКИ

Течение газа или жидкости выражается двумя 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 ее поперечного сечения уменьшается и бег ускоряется.

Зададим себе вопрос: почему в узком месте река течет быстрее? Для этого поинтересуемся расходом воды, прошедшей через данное поперечное сечение за единицу времени. Если вода течет неразрывно и никуда 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, ведет себя поток жидкости

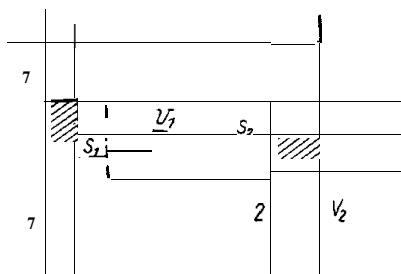


Рис. 2 К выводу уравнения неразрывности течения и уравнения Бернулли.

Объем воздуха, вошедший за 1 с в трубу, т. е. расход воздуха, подсчитать нетрудно. Для этого площадь поперечного сечения надо умножить на скорость и на плотность воздуха (рис. 2).

Таким образом, получим:

$$Qm_1 = S_1 v_1 \varrho,$$

где Qm_1 — расход (массовый); S — площадь поперечного сечения; v_1 — скорость; ϱ — плотность.

За это же время из трубы выйдет такой же объем воздуха, равный

$$Qm_2 = S_2 v_2 \varrho.$$

Приравнивая правые части уравнений, получим уравнение неразрывности:

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

Сократив на ϱ , будем иметь:

или

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

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

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 нее и выйти.

Уравнение Бернулли. Это уравнение получено выдающимся физиком и математиком, почетным членом Петербургской Академии наук Даниилом Бернулли (1700—1782). Этим уравнением широко пользуются при аэродинамических расчетах.

Уравнение Бернулли можно пояснить на примере суживающегося трубопровода, через который течет газ (см. рис. 2).

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 создается разностью давлений. Следовательно, давление в широкой части трубы должно быть больше, чем в узкой.

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

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

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

Работа втекающего газа, которая идет на преодоление сил давления, равна:

$$A_1 = F_1 x_1 = p_1 S_1 v_1 t,$$

где $F_1 = p_1 S_1$; 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 $F_2 = p_2 S_2$; p_2 — статическое давление в сечении 2—2. Кинетическая энергия втекающего газа равна:

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

где $m = S_1 v_1 \varrho t$ и ϱ — плотность газа.

Кинетическая энергия вытекающего газа равна:

$$\frac{mv_2^2}{2} = \frac{S_2 v_2 \varrho t v_2^2}{2}.$$

где $m = S_2 v_2 \varrho t$.

На основании закона сохранения энергии, приравняв полные энергии объемов втекающего и вытекающего газа, получим равенство:

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

после сокращения получим:

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 Н/м²).

и — скоростные напоры в сечениях 1—1 и 2—2 (измеряются в Н/м²).

Статическое давление можно представить как давление на поверхность (стенку), вдоль которой движется газ. Его можно измерить мерной трубкой, плоскость отверстия которой параллельна течению (рис. 3).

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

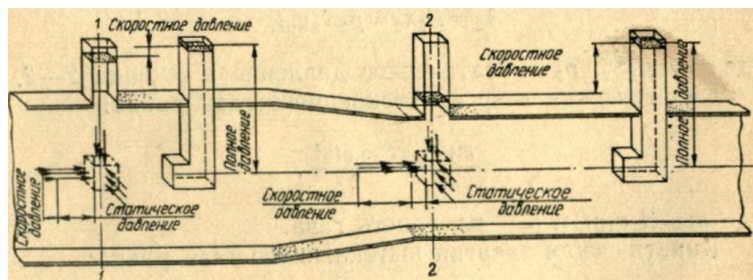


Рис. 3. Скорость потока в сечении 1—1 мала — статическое давление большое; в сечении 2—2 скорость увеличилась — статическое давление уменьшилось.

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

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

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

С увеличением скорости течения растет 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 примерах.

При встрече двух кораблей, идущих параллельным курсом, в пространстве между кораблями относительная скорость движения воды больше, чем снаружи, а поэтому статическое давление между кораблями будет меньше наружного; под



Рис. 4. Между листами бумаги давление меньше, чем снаружи, следовательно, они сближаются.

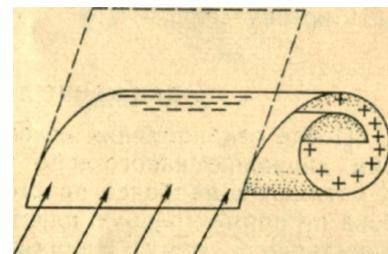


Рис. 5. Если дуть поверх свернутого листа бумаги, то под влиянием разности давлений он выпрямится.

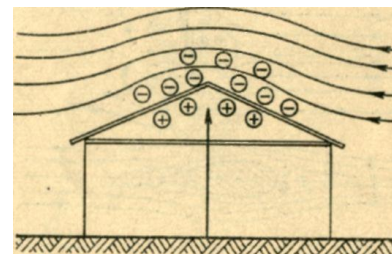


Рис. 6. Ветер, вызывая разность статических давлений, приводит к образованию подъемной силы у крыши.

действием этой разности давлений корабли начнут сближаться друг с другом, и может произойти столкновение.

То же самое вы можете проверить на таком опыте. Возьмите два листа плотной бумаги, изогните их полукругом и попробуйте дуть между ними. К своему удивлению, вы заметите, что листы будут не расходиться друг от друга, а сходиться (рис. 4).

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

В сильный ураган увеличение скорости воздуха над коньком крыши дома приводит к тому, что над крышей создается разрежение, а под крышей большое давление, в результате чего возникшая подъемная сила может сорвать крышу (рис. 6).

3. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ВОЗДУХЕ

После ознакомления со свойствами воздуха рассмотрим движение какого-либо тела в воздухе. Для этого обратимся к наиболее простому случаю — действию потока на прямоугольную пластинку, поставленную перпендикулярно к нему. Например, возьмем 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 F_c . Название «лобовое сопротивление» показывает,

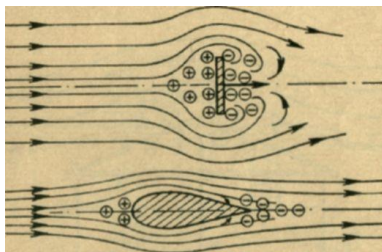


Рис. 7. Перед телом струйки воздуха расступаются, создавая сжатие воздуха; позади тела струйки смыкаются, создавая разрежение и вихри.

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 обла-

сти воздуха с несколько повышенным давлением, которая заставляет набегающие струйки воздуха заранее расступаться перед телом (рис. 7).

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

Лобовое сопротивление зависит от площади наибольшего поперечного сечения тела, перпендикулярного потоку, иначе, от площади миделя S (рис. 8, а). Чем больше у листа фанеры, самолета, 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 частиц воздуха будет встречать тело в каждый момент времени, следовательно, тем труднее ему двигаться.

Сопротивление тела, или лобовое сопротивление, зависит от плотности воздуха ρ , так как, чем плотнее воздух, тем больше частиц

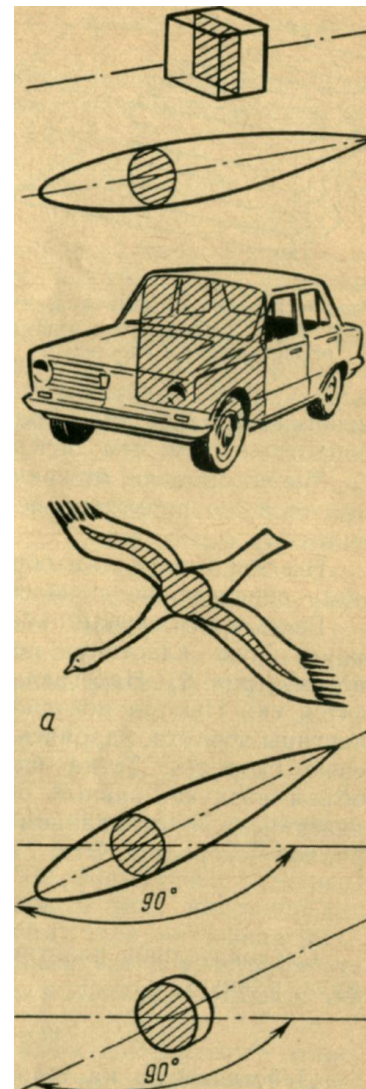


Рис. 8. а — площадь миделя различных тел; б — при одинаковых миделях сопротивление веретенообразного тела меньше, чем диска, в 50—80 раз.

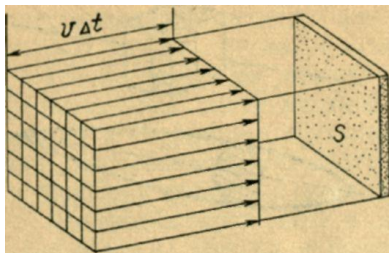


Рис. 9. Ньютон предположил, что весь объем набегающего воздуха останавливается пластиной.

воздуха находится в единице объема и тем труднее в нем двигаться.

Кроме перечисленных выше факторов (S , v , ρ), на сопротивление оказывает большое влияние форма тела. Например, если взять два тела с одинаковым миделем — веретенообразное тело и диск и обдуть их, как показано на рисунке 8, б, то можно убедиться, что

веретенообразное тело обладает в 50—80 раз меньшим сопротивлением, чем диск.

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

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

Рассмотрим случай набегающего потока на плоскую прямоугольную пластину, поставленную перпендикулярно потоку (рис. 9). Набегающий на пластину воздух тормозится ею. Ньютон исходил из того предположения, что частицы воздуха, ударяясь о пластину, полностью теряют свою скорость. Тогда пластина за $\Delta t = 1$ с остановит объем воздуха, равный объему прямоугольного параллелепипеда с основанием S и высотой $v\Delta t$, численно равной скорости. Этот объем воздуха будет равен:

$$V = Sv\Delta t.$$

Следовательно, пластина за 1 с остановит массу воздуха, равную

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

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

откуда

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

где $\Delta v = v$, так как по предположению скорость набегаю-

его потока при соударении с пластиной изменяется от v до 0.

Следовательно, сила лобового сопротивления будет численно равна изменению импульса набегающего потока:

$$F_c = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{mv}{\Delta t} = \rho \frac{v \Delta t}{\Delta t} = \rho v^2 S$$

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

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

Чем больше тормозится поток, тем больше коэффициент C_x . Коэффициент C_x получил название *коэффициента лобового сопротивления* тела. Он непостоянен 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 постоянный коэффициент принимают равным $1/2$, и тогда окончательно она запишется в следующем виде:

В этой формуле уже знакомая нам величина

легко определяется **опытным** путем, имеет размерность Н/м^2 и называется *скоростным напором*.

Пользуясь формулой лобового сопротивления, можно решать многие задачи, например: определить, удержите ли вы против потока лист фанеры ($S = 1 \text{ м}^2$), если будете с ним ехать на грузовом автомобиле со скоростью 40 км/ч (или 11,1 м/с), например, по Крестовому перевалу на Кавказе. Высота перевала 2382 м. В этой задаче площадь и скорость движения листа нам известны. Плотность на высоте 2382 м возьмем из таблицы стандартной атмосферы ($\rho = 0,97 \text{ кг/м}^3$), коэффициент лобового сопротивления — из данных продувки пластин, $C_x = 1,28$. Подставляя эти значения в формулу лобового сопротивления, получим:

$$F_c = C_x S \frac{\rho v^2}{2} = 1,28 \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot 0,97 \text{ кг/м}^3 \cdot \frac{11,1^2 \text{ м}^2/\text{с}^2}{2} \approx 76 \text{ Н}.$$

Можно 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 $\rho = 1,11 \text{ кг/м}^3$. Массу парашютиста с парашютом примем равной 88 кг.

Подставляя эти значения в формулу лобового сопротивления, получим:

$$880 \text{ Н} = 0,7 \cdot 60 \text{ м}^2 \cdot \frac{1,11 \text{ кг/м}^3 \cdot v^2}{2}.$$

Отсюда определится неизвестная вертикальная скорость восходящего потока:

$$\frac{2 \cdot 880 \text{ Н}}{1,11 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,7 \cdot 60 \text{ м}^2} \approx 6,1 \text{ м/с}.$$

Как видно, при скорости потока 6,1 м/с сопротивление купола парашюта уравнивает силы тяжести парашютиста и парашюта и спуск прекратится. А что, если вертикальная скорость потока станет чуть больше? Тогда

парашютист, вместо того чтобы спускаться, будет подниматься вверх.

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 современных самолетов отделывают весьма тщательно. При этом сила трения сильно зависит от степени завихренности обтекаемого потока. Незавихренный плавный поток называют ламинарным или слоистым потоком. В ламинарном потоке частицы воздуха текут плавно, не смешиваясь между собой, не переходя из слоя в слой. Завихренный поток принято называть турбулентным, он состоит из бесчисленного множества мелких вихрей. В турбулентном потоке происходит **перемешивание частиц** в направлении, перпендикулярном потоку. При турбулентном движении воздуха тела испытывают большее трение, чем при ламинарном.

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 прошедшим по реке пароходом на внешне спокойной глади еще долго остается расходящийся след. Цвет этой дорожки отличен от другой части воды и свидетельствует о наличии в ней множества еще не затухших вихрей, вызванных работой гребного винта и плохой обтекаемостью корпуса.

За летящим самолетом тоже остается след мелких и крупных вихрей. Парашютисты, прыгающие с самолетов, свидетельствуют о том, что, еще не раскрывая парашюта и находясь позади удаляющегося самолета, они испытывают сильные толчки и вращательное движение тела, так называемую **«болтанку»**.

Крупные воздушные вихри, срывающиеся на некоторых режимах полета с крыла самолета, могут быть опасными для хвостового оперения, особенно на больших скоростях полета, где их действие можно сравнить с уда-

Когда скорость потока соизмерима со скоростью распространения звука, коэффициент C_x начинает зависеть от скорости потока (см с. 29).

знаний

В П КАЗНЕВСКИЙ

**Аэродинамика
в природе и технике**

рами кирпичей, срывающихся с крыла и летящих на хвостовое оперение.

В практике самолетостроения бывали случаи, когда, казалось бы, проверенные серийные самолеты на некоторых режимах полета 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 **бафтинг**.

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

Зная причину возникновения лобового сопротивления, надо помнить, что при обтекании воздух воздействует на тело в виде сил давления и сил трения (рис. 10).

4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ

При рассмотрении действия воздуха на пластину, поставленную перпендикулярно 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 возьмем ту же пластину, но несколько наклоним ее к направлению потока (рис. 11, а). 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, там давление меньше, и наоборот. Следовательно, давление сверху пластины меньше, чем давление снизу. В результате разности давлений возникнет **аэродинамическая сила**, действующая под некоторым углом к направлению потока. Вспомним, что в случае симметричного обтека-

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

Аэродинамическая сила зависит от расположения пластины по отношению к направлению потока, т. е. от угла между направлением потока и плоскостью пластины.

Указанный угол означает, под каким углом пластина атакует воздух, или, что все равно, под каким углом поток воздуха атакует пластину (рис. 11, б). Этот угол в аэродинамике играет большую роль. Он получил название **угла атаки**.

Аэродинамическая сила \vec{F}_2 , как всякая сила, ха-

рактеризуется не только абсолютным значением, но и направлением, ее можно представить в виде

вектора. Воспользуемся сведениями из механики о том, что одну силу можно заменить двумя, действие которых равноценно действию одной силы. Для этого разложим 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 аэродинамической силы проведем параллельно выбранному направлению прямые линии, которые отсекут на этих направлениях два искомого вектора, т. е. две силы. Сила \vec{F}_1 , действующая перпендикулярно направлению потока, называется **подъемной силой**, а сила \vec{F}_2 , направленная параллельно потоку, называется **силой лобового сопротивления** или просто силой сопротивления. Подъемная сила действительно может поднимать тело, но не всегда;

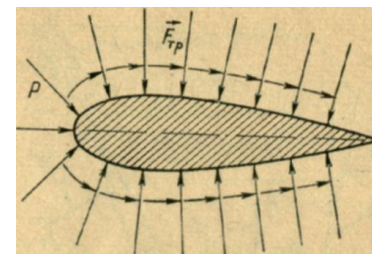


Рис. 10. Воздух воздействует на тело в виде сил давления и сил трения.

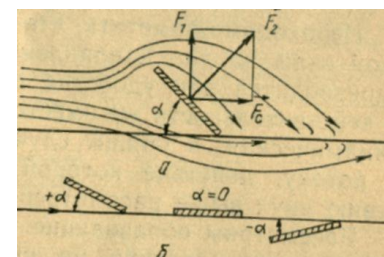


Рис. 11. а — при наклоне пластины обтекание становится несимметричным и верхние струйки ускоряются, а нижние замедляются; б — различные углы атаки пластины

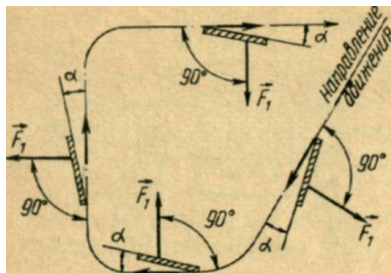


Рис. 12. Подъемная сила перпендикулярна направлению потока (на направлению движения).

Необходимо заметить, что разложение аэродинамической силы на два направления является условным, оно производится для удобства аэродинамических расчетов. В действительности же имеется только одна сила — аэродинамическая, в общем случае направленная наклонно к потоку, действие которой на тело равноценно действию двух выше рассмотренных сил.

Рассмотрим образование подъемной силы и силы лобового сопротивления на примере самолетного крыла.

Если рассечь крыло параллельно оси самолета, 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 количественно 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 еще другую разницу: пластина создает подъемную силу лишь при положительном угле атаки; крыло же с несимметричным профилем может создать подъемную силу при нулевом и даже несколько отрицательном угле атаки.

можно так ориентировать тело относительно потока, что она будет действовать в ином направлении и даже опускать тело (рис. 12). 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 то подниматься, то опускаться.

Распределение воздушных струй под крылом и над крылом показано на рисунке 13.

В крыле самолета различают хорду крыла, среднюю линию профиля, переднюю кромку, или ребро атаки, заднюю кромку, или ребро обтекания (рис. 14).

Хордой крыла называют отрезок прямой, соединяющий наиболее удаленные точки профиля крыла, т. е. начало 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 самолетостроении профили с относительной толщиной 3—5% принято называть тонкими, а профили с толщиной 14—18% — толстыми. Тонкие крылья применяются в скоростной авиации, толстые — в тихоходной.

Хорда крыла относительно потока воздуха наклонена под некоторым углом. Этот угол показывает, в каком положении крыло встречает или атакует поток, а поэтому, как и в случае обтекания плоской пластины, он называется углом атаки α .

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

На летящем под некоторым углом атаки крыле самолета, так же как на плоской пластине, поставленной под углом, возникает аэродинамическая сила F_2 . Раскладывая эту силу нормально к потоку и по потоку, получим

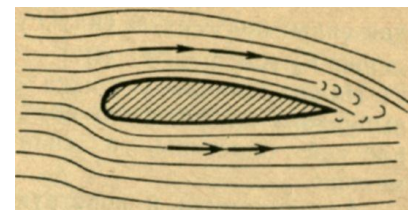


Рис. 13. Скорость воздушных струек над крылом возрастает, под крылом уменьшается.

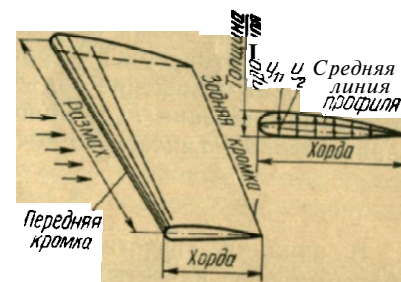


Рис. 14. Геометрические характеристики крыла.

две силы: подъемную силу \bar{F}_1 и силу лобового сопротивления R_c (см. рис. 11, а).

Из-за наличия у крыла самолета плавного двояковыпуклого профиля его подъемная сила больше, чем у плоской пластины, а сила лобового сопротивления меньше.

Аэродинамики и конструкторы самолетов стремятся, чтобы крыло самолета при малом лобовом сопротивлении имело большую подъемную силу. В этом случае для продвижения самолета требуется меньшая мощность двигателя. В идеале хотелось бы иметь только подъемную силу и никакого лобового сопротивления. Но это невозможно. Поэтому всеми средствами стараются уменьшить лобовое сопротивление. Характеристикой качества профиля служит отношение подъемной силы \bar{F}_1 к силе лобового сопротивления R_c . Данное отношение получило название *аэродинамического качества* или просто *качества*:

$$K$$

В авиации качество играет исключительную роль. Максимальное качество двояковыпуклого профиля больше максимального качества плоской пластины. У лучших профилей оно более 20—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 подъемной силы имеет много общего с формулой силы лобового сопротивления и равна:

$$F = \rho S v^2 C_y$$

где ρ — плотность воздуха; S — площадь крыла; v — скорость полета; C_y — коэффициент подъемной силы.

Эта формула получена экспериментальным путем. Подъемная сила зависит от формы профиля. Например, у плоской пластины подъемная сила меньше, чем у двояковыпуклого профиля. Эта особенность формы учитывается некоторым безразмерным коэффициентом, который называют коэффициентом подъемной силы и обозначают C_y .

Подсчитать теоретически коэффициент C_y так же трудно, как и коэффициент C_x . Поэтому его находят опытным путем, продувая модели крыльев в аэродина-

мической трубе, и с помощью аэродинамических весов измеряют подъемную силу. Зная эту силу, плотность воздуха, площадь крыла и скорость потока и используя формулу подъемной силы, можно определить коэффициент подъемной силы C_y :

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

Теоретическая формула подъемной силы впервые получена Н. Е. Жуковским в 1906 г. Он доказал, что подъемная сила для единицы размаха крыла пропорциональна плотности воздуха, скорости полета и циркуляции скорости вокруг профиля крыла:

$$F_1 = \rho v_\infty \Gamma,$$

где ρ — плотность воздуха; v_∞ — скорость потока вдали от крыла или скорость полета; Γ — циркуляция скорости вокруг профиля крыла.

В аэродинамических расчетах удобнее пользоваться не значениями подъемной силы и силы лобового сопротивления, а их коэффициентами C_y и C_x .

Поэтому при исследованиях в аэродинамических трубах данные продувки моделей представлены в виде графиков с коэффициентами C_x , C_y .

Распространенными графиками аэродинамических характеристик являются:

а) график зависимости изменений коэффициента лобового сопротивления C_x от изменения угла атаки α (рис. 15, а);

б) график зависимости изменения коэффициента подъемной силы C_y от изменения угла атаки α (рис. 15, б).

Удобно эти два графика представить на одном и показать, как изменяется коэффициент C_y от изменения коэффициента C_x . На графике наносятся углы атаки, которые соответствуют данным коэффициента C_x и C_y . Такая кривая с разметкой углов атаки носит название *поляры* *Лилиенталя* или просто *поляры* (рис. 15, в).

Из графика изменений C_y с изменением угла α видно, что коэффициент подъемной силы увеличивается до определенных углов атаки, обычно 16—20°, далее он резко падает. Эти углы называются *критическими*, потому что на таких углах атаки плавное обтекание профиля крыла

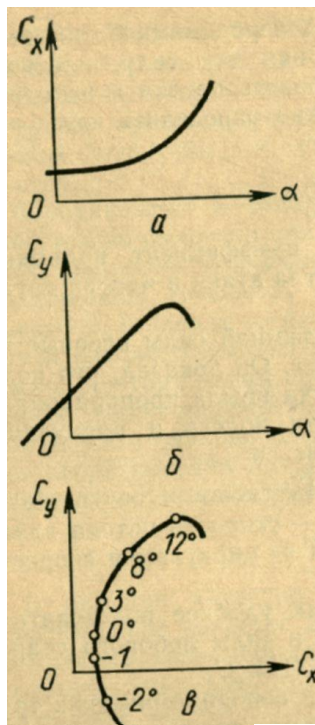


Рис. 15. а — график, показывающий рост коэффициента лобового сопротивления при увеличении угла атаки крыла; б — график, показывающий рост и падение коэффициента подъемной силы при увеличении угла атаки крыла; в — ПОЛЯРЫ Лиллентяля.

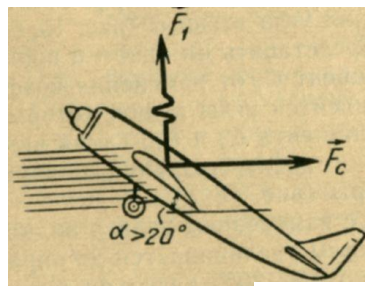


Рис. 16 Срыв плавного обтекания крыла при полете на больших углах атаки.

нарушается, появляется срыв плавного обтекания, подъемная сила крыла резко уменьшается (рис. 16), рули перестают слушаться, и самолет может, проваливаясь в воздухе, свалиться на крыло и войти в штопор. Если это произойдет с самолетом на большой высоте, то это поправимо, его можно успеть выравнять, если же при посадке, то неизбежны печальные последствия.

5. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ НА БОЛЬШИХ

Все, что было рассказано про лобовое сопротивление и подъемную силу, справедливо для обтекания тел с малыми дозвуковыми скоростями, примерно до 100 м/с. При больших скоростях движения, близких к скорости звука и выше, обтекание тел имеет свои особенности. Эти особенности состоят в том, что на больших скоростях на характер обтекания тела начинает оказывать влияние сжимаемость воздуха.

Рассмотрим, чем отличается обтекание тел в дозвуковом и сверхзвуковом потоках (рис. 17). 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, которые могут быть слышимы человеческим ухом. Заметим еще, что возмущения давления воздуха, производимые, например, головными связками человека, крылом самолета, 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 вперед от одних частиц к другим со скоростью звука. Эти возмущения опережают движущееся тело. При этом тело не встречает большого сопротивления. Это дозвуковое обтекание. А что произойдет, 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 уплотненного воздуха.

Летающее со сверхзвуковой скоростью тело оставляет позади себя все новые и новые звуковые волны (рис. 18). Ранее возникшие волны успевают расшириться, и радиус их возрастает. Эти бесчисленные сферические волны звука, складываясь, образуют за телом конус возмущений, в вершине которого находится острие самого тела. Чем скорость движения больше скорости звука, тем острее этот конус.

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



Рис. 17. Схема обтекания тела потоком: а — дозвуковое обтекание; б — сверхзвуковое обтекание.

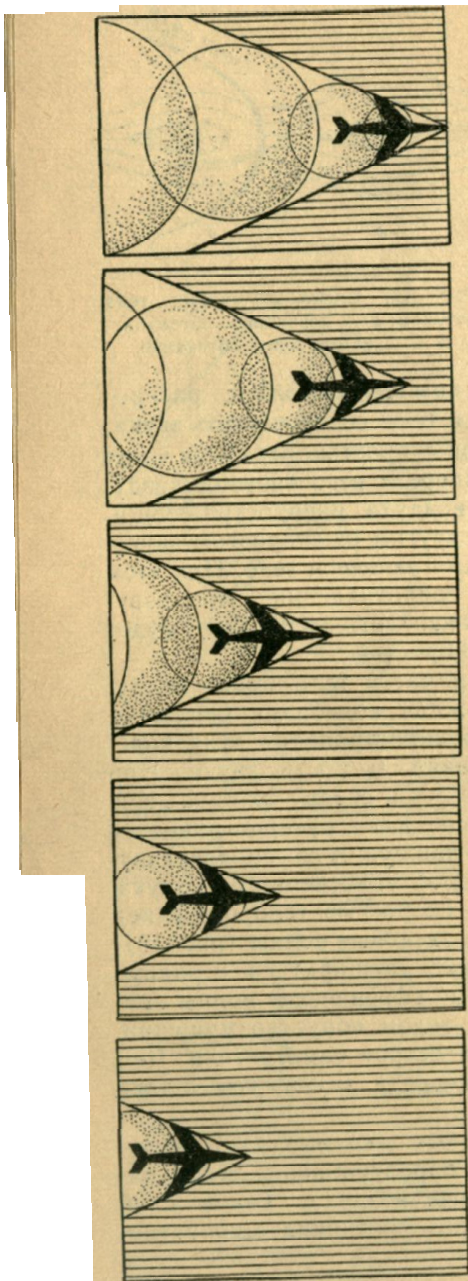


Рис. 18. Полет со сверхзвуковой скоростью.

В головной части конуса возмущений, на его поверхности, все время будет происходить удар набегающих частиц воздуха. В месте удара возникнет 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**.

В скачке уплотнения давление и температура воздуха скачкообразно возрастают. В этой зоне уплотненного воздуха энергия движения тела переходит в тепловую энергию. Таким образом, аэродинамика больших скоростей учитывает и тепловые явления, происходящие в потоке газа. За скачком уплотнения давление хотя и понижается, но все же остается повышенным (рис. 19). 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 атмо-

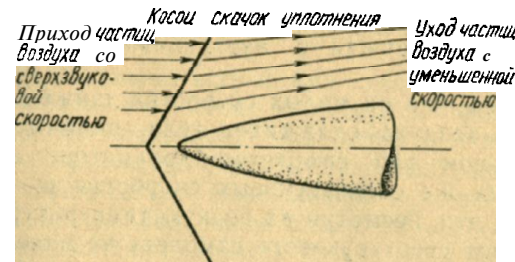


Рис. 19. Обтекание заостренного тела сверхзвуковым потоком.

сферу, образуется мощный скачок уплотнения воздуха, в котором сжатие столь велико, что газы в нем раскаляются, нагревается и сам метеорит и испускается тот яркий свет, который мы видим, наблюдая «падающие звезды».

Появление на больших скоростях волнового сопротивления воздуха зависит не от абсолютного значения скорости, а от отношения скорости полета к скорости звука. Отношение скорости полета к скорости звука названо числом Маха или сокращенно числом полета M .

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

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

Из-за возникновения волнового сопротивления формулы, по которым подсчитываются лобовое сопротивление и подъемная сила, уточняются соответствующими изменениями коэффициента лобового сопротивления C_x и коэффициента подъемной силы C_y .

Эти коэффициенты, как мы видели раньше (см. с. 17 и 24), на малых дозвуковых скоростях порядка 100 м/с не зависели от скорости полета, на скоростях же полета, больших 200 м/с, вернее на скоростях полета, для которых число $M = 0,6—0,8$ и более, они зависят от числа M . Эти коэффициенты определяются опытным путем при продувке моделей в скоростных аэродинамических трубах.

6. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

Полет в диапазоне чисел $M = 0,6—0,9$ принято называть полетом с околозвуковыми скоростями.

Полет с числом $1-4$ называется сверхзвуковым полетом. Он сопряжен с аэродинамическим нагревом самолета.

Мы знаем, что на малых скоростях движения встречный поток воздуха охлаждает тело, например воду в автомобильном или **самолетном** радиаторе двигателя. На больших же сверхзвуковых скоростях полета получается так, что, несмотря на низкую температуру стратосферы, пилот сверхзвукового самолета не имеет никакой возможности впустить внутрь самолета хотя бы небольшую порцию холодного воздуха. Для этого он должен затормозить воздух, набегающий на самолет, а при этом связанные с торможением превращения энергии движения воздуха обязательно проявляются в его нагревании.

Торможение потока воздуха передней частью фюзеляжа или крыла вызывает сжатие и нагревание воздуха. Частицы воздуха, находящиеся в самом центре потока, налетающие на **передние** части самолета, испытывают полное торможение. Кинетическая энергия этих частиц переходит в потенциальную. **Температура**, которую при этом будет иметь воздух, называется **температурой** торможения, а точка, в которой скорость воздуха принимает нулевое значение, называется **критической** точкой.

Температуру торможения можно определить по формуле:

$$T_{\text{торм}} = T_{\text{абс}} + \frac{v^2}{2000},$$

где $T_{\text{абс}}$ — абсолютная температура воздуха, К; v — **скорость** потока (самолета), м/с.

По этой формуле при скорости самолета, например, 1000 м/с и температуре окружающей среды -40°C (233 К) температура торможения равна:

$$T_{\text{торм}} = 233 + \frac{1000^2}{2000} = 733 \text{ К}.$$

Видно, что при увеличении скорости самолета сильно повышается температура торможения. Температура же поверхности самолета будет несколько ниже температуры торможения вследствие отвода некоторого количества теплоты путем излучения и некоторого количества теплоты внутрь самолета.

Полет называется гиперзвуковым при $M \geq 4-5$ и бо-

лее. Он характеризуется еще большим нагревом летательного аппарата.

С гиперзвуковыми скоростями летают некоторые экспериментальные самолеты, например с числом полета $M \approx 6$. Нагрев поверхности рассчитан с учетом отвода некоторого количества теплоты путем излучения в окружающее пространство. Наибольшую температуру имеют передние заостренные части самолета — нос фюзеляжа и носок крыла. Нижняя часть поверхности нагрета **больше**, чем верхняя, что объясняется наличием некоторого положительного угла атаки самолета.

С гиперзвуковыми скоростями летают космические летательные аппараты при входе в верхние слои атмосферы. Такой вход осуществляется со скоростью приблизительно 8000 м/с, что соответствует **числу** полета $M \sim 28$.

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 наивыгоднейшие формы самолетов, вертолетов и ракет с тем, чтобы при наименьшей затрате мощности двигателя они могли поднять в воздух наибольший груз и совершить полет быстрее, экономичнее и дальше.

1. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ТРУБЫ

Часть аэродинамики, изучающая движение тел в воздухе непосредственно опытным путем, 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 ученым К. Э. Циолковским и названа им «воздуходувкой». Позднее Н. Е. Жуковским были созданы аэродинамические трубы (лаборатории) при МВТУ, сыгравшие большую роль в развитии русской авиации. В 1918 г. при поддержке В. И. Ленина Н. Е. Жуковский с группой своих учеников создает 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 самолетной и ракетной техники во многом обязано исследованиям, проводимым в аэродинамических трубах. Все вновь проектируемые самолеты, ракеты, вертолеты перед тем, как быть построенными, обязательно проходят стадию тщательного исследования в аэродинамических трубах. Из этого ясно, с какими трудностями приходилось сталкиваться **первым** конструкторам самолетов до постройки аэродинамических труб. Аэродинамические трубы стали верными помощниками ученых и конструкторов.

Для аэродинамических исследований изготавливают из дерева или металла в уменьшенном масштабе модель будущего самолета или другого аппарата и продувают ее в **аэродинамической** трубе, в которой **используется** принцип обратимости движения. В них движущийся поток воздуха набегае на неподвижно закрепленное тело.

Практически исследовать обтекания на движущемся теле, **например** на крыле летящего **самолета**, в большинстве случаев затруднительно. Проще крыло закрепить неподвижно и на него направить поток воздуха. При этом картина обтекания не **меняется** и значения 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 все равно движется ли тело в неподвижной среде или, наоборот, среда движется относительно неподвижного тела, называется принципом обратимости.

Ознакомимся с устройством простейшей аэродинамической трубы (рис. 20). Она состоит из открытой с двух сторон трубы переменного сечения. Ее 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, создает в трубе искусственный воздушный поток. В этом потоке, в рабочей части трубы, помещается испытываемое тело, например модель самолета в уменьшенном масштабе. Модель крепится к специальным весам (см. цв. вклей-

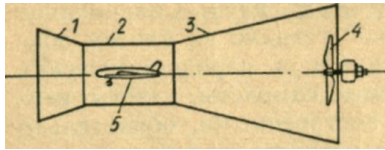


Рис. 20. Схема простейшей аэродинамической трубы (1 — всасывающий коллектор; 2 — рабочая часть трубы; 3 — диффузорная часть; 4 — вентилятор с электромотором; 5 — испытываемая модель).

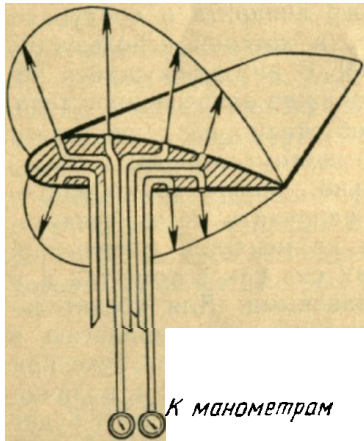


Рис. 21. Схема замера распределения давления по поверхности крыла.

Помимо измерения аэродинамических сил и моментов, действующих на модель, в аэродинамических трубах можно определить распределение давления воздуха на отдельных участках поверхности модели, например крыла (рис. 21). Для этого в теле испытываемой модели крыла прокладываются тоненькие резиновые или металлические трубочки, которые с одной стороны подводятся к отверстиям, просверленным на поверхности крыла, где желательно измерить воздушное давление, с другой стороны присоединяются к обычным манометрам воздушного давления.

Кроме того, если стенка рабочей части трубы выполнена из прозрачного материала, то через нее можно видеть и фотографировать картину обтекания (см. цв. вклейку I, 2). На ней видно, в каком месте модели нарушается плавное течение струек воздуха и как оторвавшиеся от тела струйки образуют вихри.

ку I, 1). При наличии в трубе воздушного потока возникающие на модели аэродинамические силы будут передаваться весам. Они и покажут значение действующих сил. Эти весы называются аэродинамическими. Они измеряют силу лобового сопротивления, подъемную 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 измерения аэродинамических сил и моментов, действующих на модель, в аэродинамических трубах можно определить распределение давления воздуха на отдельных участках поверхности модели, например крыла (рис. 21). Для этого в теле испытываемой модели крыла прокладываются тоненькие резиновые или металлические трубочки, которые с одной стороны подводятся к отверстиям, просверленным на поверхности крыла, где желательно измерить воздушное давление, с другой стороны присоединяются к обычным манометрам воздушного давления.

Рис. 22. По поведению наклеенных шелковинок и переносного шарика ваты можно судить о плавности обтекания.

Для наглядности к воздушному потоку аэродинамической трубы подмешивают цветной дым или на испытываемую модель наклеивают длинные цветные шелковинок (рис. 22). По поведению дыма или шелковинок судят о характере обтекания. Для тех же целей можно сделать аэродинамический шуп — 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 самолеты, вертолеты и автомобили (рис. 23). В этом случае аэродинамические трубы называются натурными и достигают в своей рабочей части

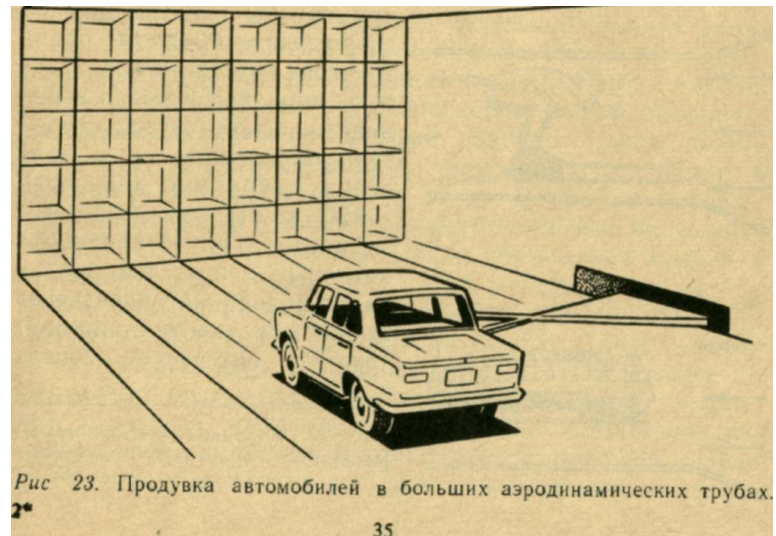


Рис. 23. Продувка автомобилей в больших аэродинамических трубах.

диаметра более 20 М. Скорость воздушного потока в таких трубах может достигать 200—300 км/ч.

В лабораториях с помощью аэродинамических труб производятся большие исследовательские работы по отысканию наиболее совершенных форм будущих самолетов, ракет, вертолетов, парашютов и автомобилей. С каждым годом все больше растет круг разнообразных опытов в аэродинамических трубах, и к их услугам прибегают не только авиастроители. Строители метро определяют сопротивление, оказываемое воздухом при движении поезда в тоннеле, а также степень вентиляции вагонов; спортсмены-горнолыжники с помощью моделей подробнее изучают воздушные силы, действующие на лыжника при спуске с трамплина со скоростью ~100 км/ч; орнитологов интересуют результаты продувок чучел в аэродинамической трубе; строители определяют силы давления урагана (скорость — 120 км/ч) на высотные здания; проектировщики ветряных двигателей продувают модели ветряков; специалистов вентиляционной техники интересует совер-

Рис 24. Аэродинамические трубы позволяют продувать различные модели.

шение их вентиляторов (рис. 24).

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

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

Способ исследования обтекания с помощью летающей модели заключается в следующем. Изготавливается деревянная или металлическая модель будущего самолета, причем масштаб берется значительно больший, чем для продувки в аэродинамической трубе. Модель оборудуется комплектом саморегистрирующей аппаратуры, записывающей по времени возникающие в полете ускорения, скорость, высоту, угол атаки, давления в отдельных точках модели и т. д. Летающая модель, подвешенная под самолет, поднимается им на высоту 10—12 км. С этой высоты летчик сбрасывает модель в свободный полет (рис. 25). Под действием силы тяжести она планирует или пикирует с очень большой скоростью, близкой к скорости звука. Если модель оснащена сравнительно небольшим ракетным двигателем, то она может разгоняться, достигая сверхзвуковых скоростей. Во время полета модели приборы постоянно записывают свои показания. В конце полета движение модели замедляется, и она может спуститься на землю на па-

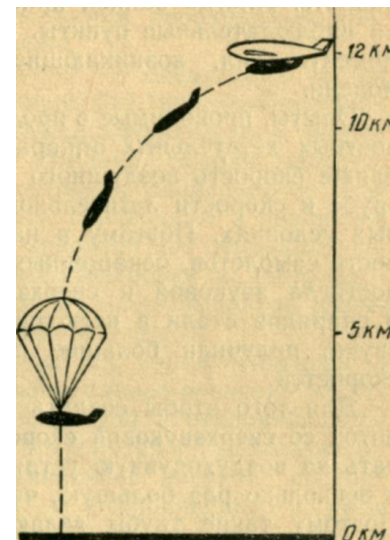


Рис. 25. Исследование обтекания с помощью летающих моделей

рашьте. Иногда записи приборов передаются по радио на наблюдательные пункты. По ним определяют силы и моменты сил, возникающие в полете 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** самолетов, оснащенных 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 воздухоподводящую установку громадную мощность, в несколько раз большую, чем в трубах обычного типа. Поэтому такие трубы делаются меньшего поперечного сечения, 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, так как малейшая неровность на стенках трубы может быть источником преждевременного возникновения уплотнения воздуха.

2. САМОЛЕТЫ

Самолет изобретен в 1882 г. русским исследователем и изобретателем А. Ф. Можайским.

Перед постройкой самолета 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 нем в воздух. Змей запускался в воздух с помощью быстро мчавшейся тройки лошадей.

Интересно отметить, что основные части **современного** самолета — лодка-фюзеляж, колесное шасси и др. — впервые были представлены в самолете А. Ф. Мо-

жайского. С тех пор они являются необходимой принадлежностью каждого самолета.

Современный самолет состоит из следующих частей (см. цв. вклейку II, 2): *крыльев (1)*, поддерживающих самолет в воздухе; *двигательной установки (2)*, винтомоторной или реактивной, тянущей самолет вперед; *фюзеляжа (3)* (корпуса, в котором размещаются экипаж, грузы, командные рычаги управления и различное **оборудование**). К фюзеляжу крепятся все основные части самолета: крылья, хвостовое оперение и часто двигательная установка и шасси. У гидросамолетов фюзеляж выполняется в виде закрытой лодки.

Хвостовое оперение состоит из *горизонтального* и *вертикального* оперения. Горизонтальное оперение делится на неподвижный *стабилизатор (4)* и отклоняющиеся *рули высоты (5)*. Рули высоты крепятся к стабилизатору на шарнирных опорах. Вертикальное оперение состоит из *неподвижного киля (6)* и отклоняющегося *руля направления (7)*. Руль направления крепится к килю на шарнирных опорах. Горизонтальное и вертикальное оперение обеспечивает самолету устойчивое движение в воздухе.

Элероны (8) служат органом *поперечного управления* самолетом.

Шасси (9) состоит из двух или нескольких главных колес и одного небольшого колеса, размещающегося в носу самолета. Шасси служит для поддержания самолета на стоянке, для пробежки самолета при посадке и для разбега при взлете.

Главной частью самолета является крыло. Работающий реактивный двигатель или винт винтомоторной установки тянет самолет вперед. Крыло при поступательном движении приобретает подъемную силу, которая **позволяет** самолету держаться и подниматься в воздухе. Подъемная сила на крыльях возникает за счет разности давлений воздуха над крылом и под крылом. В поперечном сечении крыло имеет профиль, показанный на рисунке 14.

Подъемная сила и лобовое сопротивление во многом зависят от формы профиля.

У самолета бывает одно крыло и реже два. По числу имеющихся крыльев самолеты делятся на бипланы и монопланы. (По-гречески «**би**» — два, «**моно**» — один). У биплана одно крыло помещается под другим на неко-

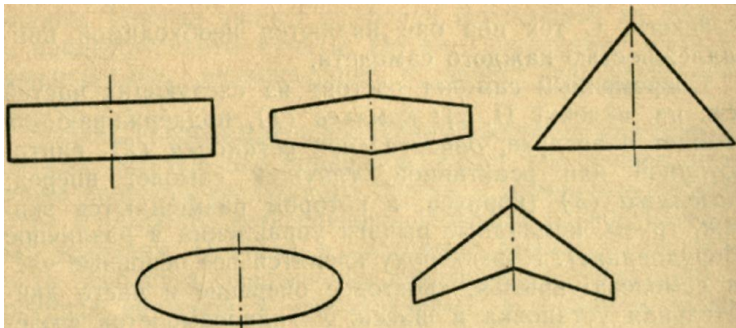


Рис. 26. Очертание крыльев самолета.

тором расстоянии, как, например, у прославленного учебного самолета «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.

Монопланная схема аэродинамически более выгодна и в настоящее время является главной. У биплана имеется «вредное» аэродинамическое влияние одного крыла на другое, уменьшающее подъемную силу **нижнего** крыла. У моноплана оно отсутствует.

В плане (вид сверху на самолет) крыло самолета может иметь различную форму (рис. 26): прямоугольную, трапециевидную, треугольную, эллипсовидную и стреловидную. Очертание крыла в плане влияет на лобовое сопротивление. При прочих равных условиях на малых скоростях полета эллипсовидное крыло является **наивыгоднейшим**, затем идет трапециевидное, и наихудшими аэродинамическими данными располагает прямоугольное крыло. Но в изготовлении оно проще, чем крылья с криволинейными очертаниями.

При дозвуковых скоростях **аэродинамически** выгодно иметь крылья с большими **удлинениями**. 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 **сопротив-**

Рис. 27. Под действием аэродинамических сил крыло в полете заметно прогибается.

Рис. 28. В полете под крылом образуется разрежение, стремящееся отсосать обшивку.

ление значительно уменьшается у крыльев с большим удлинением. У хорошо летающих птиц: чаек, буревестников, альбатросов и ласточек — крылья имеют значительные удлинения.

У самолетов, предназначенных для дальних полетов, крылья выполняются с большим удлинением; так, например, у рекордного самолета «АНТ-25», на котором советские летчики В. П. Чкалов и М. М. Громов летали через Северный полюс в Америку, крыло самолета имело удлинение, близкое к 13, в то время как обычно самолеты имеют удлинения, равные 5—8.

Для прочности самолетные крылья нельзя изготавливать с весьма большими удлинениями, так как под действием аэродинамических сил такие крылья сильно прогибаются.

Прогибы конца крыла у существующих больших самолетов в полете достигают более полуметра. Если смотреть на крыло из кабины самолета (рис. 27), то эти прогибы хорошо видны при полете в спокойном воздушном потоке.

У скоростных самолетов волновое сопротивление намного больше индуктивного, поэтому удлиненные крылья **перестают** давать преимущества.

Аэродинамические силы — подъемная 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 передается на каркас крыла.

В полете над крылом образуется разрежение, стремящееся **отсосать—оторвать** обшивку от крыла (рис. 28). Естественно, обшивка должна надежно крепиться. Крепление обшивки производится крепежными соединениями — потайными заклепками или точками контактной

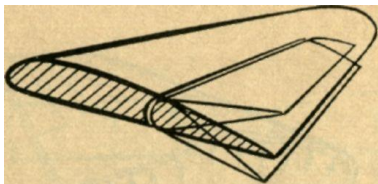


Рис. 29. Элерон является частью профиля крыла.

ношении ее жесткости, плавности и гладкости. Многим известно, как плавно и гладко выполняется поверхность современного легкового автомобиля. Поверхность же самолетных крыльев должна быть еще более плавной и гладкой, чем у автомобиля.

Крыло несет на себе элероны, они служат органами поперечного управления самолета и имеют вид маленьких крылышек. В поперечном сечении элерон имеет форму, являющуюся как бы продолжением профиля крыла (рис. 29). Элерон отклоняется вверх и вниз на $12\text{--}25^\circ$ соответственно, сильно изменяя кривизну профиля крыла, а следовательно, и подъемную силу правого или левого крыла самолета.

Перейдем 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 заклепок.

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

Как известно, подъемная сила самолета создается крыльями. Фюзеляж же и хвостовое оперение с аэродинамической точки зрения являются «ЛИШНИМИ», так как они значительно увеличивают сопротивление самолета. Но как от них освободиться? Ведь фюзеляж нам нужен для размещения экипажа, грузов и т. д. Хвостовое оперение нужно для обеспечения устойчивости полета и для управления. Оказывается, от них можно освободиться. Представьте себе, что перед вами большой самолет, у которого наибольшая толщина крыла равна росту человека и в нем можно ходить вдоль, как по коридору.

электросварки, не выступающими в поток и не нарушающими плавное обтекание потоком воздуха профиля крыла.

По аэродинамическим соображениям к обшивке современных скоростных самолетов предъявляются строгие требования в от-

Тогда экипаж и грузы можно разместить в крыле, а рули хвостового оперения перенести на крыло. Такой самолет, внешне состоящий только из одного крыла, носит название «летающее крыло». В нем нет «лишних» частей, сопротивление воздуха сведено до минимума.

С аэродинамической точки зрения самолет «летающее крыло» является весьма заманчивым, но практически его трудно осуществить. Впервые в СССР опытные небольшие самолеты типа «летающее крыло» успешно строил советский конструктор Б. И. Черановский (рис. 30).

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

После ознакомления с работой и аэродинамическими формами основных частей самолета рассмотрим самый распространенный вид полета самолета.

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

Рассмотрим совокупность всех сил, возникающих при полете самолета (см. цв. вклейку II, 1 и рис. 31).

При полете самолет должен преодолевать силу сопротивления воздуха, для этого ему необходима сила тяги.

Наряду с появлением силы лобового сопротивления у крыла самолета возникает подъемная сила. В горизонтальном равномерном полете подъемная сила направлена против силы тяжести самолета и уравновешивает ее.

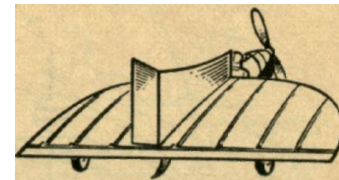


Рис. 30. Бесхвостый самолет Б. И. Черановского.

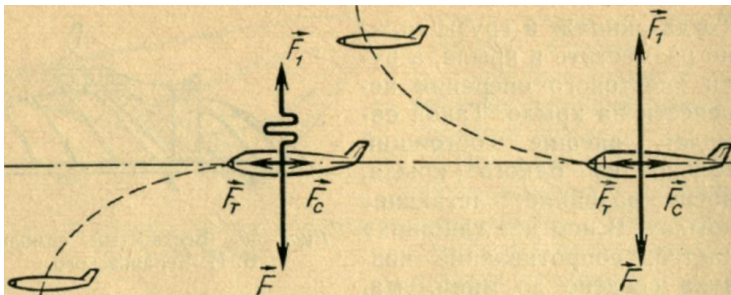


Рис. 31. Неравенство подъемной силы и силы тяжести ведет к отклонению полета от горизонтали.

Таким образом, мы видим, что сила тяги уравнивает силу лобового сопротивления, а подъемная сила уравнивает силу тяжести самолета, т. е. все силы, действующие на самолет в установившемся полете, находятся в равновесии. Но равновесие сил еще недостаточно для того, чтобы летящему самолету придать в пространстве то или иное постоянное положение.

Необходимо еще равенство моментов всех сил. Напомним, что момент есть произведение действующей силы на ее плечо. Он оказывает на тело поворачивающее действие.

Если сумма моментов всех сил равна нулю, т. е. моменты, действуя в разные стороны, взаимно уравниваются 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 самолет вращается вокруг своего центра тяжести. Вращение самолета можно разложить на повороты вокруг трех осей. Для этого мысленно свяжем самолет с прямоугольной системой координат x, y, z , с началом в центре тяжести самолета (рис. 32).

Ось Ox направим вдоль оси фюзеляжа и назовем продольной осью самолета.

Ось Oy проведем через центр тяжести самолета перпендикулярно плоскости xOz и назовем осью поворотов.

Ось Oz направим вдоль размаха крыла перпендикулярно плоскости xOy и назовем поперечной осью.

В летательных аппаратах — самолете, вертолете и ракете — принято называть:

поворот вокруг продольной оси Ox *креном*,
поворот вокруг оси поворотов Oy *курсом*,
поворот вокруг поперечной оси Oz *тангажем*.

У самолета, 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* самолета.

Устойчивость и управляемость — понятия **противоположные**. Чем устойчивее самолет, тем труднее его свернуть с пути, и наоборот. Устойчивость и управляемость у самолета должны быть соблюдены в определенном 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 самолеты не отличались достаточной устойчивостью и управляемостью. Потребовалось порядочно времени, чтобы полет на них стал более или менее безопасен и не являлся бы исключительным событием.

Самолету необходимо устойчиво летать и управляться.

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

В полете на поверхность самолета действует множество аэродинамических сил. Принято все 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.

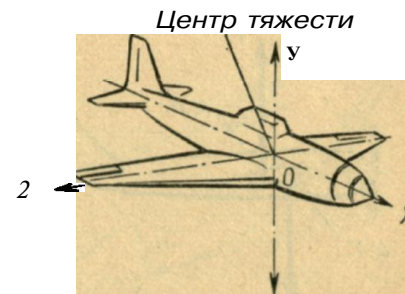


Рис. 32. Три оси самолета.

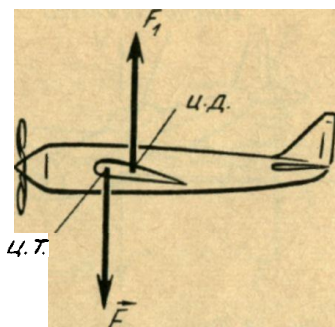


Рис. 33. Две замечательные точки у самолета: центр тяжести (ц. т.) и центр давления (ц. д.).

нельзя сказать про центр тяжести. Положение центра тяжести более или менее постоянно и зависит от расходования горючего из бака. Положение центра давления зависит от угла атаки и скорости полета. Если не принять мер, то на некоторых режимах полета центр давления может оказаться впереди центра тяжести и самолет потеряет устойчивость. Все искусство обеспечения устойчивости самолета заключается в том, чтобы правильно задать положение центра давления и ограничить его перемещение на различных режимах полета.

Необходимое положение центра давления на самолете достигается соответствующим расположением крыла, хвостового оперения и центра тяжести. Это легко понять на таком примере.

Рассмотрим полет реактивного снаряда. Аэродинамическая форма этого снаряда крайне проста и состоит из корпуса в виде заостренного 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. 34).

Если порыв ветра отклонит первый снаряд и увеличит

В самолете можно мысленно представить две точки: центр давления и центр тяжести (рис. 33).

От взаимного расположения этих точек зависит устойчивость самолета. В устойчивом самолете центр давления лежит позади центра тяжести. У неустойчивого самолета центр давления лежит впереди центра тяжести. Центр давления капризен. В полете он может «гулять», т. е. менять свое положение, чего

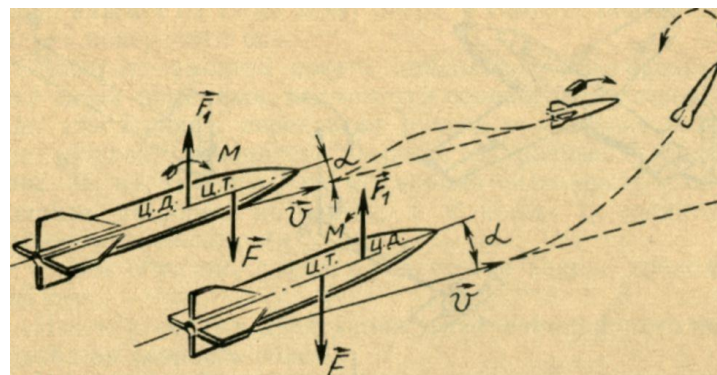


Рис. 34. При расположении центра тяжести позади центра давления летающий аппарат неустойчив — снаряд перевернется

его угол атаки, то аэродинамическая сила будет стремиться уменьшить отклонение и снаряд вернется в первоначальное положение. Такой снаряд называется устойчивым.

Если порыв ветра отклонит второй снаряд и увеличит его угол атаки, то аэродинамическая сила будет стремиться увеличить отклонение. Нарастающий поворот приведет к тому, что снаряд перевернется. Такой снаряд называется неустойчивым. То же самое произойдет и с самолетом, если у него центр давления аэродинамических сил от крыла, хвоста и фюзеляжа будет приложен впереди центра тяжести. Во избежание этого у самолета добиваются положения центра давления позади центра тяжести, что достигается размером и расположением хвостового оперения. У такого самолета при порывах ветра аэродинамическая сила ликвидирует начавшееся отклонение, и самолет сам приходит в первоначальное положение.

Что значит управляться? Это значит лететь туда, куда направляет самолет летчик. И лететь очень точно.

Потерять управление самолетом — это значит потерять все. При потере управления самолет становится таким же опасным, как мчащийся автомобиль, потерявший рулевое управление.

Как управляется самолет? Самолет в полете управляется движением рулей, на которых возникают аэродинамические силы. У самолета три руля: руль поворо-

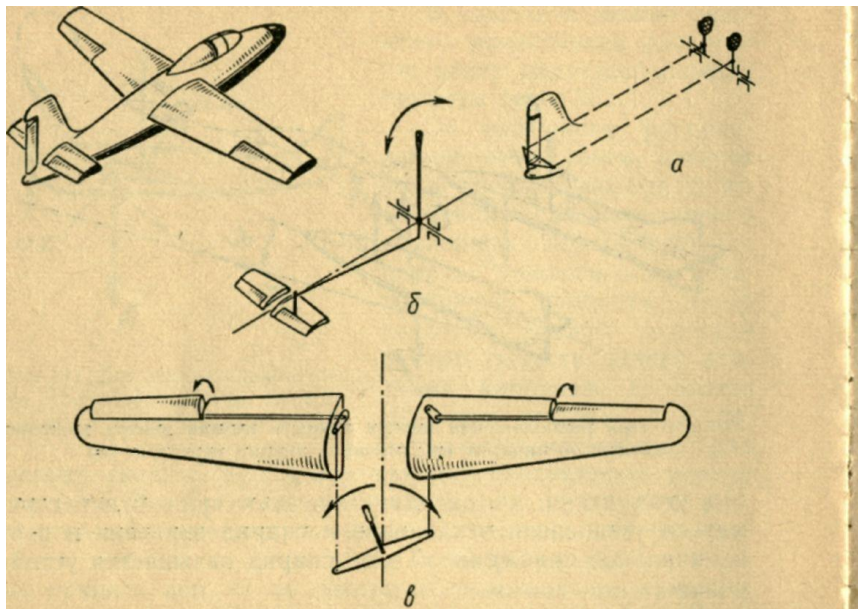


Рис. 35. Схемы управления: а — рулем поворотов; б — рулем высоты; в — элеронами.

тов, руль высоты и элероны. Руль поворотов и руль высоты размещаются на хвостовом оперении, элероны — на крыле.

Если летчик хочет изменить направление полета, например повернуть самолет вправо, то он правой ногой нажимает на правую педаль ножного управления (рис. 35, а). Педаль заставит руль поворотов через проводку (тягу или трос) повернуться вправо. На руле поворотов, поставленном под углом к встречному потоку, возникнет аэродинамическая сила, которая и заставит хвост, а с ним и весь самолет повернуться на некоторый угол.

Если летчик желает опустить нос самолета, т. е. повернуть самолет относительно поперечной оси, то он отклонит руль высоты вниз. Для этого летчик отодвигает ручку управления от себя (рис. 35, б). Ручка через проводку потянет руль высоты, и он отклонится вниз. На руле высоты, поставленном под углом к встречному потоку воздуха, возникнет аэродинамическая сила, ко-

торая нажмет на хвост снизу вверх, и самолет повернется вокруг поперечной оси.

Поворот самолета вокруг продольной оси, проходящей вдоль фюзеляжа, достигается отклонением элеронов. Для этого пилот, передвигая ручное управление влево или вправо, отклоняет элероны в разные стороны (рис. 35, в). В результате подъемная сила крыла с опущенным элероном возрастет, а у крыла с поднятым элероном уменьшится.

Таким образом, самолет повернется вокруг продольной оси.

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

На рисунке 36 показан рост по годам максимальной скорости рекордных самолетов. Так за десятилетие, с 1904 по 1913 г., скорость самолета увеличилась в 4 раза, за десятилетие, с 1914 по 1923 г., скорость возросла в 3 раза, в следующее десятилетие, с 1924 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 самолетам с винтомоторной установкой. Они показывают замедление в росте скорости полета. Это замедление обусловилось тем, что на ско-

1

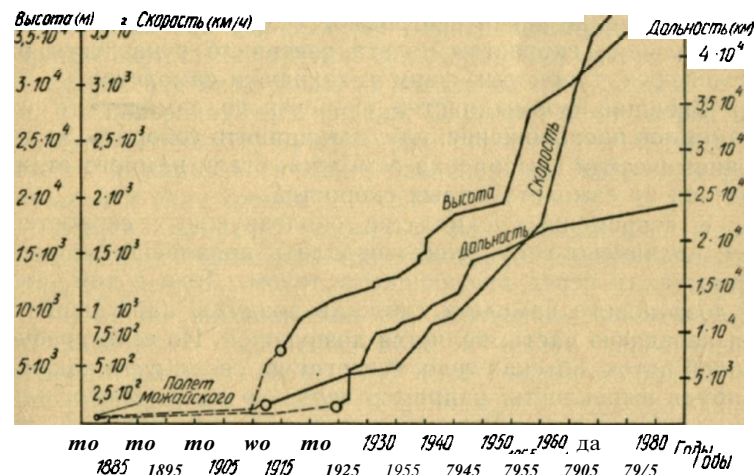


Рис. 36. Максимальные скорости, высоты и дальности, достигнутые на рекордных самолетах по годам. Пунктиром указаны рекорды самолетов, не превзошедшие лучших показателей у птиц.

рости свыше 700—750 км/ч сопротивление самолета резко возрастает, а тяга винта убывает. На большой скорости **воздушный** винт **начинает** тянуть самолет все с меньшей и меньшей силой. Значит, надо было отказаться от воздушного винта, а с ним и от всей винтомоторной установки и искать новый путь для достижения больших скоростей. Этот путь был указан Константином Эдуардовичем 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 совершен полет на **ракетопланс** конструкции С. П. Королева с ракетным двигателем.

В 1942 г. появился советский скоростной реактивный самолет, созданный коллективом В. Ф. Болховитинова. Летчиком-испытателем был Г. Я. Бахчиванджи.

Применение реактивного двигателя позволило получить невиданные скорости полета, так как его тяга с увеличением скорости полета не уменьшается, как у **ВИНТО-**моторной установки, а в некоторых случаях даже увеличивается, как, например, у воздушно-реактивных двигателей.

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

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

Внешние формы частей скоростного самолета и их взаимное расположение, или, как принято говорить, аэродинамическая компоновка самолета, стали намного отличаться от самолета малых скоростей.

У современных самолетов околозвуковых скоростей все подчинено тому, чтобы отдалить появление скачков уплотнения перед **двигающимся** телом. Дело в том, что у дозвукового самолета скорость воздуха, набегающего на переднюю часть, является дозвуковой. Но если дозвуковой поток, обтекая тело, встретит на своем пути какую-нибудь выпуклость, **напримср** 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. 37, **а**). Эти скачки

уплотнения некоторые летчики замечали в полете в виде полос воздуха с иной оптической проницаемостью. Продвигать в воздухе самолет, на поверхность которого «сел» скачок уплотнения, не так легко. Поэтому частям самолета околозвуковых скоростей придают плавные заостренные формы с небольшой кривизной; так, например, фюзеляжу придают веретенообразную форму, а крылья делают тонкими, отогнутыми назад, придающими современному самолету вид стремительно летящей стрелы.

Эти меры отдаляют появление скачков уплотнения.

Придавая крыльям стреловидную форму, уменьшаем возникновение скачков уплотнения из-за обдувания их косым потоком воздуха. Как это получается, видно из рисунка 37, **б**. На стреловидное крыло набегаёт поток со скоростью \vec{v} . Вектор скорости потока V по правилу параллелограмма можно разложить на две составляющие, одна из которых \vec{v}_1 перпендикулярна передней кромке крыла, а другая \vec{v}_2 направлена вдоль крыла. В результате вместо одного потока со скоростью \vec{v} можно рассматривать два потока. Один поток со скоростью v_1 будет создавать нужную для образования подъемной силы разность статических давлений над крылом и под крылом и силу трения.

Другой поток со скоростью \vec{v}_2 , направленный вдоль крыла, будет скользить вдоль крыла и создавать только силу трения.

Обратим внимание на то, что скорость потока \vec{v}_1 , направленная перпендикулярно к крылу, значительно меньше полной скорости v , т. е. скорости полета, а это означает, что придание стреловидности как бы равносильно некоторому уменьшению скорости полета. А уменьшение скорости полета отодвигает возникновение скачков уплотнения.

Таким образом, самолет со стреловидным крылом может летать без скачков уплотнения на таких скоро-

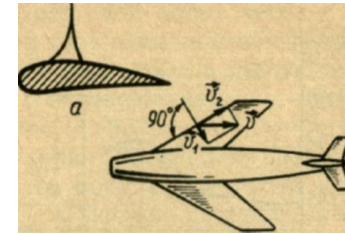


Рис. 37. **а** — местный скачок уплотнения при достижении в данном месте скорости звука; **б** — обтекание стреловидного крыла.

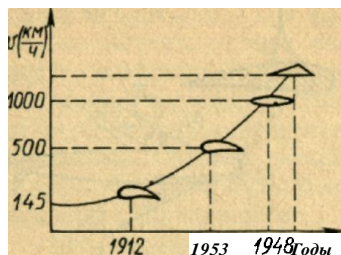


Рис. 38. От птичьего профиля до сверхзвукового профиля К. Э. Циолковского.

§

Вот почему у сверхзвукового самолета все передние части фюзеляжа, крыла, оперения заострены, и с ростом скорости передняя часть фюзеляжа приближается к форме кончика пули, а передняя часть крыла — к форме лезвия ножа.

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

Впервые правильный профиль крыла для сверхзвукового самолета в виде двустороннего клина был предложен К. Э. Циолковским. На рисунке 38 показано изменение формы профилей крыльев, начиная от птичьего профиля и кончая сверхзвуковым профилем К. Э. Циолковского.

Серьезным препятствием при полете на больших скоростях становится аэродинамический нагрев поверхности самолета.

Главной причиной аэродинамического нагревания является торможение набегающего воздуха поверхностью самолета. Это явление можно сравнить с выделением теплоты при встрече пули с целью. Если пуля при встрече с каким-

либо препятствием резко замедляет свой полет, или, что все равно, частица воздуха резко затормаживается перед телом, то основная часть кинетической энергии движения пули и воздуха переходит в тепловую энергию. Эта теплота в первом случае плавит свинец, из которого сделана пуля, и во втором случае нагревает воздух.

При больших скоростях полета появляется много неожиданных проблем. Например, с ростом скорости полета вызывает большое беспокойство отрицательное воздействие самолетов на окружающую среду.

Тираном XX в., как известно, является шум. Сильный шум может погубить планктон, плавающий на поверхности океана, губить личинки пчел, парализовать белые кровяные тельца.

Шум, громкость которого превышает 65—70 децибел (дБ), находится на границе безопасности для здоровья человека.

100 дБ — это уже опасно. Вредное воздействие шума проявляется иногда не скоро, но проявляется всегда.

В связи со сказанным приобретает большое значение новая отрасль авиационных наук — авиационная акустика. Сейчас изыскиваются активные средства по уменьшению шума двигателей и планера самолета. Изучаются закономерности гашения шума с помощью различных устройств для турбореактивных двигателей.

Изучаются оптимальные траектории и режимы полета, обеспечивающие минимум шума на взлете и посадке. Вводятся ограничения по шуму самолетов в ночные и предутренние часы. Устанавливаются научно обоснованные безопасные уровни шумов.

Авиация загрязняет окружающую среду различными аэрозолями. Аэрозоли — это распыленные в воздухе жидкие и твердые химикалии. Они присутствуют в выхлопных газах авиационных двигателей. Выяснено, что на частицах аэрозолей конденсируется влага, увеличивающая облачность земной атмосферы. Замечено, что только от работы реактивных двигателей облачность над Атлантическим океаном за последнее время увеличилась от 10 до 15%.

В борьбе с этим злом велика роль теории горения в авиационных двигателях и применяемых видов топлива.

Как известно, продуктами сгорания бензина и керосина является CO_2 и очень вредное соединение CO .

В перспективе предполагается в качестве топлива в

либо препятствием резко замедляет свой полет, или, что все равно, частица воздуха резко затормаживается перед телом, то основная часть кинетической энергии движения пули и воздуха переходит в тепловую энергию. Эта теплота в первом случае плавит свинец, из которого сделана пуля, и во втором случае нагревает воздух.

При больших скоростях полета появляется много неожиданных проблем. Например, с ростом скорости полета вызывает большое беспокойство отрицательное воздействие самолетов на окружающую среду.

Тираном XX в., как известно, является шум. Сильный шум может погубить планктон, плавающий на поверхности океана, губить личинки пчел, парализовать белые кровяные тельца.

Шум, громкость которого превышает 65—70 децибел (дБ), находится на границе безопасности для здоровья человека.

100 дБ — это уже опасно. Вредное воздействие шума проявляется иногда не скоро, но проявляется всегда.

В связи со сказанным приобретает большое значение новая отрасль авиационных наук — авиационная акустика. Сейчас изыскиваются активные средства по уменьшению шума двигателей и планера самолета. Изучаются закономерности гашения шума с помощью различных устройств для турбореактивных двигателей.

Изучаются оптимальные траектории и режимы полета, обеспечивающие минимум шума на взлете и посадке. Вводятся ограничения по шуму самолетов в ночные и предутренние часы. Устанавливаются научно обоснованные безопасные уровни шумов.

Авиация загрязняет окружающую среду различными аэрозолями. Аэрозоли — это распыленные в воздухе жидкие и твердые химикалии. Они присутствуют в выхлопных газах авиационных двигателей. Выяснено, что на частицах аэрозолей конденсируется влага, увеличивающая облачность земной атмосферы. Замечено, что только от работы реактивных двигателей облачность над Атлантическим океаном за последнее время увеличилась от 10 до 15%.

В борьбе с этим злом велика роль теории горения в авиационных двигателях и применяемых видов топлива.

Как известно, продуктами сгорания бензина и керосина является CO_2 и очень вредное соединение CO .

В перспективе предполагается в качестве топлива в

авиации использовать высококалорийный жидкий водород, продуктом сгорания которого являются безвредные пары — вода.

3. ПЛАНЕРЫ

Планер — это безмоторный самолет (рис. 39). По конструкции планер похож на самолет: он имеет крылья, фюзеляж, органы управления и взлетно-посадочное устройство. На планере нет мотора — это его главное отличие от самолета. Всякий самолет, летящий с выключенным двигателем, с аэродинамической точки зрения становится планером.

Русские ученые 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 планерах. Симферопольский врач В. Я. Арндт провел много интересных опытов, а в 1876 г. представил в Главное инженерное управление свой труд, в котором обосновал возможность подъема и свободного полета на планерах. 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 Н. Е. Жуковского предпринимаются первые шаги в развитии отечественного планеризма. Им была создана лаборатория, объединявшая 45 любителей планерного спорта. В 1920 г.

организовался планерный кружок «Парящий полет», в мастерской которого советские конструкторы приступили к созданию планеров.

На протяжении нескольких лет советские планеристы проводили в горном районе Крыма, в Коктебеле (ныне Планерское), планерные слеты, где испытывались новые аэродинамические схемы планеров и ставились рекорды безмоторного полета.

В 1941 г. Советский Союз обладал 18 международными планерными рекордами. Среди них рекорд дальности полета по прямой, установленный планеристкой О. Клепиковой, — 749 км, полет планериста П. 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. Полет на дальность с возвращением к месту старта — один из самых трудных видов полета на планере. На высоте 600—1000 м планер отцепляется от самолета и, используя восходящие потоки, быстро набирает высоту, уходя к заданному пункту. Однако при возвращении не всегда можно быть уверенным в том, что воздушные потоки будут «ждать», особенно если полет затянется до вечера. Под вечер ослабевают восходящие потоки воздуха, эти основные «двигатели» безмоторного аппарата.

В 1953 г. заслуженный мастер спорта В. Ильченко на двухместном рекордном планере «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 таких полетах очень важно правильно оценивать метеорологическую обстановку, связанную с восходящими потоками.

Поинтересуемся: почему летает планер? Планер летает, используя потенциальную энергию и энергию восходящих воздушных потоков. Потенциальную энергию планер получает за счет работы, совершенной для его подъема на ту или иную высоту. Разберем два случая полета планера.

Первый случай — полет планера в спокойном воздухе. При этом планер летит, используя потенциальную энергию, и подняться самостоятельно выше места старта не может. Самолет, имея мотор и воздушный винт или реактивный двигатель, самостоятельно начинает полет.

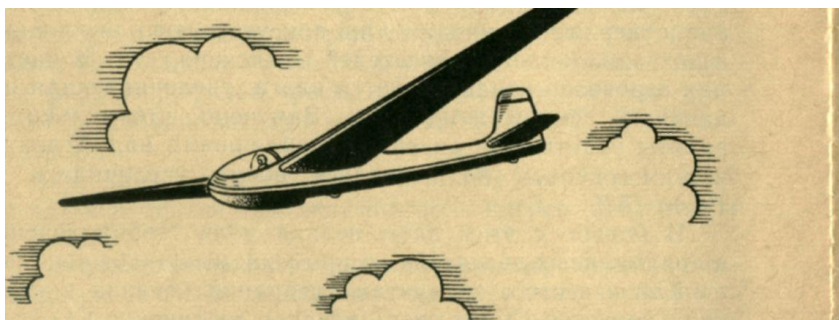


Рис. 39. Планер в полете.

Планер же, не имея двигательной установки, не может самостоятельно начать движение. Для сообщения ему начальной поступательной скорости существует несколько способов запуска планера: с помощью натягивания резинового шнура, механической пусковой лебедки и буксировки на тросе за САМОЛЕТОМ.

Простейший запуск планера с помощью растянутого резинового жгута заключается в следующем. Планер за хвост прикрепляется к земле. На носовой крюк планера надеваются два длинных конца резинового жгута. 5—8 человек стартовой команды натягивают эти шнуры. Пилот отцепляет хвост планера от земли, и планер, пробежав 10—15 м, вылетает вперед, как камень из рогатки.

Затаскивая планер на гору или поднимая его в воздух за самолетом, мы сообщаем ему энергию, равную произведению массы планера на ускорение свободного падения и на высоту подъема. Как известно, по закону сохранения энергии энергия не исчезает и не возникает вновь, а лишь переходит из одной формы в другую. Затраченная на подъем планера энергия не исчезает. Она идет на работу против сил сопротивления при обратном спуске планера. 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 планер скользит? — Крыльям планера. При взаимодействии крыла с воздухом образуется аэродинамическая сила, которая вместе с силой тяжести делает полет скольльзящим. Планирующий (скользящий) полет происходит по наклонной плоскости.

С точки зрения механики это то же самое, что скольжение тела с наклонной плоскости под действием силы тяжести (рис. 40). Силой тяги у планера, как и у скользящего по наклонной плоскости тела, является составляющая силы тяжести, параллельная наклонной плоскости. У планера она направлена против силы лобового сопротивления, у тела, скользящего по наклонной плоскости, — против силы трения. Нормальная составляющая силы тяжести уравнивается силой давления плоскости на тело (реакцией опоры). У планера нормальная составляющая силы тяжести уравнивается подъемной силой крыльев, образующейся в результате движения планера в воздухе.

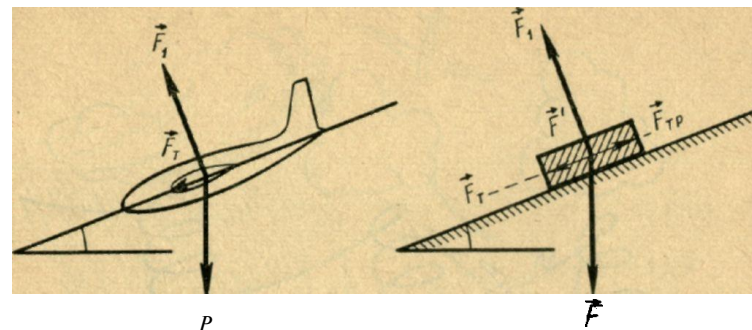


Рис. 40. Сравнение сил, действующих на снижающийся планер и на тело, скользящее по наклонной плоскости.

I

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

Способ полета в восходящих потоках заимствован человеком у парящих птиц. Вот почему такой полет называют парящим полетом.

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

Существует несколько видов восходящих потоков: потоки обтекания гор, потоки, образующиеся под кучевой облачностью, потоки, образующиеся перед грозовым фронтом, потоки над полями. Умело используя эти потоки, опытные планеристы могут летать на большие расстояния.

Схема полета планера над равниной под кучевыми облаками обычно такова (рис. 41). Набрав высоту под одним облаком, планер, немного снижаясь, летит к другому облаку, где опять набирает высоту, и т. д. Получается своеобразная «облачная дорога». Возможна другая схема полета на дальность, так называемый «полет с грозовым фронтом». Перед грозовым фронтом (рис. 42) обычно имеется область сильных восходящих потоков. Находящийся в них планер передвигается вместе с грозовым фронтом. Обстановка полета при таких условиях

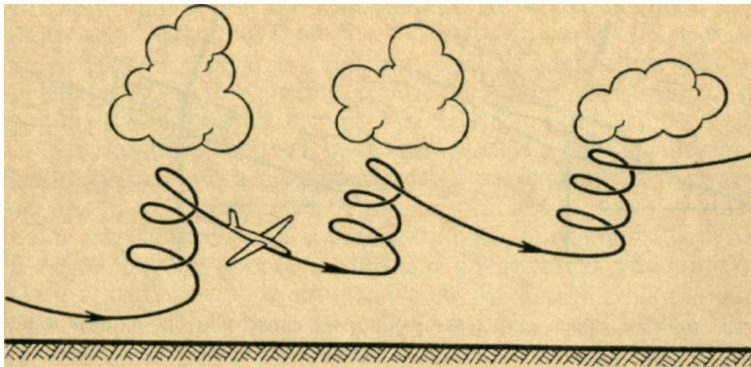


Рис. 41. Схема полета на дальность под кучевыми облаками.

неприятна. Потемневшее небо бороздится молниями, и планер швыряет мощными воздушными толчками, грозящими разрушить его. От пилота требуется исключительное самообладание.

Планерам, особенно рекордным, присущи строгие аэродинамические очертания. Мидель планера сильно сжат. Фюзеляж имеет плавные обтекаемые формы. Колеса шасси заменены мало выступающей посадочной лыжей. Носовая часть «не испорчена» установкой двигателя. Крыло плавно сливается с фюзеляжем. На некоторых планерах этот переход напоминает характерную изогнутость крыла, присущую прекрасному парителю — чайке. Эти качества в совокупности с хорошей отделкой поверхности обеспечивают планеру наименьшее сопротивление воздуха.

Из-за отсутствия мотора полет на планере сравнительно бесшумен, слышится только свист воздуха, обтекающего различные части планера. При полете на высоте 150—200 м можно даже разговаривать с планеристом с земли. Планеризм, особенно в первые десятилетия развития авиации, приносил большую пользу при изыскании наиболее удачных аэродинамических форм летательных аппаратов.

В годы Великой Отечественной войны планеры использовались как транспортные средства. В фюзеляже транспортного планера размещаются всевозможные грузы. Планер прицепляется на земле к самолету-буксиров-

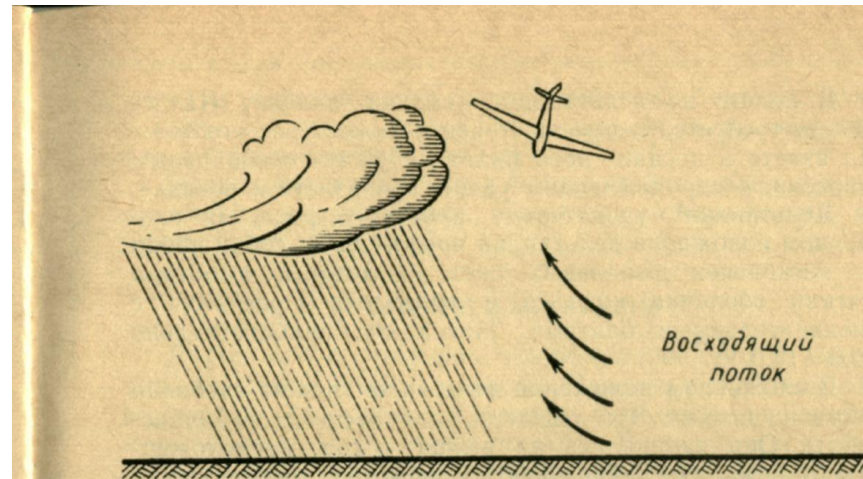


Рис. 42. Полет на дальность с грозвым фронтом.

щику тросом длиной 600—800 м. Такой «воздушный поезд» прилетал в тыл противника, планер отцеплялся и бесшумно планировал. Благодаря своей малой посадочной скорости (около 80 км/ч) и применению комбинированного лыжно-колесного шасси планер может садиться на маленькие площадки с рыхлым грунтом.

Для тех же целей в 1944—1945 гг. в Советском Союзе авиаконструктор П. В. Цыбин создал тяжелый десантный планер Ц-25.

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

Многие из наших прославленных авиационных конструкторов — О. К. Антонов, А. Н. Туполев, С. В. Ильюшин, А. С. Яковлев и др. — прошли школу планеризма, которая помогла им в работе по созданию замечательных самолетов.

4. ДЕЛЬТАПЛАНЫ

Удивительно романтичным видом планерного спорта, требующим высокого мужества и мастерства, является дельтапланеризм.

Он родился совсем недавно — с появлением конструкции гибкого треугольного крыла. Пока он не совсем безопасен. По своей природе дельтаплан — балансирный аппарат.

В полете на дельтаплане (см. **цв.** вклейку III, 2) пилоту требуется перемещать **центр** тяжести своего тела. На взлете и посадке ноги пилота служат своеобразным «шасси», воспринимающим удары при взлете и посадке.

Дельтаплан¹ удивительно просто устроен. В сложном положении дельтаплан представляет собой набор из нескольких дюралевых труб, на которые намотана мягкая оболочка крыльев и проволоки — расчалки с соединительными болтами. Масса его приблизительно 16,0—18,0 кг.

В сложном положении дельтаплан можно свободно нести на плечах. Что и делали альпинисты-дельтапланеристы. Они взбирались на вершины гор, расположенные на высоте 2000—5000 м, быстро разворачивали укладку, соединяли несколько болтов и, разбегаясь, бросались с гор, совершая редкие по красоте полеты с вершин гор, покрытых снегом. Два из таких полетов были совершены с высочайшей вершины Большого Кавказского хребта — Эльбруса советскими дельтапланеристами. Сначала полет выполнил А. Соловьев, а потом А. Бутенко. Они добрались до отметки 5000 м. Эльбрус был покрыт облаками. Воспользовавшись временным просветом в облачной завесе, А. Соловьев нырнул в него. На снижение он потратил 27 мин и благополучно приземлился на высоте 2200 м.

Через два с половиной часа такой же полет повторил А. Бутенко. Взлет дельтаплана происходит при скорости 19 — 22 км/ч. Скорость в свободном полете достигает 24 — 26 км/ч. По сравнению с планером дельтаплан летает в более погожую погоду. Управление дельтапланом сложнее, чем планером.

В полете аэродинамическая форма крыла образуется и поддерживается за счет воздушного потока, действующего на две полуконические мягкие поверхности (см. **цв.** вклейку III, I).

Треугольная форма крыла с малым удлинением способствует малому перемещению положения центра давления при большом изменении угла атаки крыла, поэтому дельтаплан сравнительно устойчив в полете.

Мягкая оболочка крыла легка и прочна. Она выполнена из синтетической ткани. Нити этой ткани выпол-

нены из лавсана, армида или нейлона. Заметим, что волокна некоторых тканей по прочности на растяжение могут быть выше прочности стали.

Были попытки установить на дельтаплан маломощную винтомоторную установку. Тогда он превращается в минисамолет.

5. САМОЛЕТЫ-МУСКУЛЕТЫ

Долгое время считалось, что человек не сможет полететь, опираясь на свои мускулы. Неверие в летательный аппарат с мускульным приводом сложилось из опыта многочисленных неудачных попыток. В прошлом и в настоящем веке этих попыток было немало. Они принимались и с машущими, и с неподвижными крыльями.

По линии машущего полета причиной неудач служило отсутствие теории полета с машущими крыльями и конструктивное несовершенство таких аппаратов.

По линии полета с неподвижно закрепленным крылом была отточенная теория полета, но долгое время не было достигнуто должного уровня конструктивного и технологического совершенства летательного аппарата.

Под конструктивным совершенством понимается отношение массы конструкции аппарата к полной полетной массе аппарата. И только в 70-х годах XX столетия стал возможен полет с мускульным приводом.

К этому времени появились легкие авиационные материалы с высокими прочностными и технологическими данными.

Благодаря бурному развитию синтетических материалов появились весьма совершенные оболочки для обшивки крыла — тончайшие майларовые пленки, тончайшие нейлоновые ткани.

Появились углепластики с высоким отношением прочности материала к его удельной массе. Они-то в сочетании с высоким аэродинамическим качеством, высокими коэффициентами полезного действия воздушного винта и механической передачи от мускульного привода к винту, и обеспечили главным образом успех полета с мускульной энергией.

Самолет назывался «Паутинка», имел много тонких проволок-паутинок и был очень легок. Этот самолет летал с мускульным приводом.

Самолет имел аэродинамическую схему типа «утка»,

¹ Свое название дельтаплан получил за сходство формы крыла с написанием греческой буквы Д — дельта.

т. е. с передним расположением горизонтального оперения относительно крыла.

Эта схема обеспечивала размещение толкающего воздушного винта, поток за которым не тормозится частями самолета, и кратчайшее расстояние между педалями ног человека и воздушным винтом.

Гондола, в которой размещался пилот, была закрытой, хорошо обтекаемой формы, играла роль киля самолета. Ее расположение снизу под крылом способствовало повышению поперечной устойчивости.

Отличительной чертой конструктивного решения, обеспечивающего малый вес самолета, было применение тонких проволоочных расчалок (диаметром 0,5—0,8 мм), ненамного увеличивающих лобовое аэродинамическое сопротивление при малых скоростях полета.

Была решена проблема создания легкого силового набора самолета: лонжероны крыла, штанга, несущее переднее оперение, каркас фюзеляжа — гондолы были выполнены из ультрапрочных углепластиковых труб с тонкими стенками. В каркасе гондолы применялась слоистая конструкция с наполнителем из полистирола.

Крыло мускулета имеет очень большое аэродинамическое удлинение, равное для прямоугольного крыла отношению размаха крыла (а) к хорде крыла (b):

$$fc-j^* \quad 18,6,$$

т. е. соизмеримое с удлинением крыла лучшего парителя птицы альбатрос.

Крыло однолонжеронной конструкции. Лонжерон выполнен из углепластиковой трубы диаметром 50,8 мм.

Верхняя обшивка крыла сделана из майларовой пленки толщиной 0,012 мм, а нижняя обшивка выполнена из пленки толщиной 0,006 мм.

В гондоле расположены указатели скорости и высоты полета, термометр, воздухозаборник свежего воздуха, лоток для сбора выделяемой при дыхании влаги и водяной бачок вместимостью 2 л.

Мускулет имеет следующие характеристики:

Размах крыла	28,65 м
площадь крыла	44,03 м ²
удельная нагрузка на крыло	22 Н/м ²
относительная толщина профиля	11,5%
диаметр воздушного винта	4,12 м

масса самолета (включая массу летчика, равную 63,5 кг)	97,5 кг
масса пустого самолета	31,8 кг
скорость полета	17,7—19,2 км/ч

Появление самолетов-мускулетов пока представляет спортивно-технический интерес. Но кто знает, может быть, их в какой-то степени ждет судьба велосипеда, мопеда, мотоцикла. Во всяком случае можно предположить, что этот вид спорта в дальнейшем может заинтересовать молодежь.

Представим себе наши степные районы, перерезанные реками, оврагами, балками. Насколько быстрее можно добраться молодежи в отдельные районы на мускулете.

Или взять весенне-осеннее распутье, когда сообщение между селениями с пересеченной местностью становится затруднительным.

Конечно, технический прогресс должен и будет способствовать тому, чтобы этот вид летательных аппаратов стал более доступным, поэтому необходимо перевести их из ряда уникально рекордных в дешевые, надежные, легко эксплуатируемые летательные аппараты.

Конструкторы мускулета планируют организовать производство самолета с мускульным pedalным приводом в виде комплекта деталей.

Сообщалось также о модификации самолета-мускулета в будущем в направлении установки на нем электропривода наряду с мускульным приводом. Этими приводами можно пользоваться как вместе, так и врозь, что ПОЗВОЛИТ пилоту делать передышки в полете.

6. ВОЗДУШНАЯ ПОДУШКА

Принцип действия воздушной подушки заключается в том, что, вдувая воздух в огражденное пространство под днищем вагона, корабля, фюзеляжа самолета, удается получить повышенное давление по сравнению с атмосферным и как следствие существенную аэродинамическую подъемную силу.

Эта сила поднимает транспортное средство над опорной поверхностью на небольшую высоту (всего на несколько сантиметров), достаточную для существенного снижения трения и давления на опорную поверхность.

Обратимся кратко к истории развития воздушной подушки.

Первые идеи о применении сжатого воздуха для улучшения движения транспортных средств появились еще в прошлом веке. В 1882 г. шведский изобретатель Лаваль предложил использовать «воздушную смазку» на катере. Невысокий уровень развития техники того времени не позволил широко применить эту идею, но теоретически к этому вопросу обращались многие исследователи.

К. Э. Циолковский предложил проект поезда без использования колес, опубликованный в работе 1927 г. «Сопротивление воздуха и скорый поезд». Под днище вагона должен подаваться сжатый воздух, который поднимал бы вагон над полотном и ликвидировал бы трение, являясь своеобразной смазкой (см. цв. вклейку IV, 1). У Лавалья и у Циолковского воздух предполагался использоваться как смазка, и основная цель его применения сводилась к резкому уменьшению силы трения.

Кроме уменьшения трения, воздушная подушка обладает другими ценными свойствами — она позволяет существенно снизить удельную нагрузку на поверхность, по которой движется транспортное устройство, повышая тем самым его проходимость.

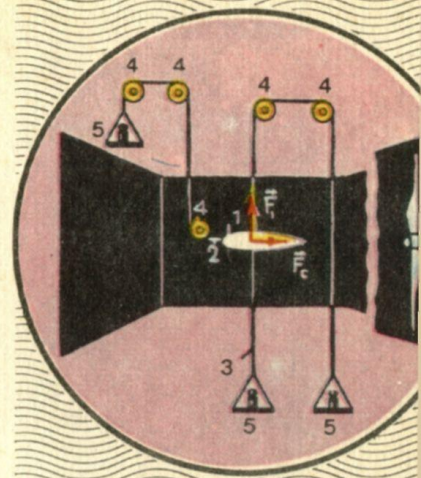
В первую очередь воздушная подушка стала использоваться на судах, где она дает неоспоримые преимущества: ликвидация гидродинамического сопротивления, возможность движения по мелководью и выхода на берег. Аппарат на воздушной подушке вообще-то уже не являлся судном, так как имел возможность с таким же успехом продвигаться по суше, как и по воде.

Первые практические работы по созданию (АВП) были проведены в СССР в период 1934—1941 гг. Опытное-конструкторское бюро, руководимое В. И. Левковым, спроектировало, построило и испытало ряд аппаратов на воздушной подушке, предназначенных для движения на воде с выходом на берег.

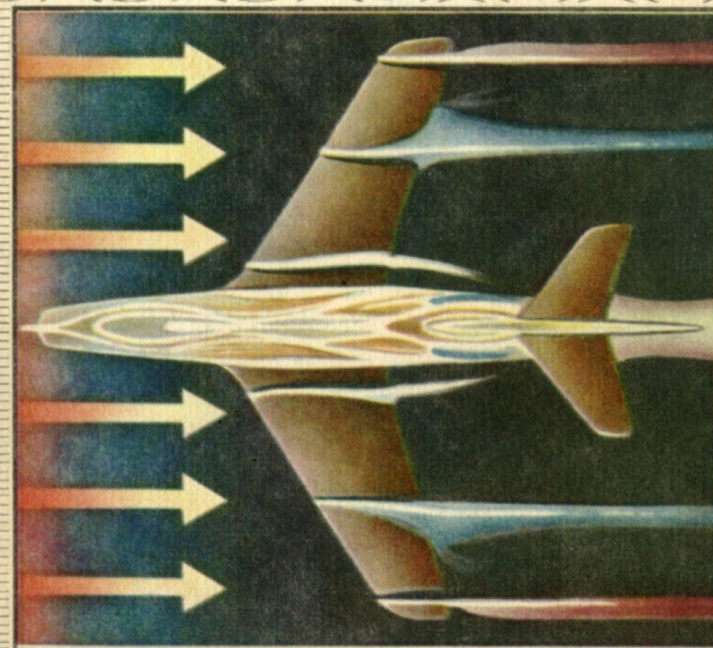
Применение воздушной подушки идет особенно успешно на речном и морском транспорте.

В Советском Союзе созданы суда на воздушной подушке, например: «Радуга», «Нева», «Сормович» позволяющие эксплуатировать их на мелководье и особенно в речных условиях, где уровень воды подвержен большим сезонным колебаниям. Пассажирское судно

1. Схема измерения сил в аэродинамической трубе (1 — модель, 2 — трос для удержания модели от действия силы лобового сопротивления, 3 — трос для удержания модели от действия подъемной силы, 4 — ролик, 5 — чаша весов).



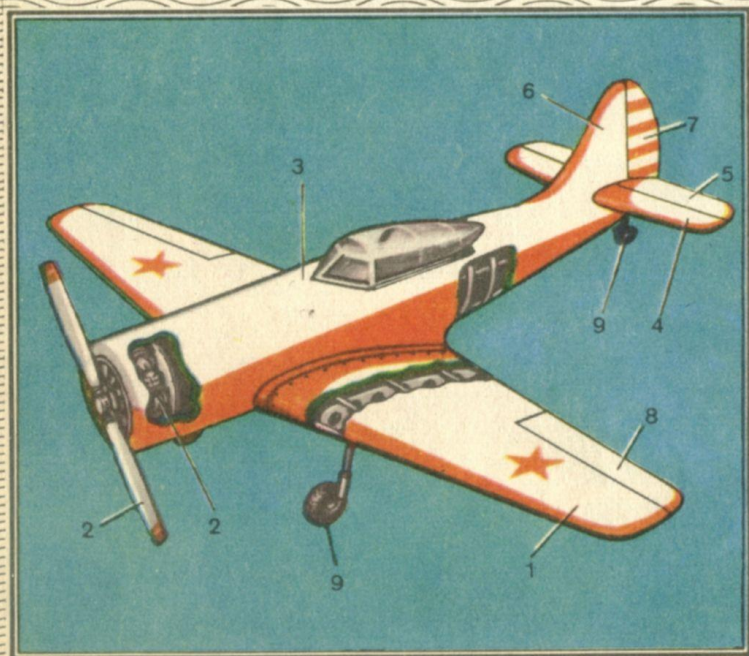
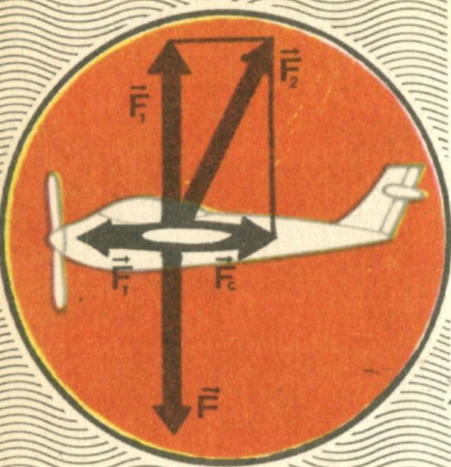
2. Обтекание самолета воздухом.



II

1. Равновесие сил, действующих на самолет в полете.

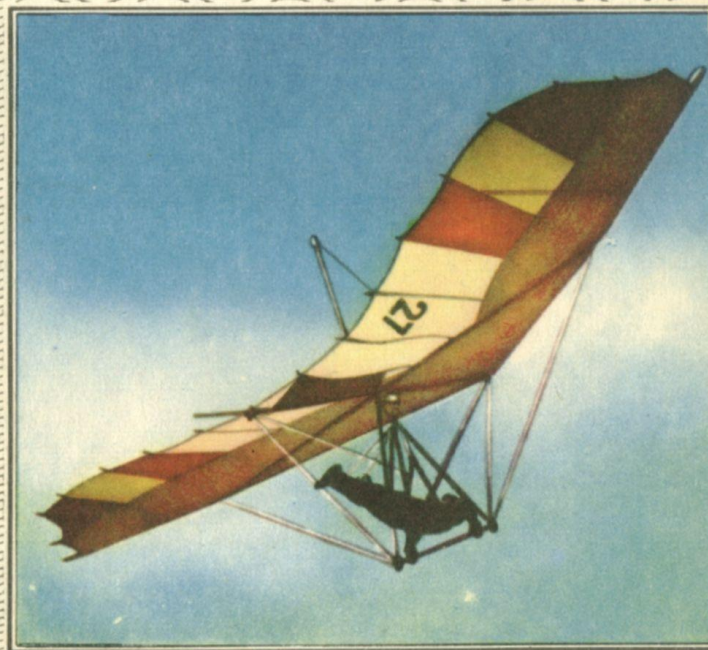
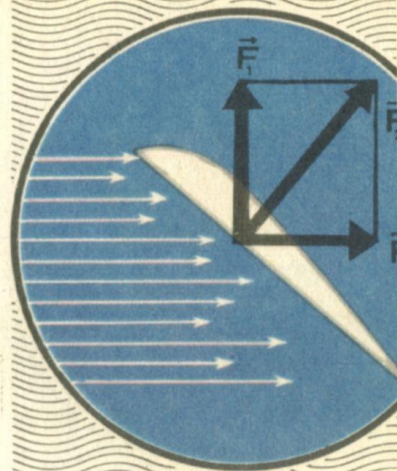
2. Основные части современного самолета.



III

1. Аэродинамическая сила, действующая на крыло.

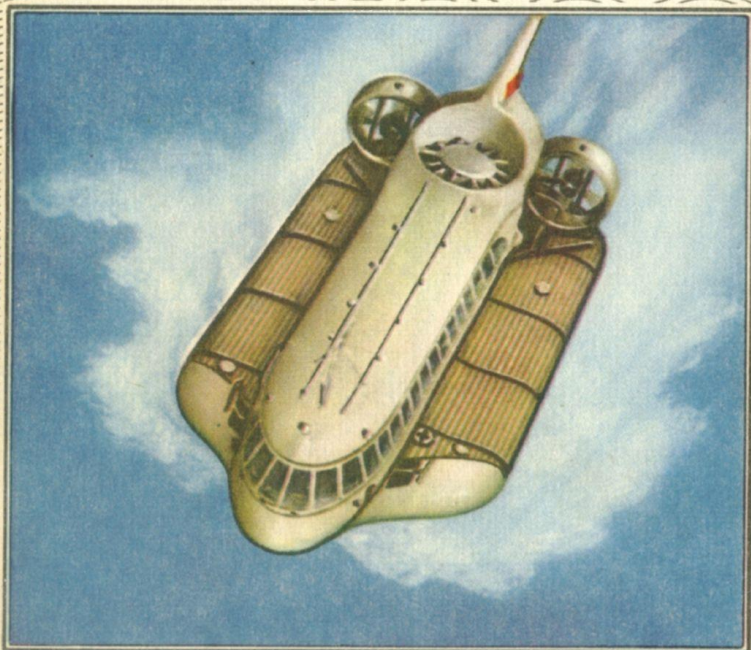
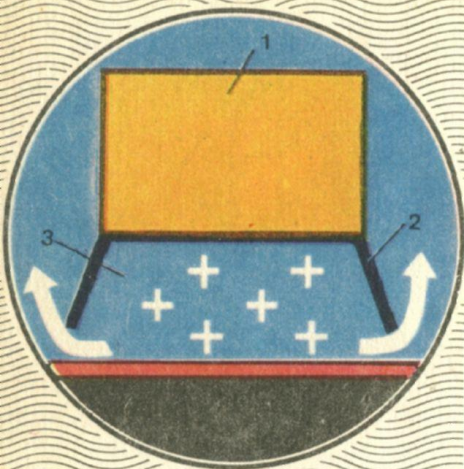
2. Дельтаплан в полете.



IV

1. Схема воздушной подушки К. Э. Циолковского (1 — вагон, 2 — щитки, 3 — воздушная камера).

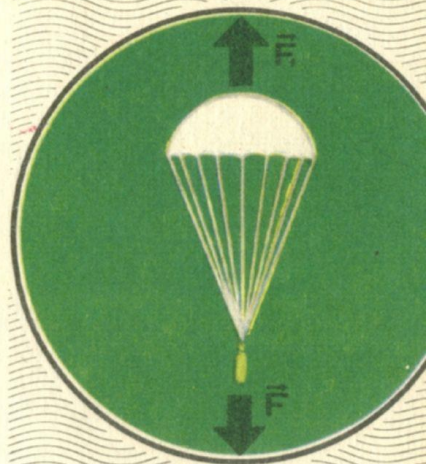
2. Пассажирское судно на воздушной подушке.



V

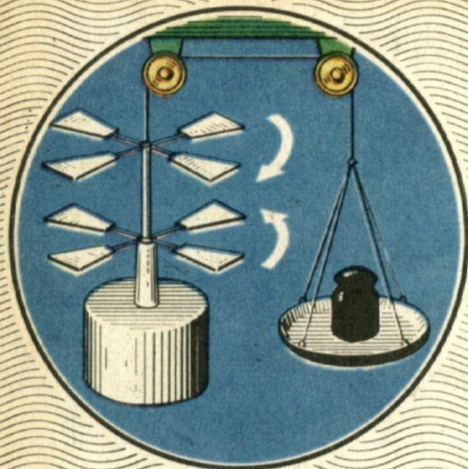
1. Силы, действующие на парашют.

2. Спуск парашюта.

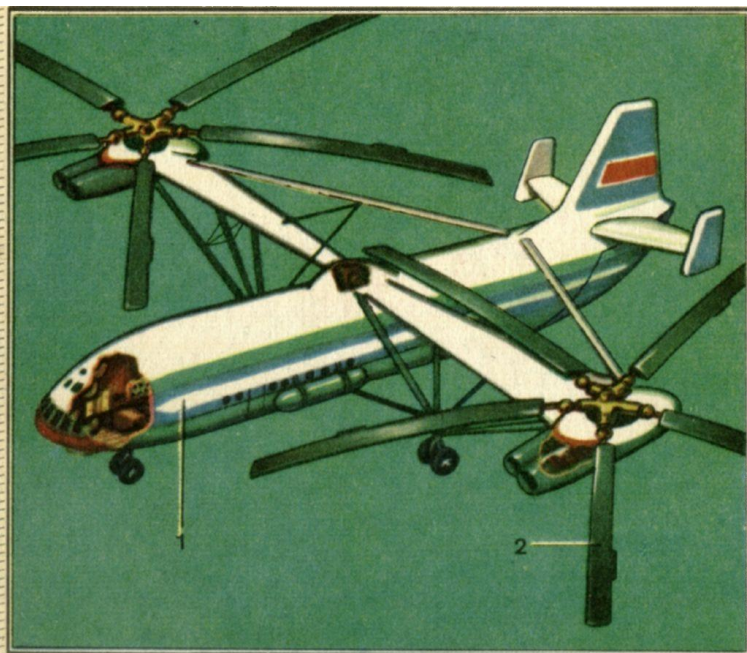


VI

1. Схема вертолета М. В. Ломоносова.

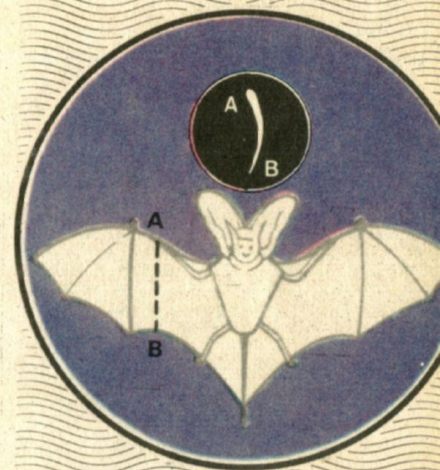


2. Двухвинтовой вертолет (1 — фюзеляж, 2 — винт).

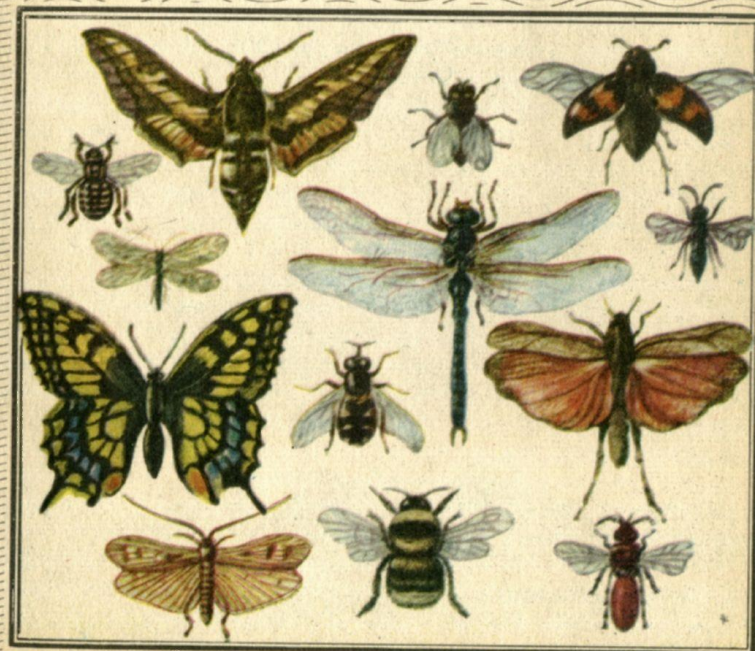


VII

1. Летучая мышь и ее крыло.



2. Форма и количество крыльев у насекомых.



**1. Установка Н. Е. Жуковского
для искусственного воссоздания
смерча**

2. Смерчи.

«Сормович» (см. цв. **вклейку IV, 2**) создано на заводе «Красное Сормово» совместно с научными работниками ЦАГИ. Воздушная подушка создается под корпусом и боковыми поплавками судна. В кормовой части располагаются один **вентилятор**, нагнетающий воздух в подушку, и по **бокам** два **четырёхлопастных** воздушных винта в кольцах. В носовой части находится ходовая рубка и в средней части салон на 50 пассажиров.

Энтузиастами в Сибири сделана интересная опытная транспортная **телсжка** — платформа на воздушной подушке, которая, имея на себе тяжелые грузы, буксируется **трактором-тягачом** по сибирскому бездорожью.

Успех создания **судов** на воздушной подушке во многом объясняется изобретением гибкого ограждения, которое ограничивает со всех сторон пространство, занятое воздушной подушкой.

Ограждение состоит из продольного гибкого баллона-ресивера и прикрепленных к нему поперечных гибких **элементов** открытого типа. Элементы такого типа называют сегментами.

Нагнетаемый воздух надувает баллон и сегменты, заполняет пространство под днищем судна и прорывает через зазор между гибкими сегментами и водой.

Описанное ограждение легко пропускает набегающую снаружи волну или встречающееся твердое препятствие. Ограждение испытывает небольшое сопротивление при движении по волне и обладает хорошей проходимостью по суше.

Изготавливается гибкое ограждение из высокопрочных синтетических тканей со специальным герметичным покрытием.

Характерной особенностью судов на воздушной подушке является настолько малый зазор между нижними кромками сегментов и поверхностью земли и воды, что на глаз зазор малозаметен. Благодаря гибкому ограждению суда с воздушной подушкой могут преодолевать при движении по суше твердые препятствия высотой **приблизительно 0,7—0,8** высоты гибкого ограждения и волны, соизмеримые с высотой ограждения.

Гибкое ограждение позволило придать судам на воздушной подушке амфибийные качества. Амфибийность резко расширяет транспортные возможности судов на воздушной подушке. Эти суда могут быть использованы в районах, недоступных другим видам водного транс-

порта, как-то: на болотах, засоренных мелководных акваториях, а также могут быть пригодны для круглогодичной эксплуатации в районах с замерзающими водными путями. Они способны выходить на пологий берег, двигаться по песку, снегу, проходить значительные участки суши, не требовать дорогих гаваней и причальных устройств для погрузки и разгрузки.

На судах с воздушной подушкой достигнуты скорости передвижения по воде до **130 км/ч**. На борту судна могут разместиться до 500 пассажиров и сотни легковых автомобилей. И это еще не предел.

В качестве эксперимента эффект воздушной подушки стремятся применить на наземных устройствах: тележках, грузовых автомобилях, вагонах специальных железных дорог и др. Делаются небезуспешные попытки применить воздушную подушку для внутризаводского транспорта. На платформах, оборудованных воздушной подушкой, передвигаются тяжелая цеховая продукция или иные тяжелые заводские грузы. При этом по сравнению с колесными тележками не требуются развороты с различными радиусами. Тележка на воздушной подушке может передвигаться параллельно самой себе, экономя внутризаводские площади.

Внутризаводская тележка может питаться воздухом от заводской пневматической сети.

Ознакомимся с использованием воздушной подушки в авиации.

Далеко назад ушло время, когда на заре авиации для взлета и посадки самолета достаточно было иметь лужок, поляну, опушку, в изобилии существующие в естественных природных условиях.

По мере увеличения скорости полета потребные размеры летного поля росли, а увеличение грузоподъемности самолетов и требования регулярности воздушного движения привели к бетонным покрытиям современных взлетно-посадочных полос, протянувшихся на несколько километров.

Вернуть авиации ее былую неприхотливость к аэродрому, обеспечить ей взлет и посадку на суше и воде в течение круглого года — вот цель самолетов с воздушной подушкой.

По сравнению с колесным шасси воздушная подушка в **10—100** раз снижает давление на опорную поверхность, а потому неприхотлива к аэродрому.

В конце 30-х годов в СССР воздушная подушка была применена в качестве самолетного шасси.

Эта конструкция была создана в 1941 г. под руководством А. Д. Надирадзе на самолете УТ-2Н (авиаконструктора А. С. Яковлева) и испытана заслуженным летчиком-испытателем И. И. Шелестом.

К сожалению, Великая Отечественная война прервала эти интересные испытания, и о применении воздушной подушки в авиации незаслуженно забыли.

За последние три десятилетия размеры транспортных самолетов существенно увеличились. В первую очередь тенденция роста определяется необходимостью создания таких тяжелых транспортных самолетов, которые могут быстро доставить большой груз практически в любой район Земли. Однако во многих случаях там может не иметься должным образом подготовленных взлетно-посадочных **ПОЛОС**.

От применения воздушной подушки в качестве шасси самолета можно ожидать качественный скачок в вопросе использования дешевых грунтовых аэродромов.

Обычное самолетное колесное шасси имеет давление по неукатанному **грунту** $2 \cdot 10^5$ Па, а по **бетону** — около $8 \cdot 10^5$ — $1,5 \cdot 10^6$ Па. У шасси на воздушной подушке оно крайне мало, всего $5 \cdot 10^4$ — 10^5 Па. Интересно отметить, что стоящий на месте человек оказывает на подошвы ног в обуви давление около 10^4 — $3 \cdot 10^4$ Па.

Малые давления на грунт могут быть и у гусеничного самолетного шасси. Но в отличие от шасси на воздушной подушке гусеничное шасси не свободно от инерционных нагрузок, связанных с быстрым вращением **гусеницы** на взлетных и посадочных режимах полета. Шасси на воздушной подушке свободно от этих недостатков — оно не имеет вращающихся частей.

Шасси на воздушной подушке может быть и амфибийным устройством, т. е. оно допускает эксплуатацию на суше и на воде.

Наряду с положительными свойствами шасси на воздушной подушке обладает и некоторыми недостатками.

Аппарат на воздушной подушке, оторвавшись от земли и рея на высоте **3—4** см, становится беспомощным в части управления, так как теряет силу сцепления (силу трения) с поверхностью.

Необходимость же сцепления для управления хорошо знает каждый автомобилист, мотоциклист, велосипедист.

Вспомните или представьте себе катание по льду на этих видах транспорта.

Таким образом, управляемость самолета с воздушной подушкой стала сложнее.

По той же причине, если **взлетно-посадочная** полоса имеет угол наклона, то **аппарат**, только что **вставший** на воздушную подушку, рискует скатиться вниз под уклон.

В силу тех же причин самолет ведет себя как флюгер при наличии ветра. Он стремится повернуться носом по ветру.

Устраняются эти недостатки довольно успешно с помощью двух маршевых двигателей. При необходимости каждому из них придаются различные режимы работы. Другой способ связан с выдвиганием справа и слева аппарата специальных тормозных опор, контактирующих с поверхностью аэродрома.

Для общего торможения выдвигаются сразу все опоры. Для поворота вправо-влево выдвигаются опоры с той стороны, в которую надо повернуть самолет. На больших же скоростях движения самолета на воздушной подушке вступают в действие обычные аэродинамические рули самолета.

К другим сложностям применения самолета, да и других видов транспорта на воздушной подушке является шум, создаваемый вытекающими из подушки струями воздуха.

В наше время, когда вопросы охраны окружающей среды стоят очень остро, шум от воздушной подушки — это зло, с которым нужно бороться.

Другими нежелательными качествами подушки являются пыль, комки грязи, мелкие частицы грунта, которые выдуваются струями воздуха, вытекающими из подушки со скоростью 40—60 м/с.

Следует ожидать, что по мере развития применения воздушной подушки будут найдены способы, ослабляющие эти недостатки.

Основные характеристики воздушной подушки сравнительно просто можно рассчитать.

Подъемная сила, создаваемая воздушной подушкой, равна:

$$F = \Delta p S, \quad (1)$$

где S — площадь ограждения в плановой проекции

платформы; Δp — избыточное давление в воздушной подушке.

Из уравнения $v = \frac{2a\Delta p}{\rho}$ избыточное давление в воздушной подушке равно:

$$\rho = \frac{2a}{v^2}, \quad (2)$$

где v — скорость истечения воздуха из камеры ограждения; a — коэффициент истечения воздуха; ρ — плотность воздуха.

Подставляя уравнение (2) в уравнение (1), получим подъемную силу воздушной подушки, равную

$$a = \frac{2}{v^2}$$

Расход воздуха через воздушную подушку в режиме «**ВИСЕНИЯ**» за 1 с равен:

$$Qm_1 = aPhv\zeta$$

или

$$Qm_1 = aPh\rho\sqrt{\frac{2a}{\rho}\Delta p}. \quad (3)$$

Откуда высота платформы над опорной поверхностью будет равна:

$$\Delta p$$

где γ — периметр гибкого ограждения воздушной подушки в плановой проекции платформы.

Мощность **двигательно-вентиляторной** установки для создания воздушной подушки равна:

$$N = \frac{Qm_1}{\eta_1\eta_2}$$

где η_1 — коэффициент, учитывающий потери давления в трубопроводах; η_2 — КПД силовой установки.

Относительные энергетические затраты на создание воздушной подушки характеризуются **отношением** мощности двигательно-вентиляторной установки к стартовой

массе самолета. Относительная мощность шасси на воздушной подушке равна:

$$N \quad \text{Вт/кг.}$$

Относительная мощность служит одним из важных критериев совершенства шасси на воздушной подушке.

Значение относительной мощности у лучших самолетов с шасси на воздушной подушке составляет 0,3 Вт/кг.

Пользуясь приведенными выше уравнениями, поинтересуемся, какая должна быть мощность двигательно-вентиляторной установки для создания воздушной подушки наземного аппарата, представляющего собой платформу, на которой находится один человек.

Дано: площадь подушки	$S = 1 \text{ м}^2,$
форма подушки в плане	— квадрат,
высота «висения» аппарата	$h = 2 \text{ см},$
масса человека	80 кг,
масса аппарата	40 кг.

Как следует из уравнения (1), потребное избыточное давление в воздушной подушке будет равно:

$$\Delta \quad 800 \text{ Н} + 400 \text{ Н} = 1200 \text{ Н/м}^2$$

Расход воздуха в подушке на режиме висения согласно уравнению (3) при заданных $\alpha=0,8$; $\zeta=1,23 \text{ кг/м}^3$ составит:

$$Qm = 0,8 \cdot 4 \text{ м} \cdot 0,02 \text{ м} \cdot 1,23 \text{ кг/м}^3 \sqrt{\frac{2 \cdot 0,8 \cdot 1200 \text{ Н}}{123}} = 3,11 \text{ кг/с.}$$

Искомая мощность при заданных $\alpha=0,8$ и $\eta_2=0,8$ будет равна:

$$N = \frac{3,11 \text{ кг/с} \cdot 1200 \text{ Н}}{1,23 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,8 \cdot 0,8} = 4741,1 \text{ Вт.}$$

7. ЭКРАНОПЛАНЫ

Выше мы рассмотрели образование воздушной подушки, когда в замкнутое пространство вдувается воздух от двигательно-вентиляторной установки. Но эффект воздушной подушки может возникать и тогда, когда мы

вдуваем воздух в ограниченно-открытое пространство. Например, воздушная подушка может возникать при движении самолетного крыла в непосредственной близости земли, т. е. в непосредственной близости какого-то экрана.

Если крыло заставить двигаться над поверхностью земли или воды на расстоянии до 0,1 его ширины (хорды), то крыло будет испытывать дополнительную подъемную аэродинамическую силу. Эта сила пропадает при большом удалении от земли (экрана). Этот эффект называется *экраным* и используется в самолетах, названных по этому признаку экранопланами и экранолетами.

Эканный эффект также сохраняется, если, наоборот, крыло неподвижно стоит, а струи воздуха набегает на него, например, за счет поддува от работающих впереди крыла турбореактивных двигателей.

Подъемная сила, обусловленная экраным эффектом, равна:

$$F = \Delta p S_{\text{кр}},$$

где Δp — избыточное давление под крылом; $S_{\text{кр}}$ — площадь крыла в плановой проекции.

где ζ — плотность воздуха; v — скорость набегающего потока; $S_{\text{вх}}$ — площадь потока на входе; $S_{\text{вых}}$ — площадь потока на выходе.

Эканный эффект зависит от относительного расстояния между концом крыла и экраном $\left(h = \frac{h}{b}\right)$.

Чем меньше относительная щель между концом крыла и экраном, тем резче возрастает экранный эффект. С увеличением h экранный эффект уменьшается и при $h > 0,1$ может совсем пропасть.

Эканный эффект оказывает хорошее действие в первую очередь при взлете и посадке, а также при длительном полете на малой высоте над морем или степным районом.

Конечно, чтобы не цепляться за гребешки волн или неровности степи, экраноплан с большими размерами будет иметь больше запас по абсолютному расстоянию

между крылом и экраном. Так, например, при ширине крыла, равной 50 м, это расстояние составит приблизительно 3—4 м, а при 80 м 4,8—6,4 м.

Экраноплан может летать над водой с небольшой волной. Он предназначен для несения спасательной службы на реках и озерах. Самолетное шасси служит всего несколько минут — при взлете и посадке.

Зачем его «таскать», скажем, через Атлантический океан или через всю Сибирь, а еще хуже «таскать» с собой на орбиту, как это предполагается делать в случае воздушно-космического самолета. Целесообразнее было бы в дальнейшем соединить функции крыла и опорных поверхностей воедино, используя, например, экранный эффект.

В будущем считается весьма перспективным транспорт на магнитной подушке. Такой транспорт меньше шумит и не загрязняет окружающую среду.

Но этот вид транспорта основан не на аэродинамическом эффекте, а на магнитодинамическом, а потому выходит за рамки нашей книги.

8. ВОЗДУШНЫЕ ВИНТЫ

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

Но крыло, как и фюзеляж, хвостовое оперение, шасси и другие части самолета, испытывает лобовое сопротивление воздуха. Чтобы самолет мог совершать полет, необходимо, чтобы какая-то сила тянула его вперед, преодолевая лобовое сопротивление.

Какая же сила может тянуть самолет вперед? Ведь самолет нельзя тянуть на веревочке, как змей.

На самолете есть двигатель. Но двигатель сам не может тянуть самолет. Полезная работа двигателя идет на то, чтобы сообщить валу энергию вращения. Когда подобный двигатель установлен на автомобиле, то энергия вращения вала передается колесам. Колеса, отталкиваясь от земли, двигают автомобиль вперед. А как же быть в воздухе?

Оказывается, можно сделать так, что аэродинамическая сила, т. е. сила воздействия воздуха на движущееся в нем тело, будет не только оказывать вредное сопротивление, но и тянуть самолет вперед. Для создания

силы тяги в воздухе служат воздушные винты. Они применяются на самолетах, дирижаблях, аэросанях, глиссерах. До появления реактивных самолетов воздушный винт был единственным средством для сообщения самолету тяги. Двигатели, установленные на автомобиле, пароходе, тракторе, винтовом самолете, аэросанях, сами по себе еще 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 вперед. Такими посредниками, через которые передается работа двигателя, у автомобиля являются ведущие задние колеса, у корабля — водяной винт, у трактора — гусеницы, а у винтомоторного самолета — воздушный винт. Этих посредников принято называть *движителями*. Однако есть замечательный двигатель — реактивный двигатель. Он не нуждается в движителе. В нем давление газов без всяких промежуточных механизмов толкает камеру реактивного двигателя, заставляя ее перемещаться вперед в любой среде и даже в безвоздушном пространстве. Реактивный двигатель — это двигатель прямой реакции.

При полете самолета с поршневым двигателем реактивное действие осуществляется не непосредственно, а через движитель — воздушный винт, вращаемый двигателем. Воздушный винт при работе засасывает воздух спереди и отбрасывает его назад, в сторону, обратную полету. Воздух, который отбрасывается винтом, создает силу реакции, толкающую лопасти винта, а с ними и весь самолет вперед. 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 веслами гребец, тем большей получается сила, толкающая лодку вперед.

Для создания требуемой тяги лопасти современного винта мощного мотора должны отбрасывать воздух объемом более 200 м³ ежесекундно. При этом лопасти винта испытывают давление, направленное вперед, т. е. силу тяги. Чтобы при заданном диаметре винта и числе его оборотов увеличить массу 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

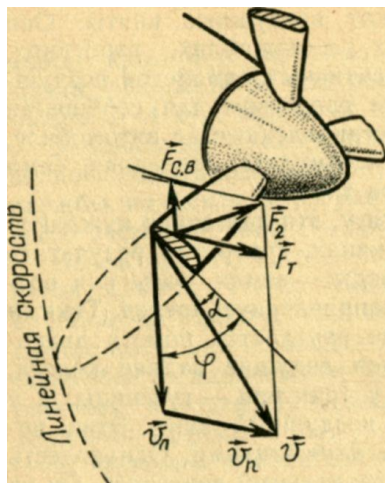


Рис. 43. Схема аэродинамических сил, действующих на лопасть винта в полете.

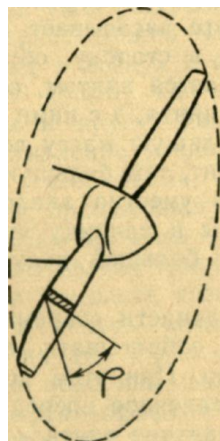


Рис. 44. Лопасти в виде плоских лопаток без закрутки при различных углах установки φ .

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 жесткой гайке.

Основоположником теории воздушных **ВИНТОВ** является Н. Е. Жуковский. Лопасть винта в поперечном сечении имеет вид профиля крыла самолета. Работа лопасти **ВИНТА** имеет много общего с работой крыла, но имеет и отличия. Так же как и крыло самолета, лопасть винта при движении атакует воздух под некоторым углом атаки α . В результате обтекания профиля лопасти на ней возникает аэродинамическая сила F_2 . Эту силу по правилу параллелограмма можно разложить на силу тяги F_T , действующую по направлению полета, и силу сопротивления вращению $F_{с.в.}$, которая преодолевается двигателем (рис. 43).

Говоря об угле 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 самолета лопасть винта совершает не одно,

а два движения. Она **вращается** и движется вперед. На лопасть набегают как бы два потока: поток в плоскости вращения, оттого что винт вращается, и поток, направленный перпендикулярно плоскости вращения винта, оттого что винт движется **поступательно** со скоростью полета вместе с самолетом. Скорости этих потоков являются векторными **величинами**. Если сложить эти два вектора по правилу параллелограмма, то получим абсолютное значение 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. 44). Повернем лопасти во втулке так, чтобы они были перпендикулярны плоскости (90°). Такой винт очень трудно вращать, и полезной работы от такого винта нельзя получить, так как он не развивает силу тяги. Он будет работать как мешалка в тесте. Принято говорить, что, чем труднее вращать **ВИНТ**, тем он тяжелее. Самым тяжелым винтом будет винт с углом установки лопасти 90° .

Возьмем другой крайний случай. Повернем 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 легким. Он также не дает полезной работы, так как его сила тяги 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 сила тяги. Таким образом, меняя углы установки или шаг винта, летчик может на винте с изменяемым шагом в зависимости от условий полета регулировать тягу винта, затежая или облегчая винт.

До скорости полета 750 км/ч воздушные винты работают хорошо, переводя приблизительно **80—83%** мощности двигателя в работу продвижения самолета. При скорости полета больше 750 км/ч КПД винта падает. Это видно из следующего. Из механики вращательного движения известно, что линейная скорость точки увеличивается с увеличением расстояния ее от оси вра-

шения. Поэтому сечения лопасти, лежащие ближе к ее концу, имеют наибольшую скорость. Например, при работе винта на месте диаметром 3 м, при скорости 2300 об/мин линейная скорость конца лопасти будет равна:

$$v_{\text{окр}} = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3,14 \cdot 3 \text{ м} \cdot 2300 \text{ об/мин}}{60 \text{ с}} = 360 \text{ м/с},$$

т. е. больше скорости звука.

Это при работе винта на месте. В полете же самолета винт, помимо вращательного движения, имеет еще поступательное движение. Это означает, что если самолет летит, например, со скоростью $v = 750$ км/ч, 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/ч, т. е. в 1,2 раза больше скорости звука. А мы уже знаем (см. с. 26), что влекут за собой подобные скорости. При таких скоростях на передней части лопасти возникает скачок уплотнения — сопротивление воздуха резко возрастет и для его преодоления к лопастям винта потребуется подводить большую добавочную мощность двигателя, при этом КПД винта сильно падает. И если бы самолеты стали штурмовать большие скорости полета с винтомоторной установкой, то из этого ничего бы не вышло, так как мощность винтомоторной установки, а с ней и масса самолета стали бы непомерно большими.

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

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

9. ВЕРТОЛЕТЫ

Может ли самолет 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 — вертолет. В воздухе вертолет поднимается прямо с места — без разбега. Опускается вертолет на землю отвесно — без пробега. При надобности он может повисать в воздухе и с помощью веревочной лестницы забирать на борт или высаживать людей.

Большинство современных вертолетов строится по классической схеме, предложенной в 1911 г. Б. Н. Юрьевым.

Современный вертолет состоит из фюзеляжа — корпуса, над которым в горизонтальной плоскости помещаются большие вращающиеся лопасти *несущего винта*. Этот винт является главной частью вертолета. На конце фюзеляжа укрепляются лопасти небольшого хвостового винта, вращающегося в вертикальной плоскости. У вертолета трехколесное шасси.

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

Лопасти несущего винта представляют собой длинные и узкие крылья. В поперечном сечении они имеют вид профиля крыла самолета, только у самолета крыло закреплено неподвижно и создает подъемную силу при поступательном движении самолета. У вертолета же лопасти закреплены подвижно — они вращаются. При вращательном движении на лопастях вертолета, установленных под некоторым углом атаки, как и у крыла самолета, возникает подъемная сила. В случае вертолета подъемная сила винта называется *силой тяги несущего винта*. Под действием этой силы вертолет поднимается в воздух. Лопасти во втулке несущего винта могут поворачиваться и устанавливаться под разными 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 летчиком. Помимо этого, по желанию летчика каждой лопасти можно придать разные установочные углы и получить на них неодинаковые подъемные силы. В ре-

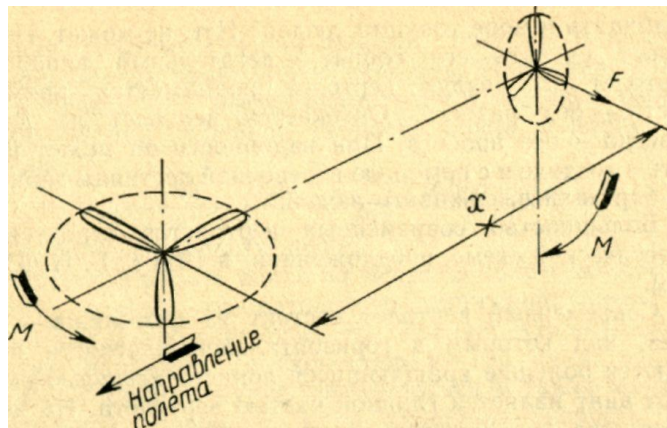


Рис. 45. Реактивный момент от главного винта уравнивается моментом от тяги хвостового винта.

зультате этого происходит смещение силы тяги винта. Смещенная сила тяги вызывает в итоге наклон вертолета. Горизонтальная составляющая силы тяги будет тянуть вертолет вперед, благодаря чему вертолет может лететь не только в вертикальном направлении, но и в горизонтальном. Наклонение силы тяги вправо или влево позволяет вертолету лететь в боковом направлении. Наклонение силы тяги в сторону хвоста позволяет вертолету лететь даже назад. Придание разных установочных углов каждой лопасти производится попеременно (циклически) при прохождении ими определенного сектора окружности. Это выполняется с помощью устройства, называемого автоматом перекоса, предложенного в 1910 г. Б. Н. Юрьевым. Автомат перекоса управляется из кабины летчиком.

При вращении у каждого винта, в том числе и у вертолетного несущего винта, возникает реактивный момент, стремящийся повернуть фюзеляж вертолета против вращения винта. Его необходимо парализовать. Он уравнивается моментом от тяги хвостового винта (рис. 45).

Выше (см. с. 43) мы видели, что подъемная сила крыльев, поддерживающая самолет в воздухе, возникает в том случае, если самолет имеет поступательную скорость относительно воздуха. В силу этого самолет не

может остановиться в воздухе. С уменьшением скорости полета до весьма низких пределов самолет будет «проваливаться» в воздухе, терять управление и перейдет в штопор или иное беспорядочное падение.

Самолет вынужден перед взлетом некоторое время разогнаться по аэродрому, пока подъемная сила крыльев не поднимет его в воздух.

Перед посадкой самолет полого заходит к аэродрому и затем некоторое время пробегает по земле.

Чем быстрее самолет, тем значительнее становятся у него перечисленные недостатки. Так, например, перед взлетом современный скоростной самолет-истребитель «бежит» по земле около 1000 м. Садится же на землю со скоростью, достигающей, например, до 280 км/ч (в два раза больше максимальной скорости, развиваемой автомобилем).

Для того чтобы уменьшить недостатки самолета, надо увеличивать площадь крыла. Однако это невыгодно, так как с увеличением площади крыла растут масса, сопротивление крыла и уменьшается максимальная скорость самолета.

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

Если у несущего винта сила тяги больше силы тяжести вертолета, то он может без разбега, прямо с места, вертикально подниматься в воздух. Если сила тяги несущего винта уменьшится и станет меньше силы тяжести вертолета, то вертолет будет вертикально опускаться.

У вертолета есть и свои недостатки. По сравнению с самолетом у него значительно меньшая скорость, дальность и высота полета. Однако у вертолета большое будущее в использовании его в таких областях, как связь, санитарная авиация, сельское хозяйство, лесное хозяйство, рыболовство, крановые операции и т. д.

Так же как и самолет, вертолет — русское изобретение. Изобретателем вертолета является русский ученый М. В. Ломоносов. Им была разработана и испытана действующая модель летательного аппарата, подъемная сила которого создавалась несущими винтами (см. цв.

вклейку VI, 1). Вертолет М. В. Ломоносова предназначался для подъема метеорологических приборов с целью исследования верхних слоев атмосферы.

У этого вертолета было два несущих четырехлопастных 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 уравнивались.

В разработке теоретических основ вертолета принимал большое участие и другой русский ученый — Н. Е. Жуковский, а его ученик Б. Н. Юрьев в 1908—1910 гг. спроектировал и построил первый вертолет, практически пригодный для полета.

В дальнейшем советские вертолеты, созданные по схеме Б. Н. Юрьева, в 1932 г. установили мировой рекорд высоты по классу вертолетов, поднявшись на высоту 605 м, перекрыв тем самым в 30 раз существовавший рекорд.

В 1940 г. советский конструктор И. П. Братухин построил вертолет оригинальной схемы с двумя разнесенными несущими винтами, а М. Л. Миль в 1969 г. создал тяжелый вертолет с полезной нагрузкой 4×10^4 кг также двухвинтовой схемы (см. цв. вклейку VI, 2).

Строительство советских вертолетов быстро идет вперед. На воздушных парадах в Тушино, на московском стадионе «Динамо» перед сотнями тысяч зрителей демонстрировались достижения советских вертолетов, созданных советскими конструкторами М. Л. Милем, А. С. Яковлевым, И. П. Братухиным, Н. И. Камовым и др.

10. 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 лобового сопротивления:

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

в основном увеличением площади движущегося тела. Па-

рашют, прикрепленный к какому-нибудь грузу, в сложенном виде занимает мало места. Тот же парашют с раскрытым куполом обладает большой аэродинамической поверхностью, следовательно, большим лобовым сопротивлением.

Применение парашютов крайне разнообразно. Пилотские парашюты применяются для спасения летчиков, грузовые парашюты — для спуска с самолета различных грузов. Парашюты применяют для спасения метеорологических приборов, для прыжков, а также для торможения пробега самолета при посадке на аэродром с ограниченными размерами.

Изобретателем первого ранцевого авиационного парашюта является наш соотечественник Г. Е. Котельников. Предложенный им парашют для спасения летчиков впервые был испытан в 1911 г.

С тех пор парашюты системы Г. Е. Котельникова спасли немало летчиков и являются необходимой принадлежностью самолетов.

Парашюты системы Г. Е. Котельникова и его продолжателя — Н. А. 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 в мире.

Парашютист в зависимости от обстоятельств не сразу открывает парашют. Например, при затяжных прыжках парашютист продолжительное время летит в воздухе, не раскрывая парашюта. При этом вначале он падает ускоренно, и, хотя аэродинамическая форма человеческого тела малообтекаема, все же через некоторое время в верхних слоях атмосферы достигается скорость падения более 180—200 км/ч. В дальнейшем заметного увеличения скорости не произойдет, так как сила аэродинамического сопротивления человеческого тела уравновесится его силой тяжести. После раскрытия парашюта скорость падения резко уменьшится и с некоторого момента, когда аэродинамическое сопротивление купола парашюта станет равным силе тяжести парашютиста вместе с парашютом, наступит спуск с постоянной скоростью (см. цв. вклейку V и рис. 46, а). Эта скорость легко подсчитывается, если приравнять силу тяжести спускаемого тела силе аэродинамического сопротивления.

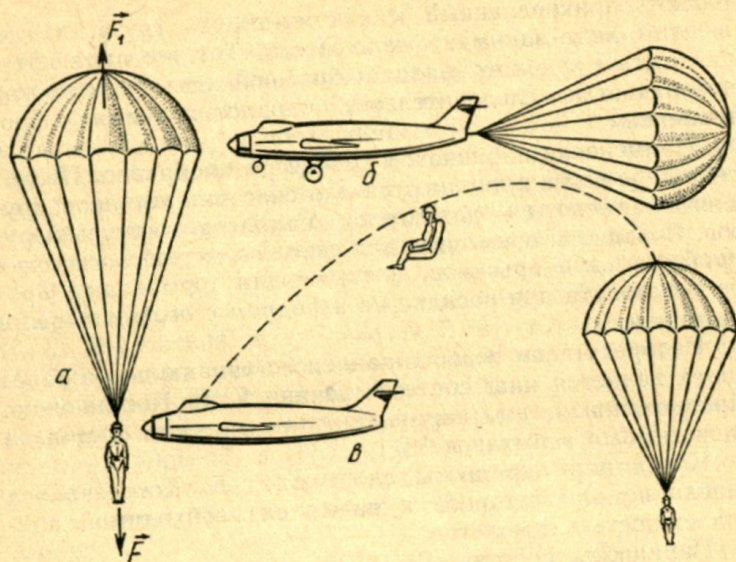


Рис. 46. Применение парашюта: а — спуск парашюта; б — сокращение пробега самолета с тормозным парашютом; в — схема действия катапultiруемого кресла пилота.

Тогда из формулы

находим, что

$$v_{\text{спуск}} = \sqrt{\frac{C_x \rho S}{2}}$$

Так, например, принимая массу парашютиста плюс массу парашюта равной:

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

коэффициент лобового сопротивления парашютного купола $C_x = 0,75$, площадь купола $S = 70 \text{ м}^2$, плотность воздуха у земли $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$, подставляя указанные значения в формулу, найдем, что скорость спуска парашюта для таких условий равна:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 900 \text{ Н}}{0,75 \cdot 1,25 \text{ кг/м}^3 \cdot 70 \text{ м}^2}} \quad \text{м/с.}$$

Парашют также используется для торможения самолета во время пробега по земле.

Ранее говорилось, что с ростом максимальной скорости самолета посадочная скорость его увеличивается, а следовательно, растет и пробег самолета. Торможение колесами уменьшает пробег самолета, но недостаточно, и тогда на помощь приходит тормозной парашют (рис. 46, б). Он «выбрасывается» сзади самолета в тот момент, когда самолет чуть коснется колесами земли, и тянет самолет назад, значительно сокращая пробег. Тормозной парашют становится особенно необходимым, когда самолет садится на мокрый аэродром (в этих случаях эффективность тормозов из-за сравнительно малого коэффициента трения колес сильно падает).

При полете на скоростном самолете летчику, терпящему аварию, не так легко воспользоваться парашютом. Дело в том, что на больших скоростях полета аэродинамическое сопротивление человеческого тела столь велико, что покинуть самолет обычным образом невозможно. В таких случаях пользуются (рис. 46, в) установкой, носящей название катапultiруемое кресло. Летчик нажатием кнопки принудительно «выстреливается» вместе с креслом в поток воздуха за пределы хвостового оперения самолета. При дальнейшем свободном падении скорость уменьшается и летчик, освободившись от кресла, раскрывает парашют.

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

Так, например, скоростной напор при скорости полета 1000 км/ч на высоте 500 м давит на квадратный сантиметр тела человека, в том числе и лицо, с силой, равной $\sim 4,60 \text{ Н}$.

Парашюты находят применение и для спасения исследовательской аппаратуры при полетах метеорологических ракет.

12. РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА

Раньше всех с полетом быстрее звука, а следовательно, и с резким скачкообразным увеличением сопротивления воздуха встретились в артиллерийской технике. Еще в XIX в. артиллерийские снаряды достигли скорости поле-

та, равной скорости распространения звука, а в настоящее время летают со скоростью полета, превышающей **110 м/с.**

Исследования и фотографии полета пули и снарядов показали, что при сверхзвуковом обтекании впереди пули образуется головная волна уплотнения воздуха, видимая на фотографии в виде узкой, косой и темной полосы. На поверхности головной волны возникает уже знакомый нам скачок **уплотнения**, в котором давление, плотность и температура воздуха скачком повышается, а скорость скачком понижается. Выйдя из скачка уплотнения, поток воздуха начинает разгоняться.

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 ссыывается бесчисленное множество воздушных вихрей, вследствие чего за телом образуется длинный вихревой след. Для уменьшения интенсивности скачков уплотнения, а следовательно, для уменьшения сопротивления воздуха головной части придают заостренную форму. Заострение головной части и удлинение цилиндрической части снаряда благотворно влияют на увеличение дальности полета.

Дальность полета снаряда зависит от начальной скорости.

В ствольной артиллерии снаряду сообщается начальная скорость с помощью больших давлений ($30\,000—40\,000\text{ Н/см}^2$), развивающихся в стволе орудия.

Дальнейшее повышение давления в стволе орудия крайне затруднено, так как вызывает значительное повышение температуры при **взрыве** заряда. Все это в свою очередь вызывает необходимость увеличения массивности ствола, масса орудия становится непомерно большой, 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 ее развитие шло крайне медленно. Лишь в XIX в. ракетной **артиллерией** заинтересовались вновь. Честь многих открытий и усовершенствований принадлежит русским ученым и изобретателям. Еще при Петре I в России было учрежде-

но ракетное заведение, где изготавливались стандартные сигнальные и осветительные ракеты для русской армии. В начале XIX в. генерал А. Д. Засядко создал русскую боевую ракету, которая была поставлена на вооружение армии и успешно применялась в боевых условиях. В середине XIX в. русский генерал К. И. Константинов значительно **усовершенствовал русскую ракету**, превзойшедшую зарубежные как по легкости, подвижности, кучности поражения, так и по безопасности в обращении.

В 1881 г. русский изобретатель Н. И. Кибальчич впервые в мире обосновал и составил смелый проект реактивного летательного аппарата для подъема человека в воздух.

Начиная с 1898 г. появляются замечательные работы по реактивной технике русского ученого и изобретателя К. Э. Циолковского.

В 1903 г. К. Э. Циолковский разработал теорию полета ракеты и научно обосновал применение ракет для межпланетных сообщений. Циолковский первый предложил клинообразный **аэродинамический** профиль и придание стреловидности крыльям для сверхзвуковых полетов. Им был предложен и обоснован реактивный двигатель, работающий на жидком топливе. Он показал перспективность применения жидкого водорода в качестве горючего, обеспечивающего высокую скорость отбрасываемых частиц.

Ученик К. Э. Циолковского, советский ученый М. К. **Тихонравов** в 1934 г. создал летающую ракету с жидкостным реактивным двигателем.

В период Великой Отечественной войны появилась первоклассная советская ракетная установка **«катюша»**, наводившая страх на **немецко-фашистских** захватчиков.

Ракета состоит из заостренного, вытянутого, цилиндрического корпуса, имеющего тонкую оболочку. В корпусе ракеты размещаются реактивный двигатель, горючее и полезный груз. В конце корпуса для стабилизации полета размещается хвостовое оперение. Иногда ракетам добавляют крылья, и тогда они называются крылатыми ракетами. Из-за наличия крыльев дальность полета у них больше, чем у бескрылых ракет. Крылья позволяют удлинить полет в разреженных и плотных слоях атмосферы.

Кроме того, крылья позволяют ракете лучше маневри-

ровать в воздухе. Крылатая ракета имеет много общего с самолетом.

Чем же отличается бескрылая ракета от самолета? В основном способом образования подъемной силы.

Летающие аппараты тяжелее воздуха и могут совершать полеты в воздухе, используя два динамических способа образования подъемной 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, реактивная сила будет тем больше, чем больше отбрасываемая за секунду масса газов и чем больше скорость этих газов.

Аэродинамический способ образования подъемной силы используют при полете самолеты, вертолеты, планеры, птицы, насекомые и некоторые животные.

Бескрылая ракета использует для своего подъема реактивный способ образования подъемной силы. Реактивный двигатель развивает силу тяги, которая преодолевает силу тяжести ракеты.

Понятно, что в безвоздушном пространстве, куда залетают ракеты, аэродинамический способ образования подъемной силы не подходит. Остается только реактивный способ. Он и был предложен и обоснован К. Э. Циолковским для передвижения в межпланетном пространстве.

Сердце ракеты — это ее реактивный двигатель.

Во всяком реактивном двигателе есть *камера сгорания* и *сопловая часть*. В камере сгорания происходит соединение горючего с окислителем. В результате сгорания образуется большая масса 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 (несколько километров в секунду) 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.

Если в камере реактивного двигателя сгорает порох, то двигатель называют *пороховым*.

В камеру сгорания может подаваться жидкое горючее — спирт, керосин, водород и жидкий окислитель — азотная кислота, жидкий кислород, и тогда двигатель называют *жидкостным реактивным двигателем*, сокращенно — ЖРД.

И наконец, в камеру сгорания может подаваться керосин и воздух, и тогда двигатель называют *воздушно-реактивным двигателем*, сокращено — ВРД.

Воздушно-реактивный двигатель характерен наличием большого заборника воздуха. Это уже не та малая трубка, по которой течет жидкий окислитель, а большой канал, имеющий в поперечном сечении площадь 1 м^2 и более.

Воздушно-реактивный двигатель применяется на самолетах. На ракетах же чаще употребляются пороховые и жидкостные реактивные двигатели. Эти двигатели очень «прожорливы». Жидкостно-реактивный двигатель за одну минуту может «проглотить» спирта и жидкого кислорода массой $9 \cdot 10^3 \text{ кг}$, но зато за эту минуту уносит ракету на высоту 40 км и сообщает ей большую скорость.

Ракете, летающей только в безвоздушном пространстве, можно было бы придать любую геометрическую форму — шара, куба, эллипсоида и т. д. Но так как начало и конец полета у ракеты протекает в плотных слоях атмосферы, а средняя часть полета — в разреженных, то ей придают современную аэродинамическую форму, имеющую много общего с формой удлиненной пули или отточенного круглого карандаша.

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

В воздушном пространстве по достижении достаточной скорости полет ракеты, так же как и полет самолета, управляется воздушными рулями.

Но как управлять аппаратом в безвоздушном пространстве? Ведь там, как ни отклоняй воздушный руль, аэродинамической силы не возникнет. Или как управлять аппаратом, когда он только трогается с места при старте? На помощь опять приходит силовое взаимодействие

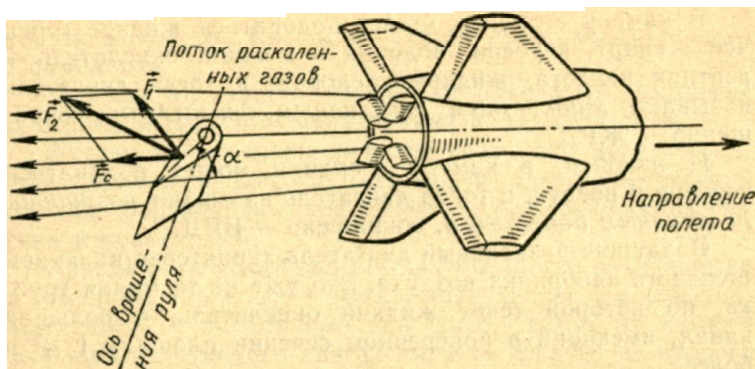


Рис. 47. Работа газовых рулей.

тела с газом. К. Э. Циолковским в 1903 г. изобретены газовые рули.

Газовый руль имеет форму, близкую к воздушному рулю, но ставится он не в воздушный поток, а в поток раскаленного газа, выходящего из сопла реактивного двигателя (рис. 47). Отклоняясь в ту или иную сторону, т. е. изменяя свой угол атаки (угол встречи руля с газовым потоком), газовый руль испытывает несимметричное обтекание. А мы уже знаем, что при несимметричном обтекании возникает аэродинамическая сила, направленная под углом к направлению движения. Эта сила, приложенная на некотором плече относительно центра тяжести ракеты, создает тот момент, который окажет поворачивающее действие на корпус ракеты в полете. Газовыми рулями можно управлять по тангажу, крену и курсу. Понятно, что газовый руль, работая в раскаленной газовой среде с температурой около 2000°C , должен быть выполнен из жароупорного материала, например из графита.

Ракета стартует вертикально и некоторое время летит в том же положении. В этом случае она быстрее может выйти из плотных слоев атмосферы, где аэродинамическое сопротивление ее полету велико. В отличие от вылета снаряда из ствола орудия ($700\text{—}900$ м/с) ракета в первые секунды старта взлетает с небольшой скоростью ($3\text{—}4$ м/с). Ее начальный полет хорошо виден. На пусковом столе ракета вздрагивает, потом медленно, как бы нехотя отрывается от стола, а затем все быстрее и быстрее уходит вверх и исчезает из наблюдения.

Далее приборы управления переводят полет на наклонный подъем. К концу работы двигателя ракета может развить, например, максимальную скорость около 5500 км/ч или около $1,5$ км/с, двигатель перестает работать, и ракета летит по инерции, как брошенный камень. Далее километров 200 полет происходит на высоте примерно 100 км со скоростью около 5000 км/ч. В конце полета под действием силы тяжести ракета возвращается в плотные слои атмосферы и падает на землю со скоростью приблизительно 3000 км/ч. Дальность полета ракеты при этом около 300 км.

Ракета может иметь при входе в нижние плотные слои атмосферы скорость, почти в три раза превышающую скорость звука. При такой скорости входа 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, к большим температурам нагрева тонкой оболочки корпуса. У головной части образуется сильное сжатие воздуха, сопровождающееся повышением температуры. Эта температура еще более увеличивается вследствие трения ракеты об уплотненный воздух.

Современное состояние аэродинамики и реактивных двигателей позволяет думать об огромных скоростях полета ракетных аппаратов.

При полете в безвоздушном пространстве такие скорости не вызовут осложнений, но при полете аппарата в атмосфере нагрев будет настолько сильным, что в конструкции аппарата потребуются применение жароупорных материалов и охлаждения поверхности аппарата теми или иными способами.

Естественно, что применение системы охлаждения вызовет увеличение массы конструкции ракеты, а это крайне нежелательно по следующим соображениям.

К. Э. Циолковский вывел формулу, по которой скорость полета 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 массы топлива к массе ракеты в конце работы двигателя (конечная масса ракеты):

$$v_{\text{ц}} = v_{\text{истеч.}} \ln(1 + z),$$

где $v_{\text{истеч.}}$ — скорость истечения газов из двигателя ракеты; $m_{\text{т}}$ — масса топлива; $m_{\text{кон}}$ — конечная масса ракеты.

Из формулы К. Э. Циолковского **следует**, что увеличение массы топлива и уменьшение конечной массы вызывает увеличение скорости полета ракеты.

Отсюда понятно стремление конструкторов как можно больше увеличить запас топлива и как можно уменьшить конечную массу ракеты, т. е. уменьшить массу конструкции ракеты. Это очень трудная задача.

При увеличении этого отношения скорость ракеты в свободном пространстве возрастает.

С целью **увеличения** отношения запаса топлива к конечной массе ракеты весьма целесообразно использование составных ракет или ракетных поездов. В таком поезде двигатели каждой ракеты работают поочередно и часть опустошенных от топлива ракет автоматически отделяется и, таким образом, освобождается от инертного груза, препятствующего интенсивному наращиванию скорости.

Последняя ракета поезда может развить огромную скорость.

По принципу составной ракеты была запущена первая в мире советская дальняя межконтинентальная баллистическая ракета конструкции С. П. Королева,

Первому в мире советскому искусственному спутнику Земли космическая скорость была сообщена при помощи составной многоступенчатой ракеты-носителя «Спутник», созданной на базе межконтинентальной баллистической ракеты.

Последняя ступень носителя сообщила шарообразному искусственному спутнику Земли скорость ≈ 8 км/с 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. Первый пилотируемый корабль «Восток» был выведен трехступенчатой ракетой-носителем.

С появлением спутников в принципе стал возможен полет с накоплением массы в верхних разреженных слоях атмосферы.

Обычно полет происходит с расходом массы...

А здесь с накоплением массы!

Как это могло бы происходить?

Представим себе такую схему полета. Спутник запущен на круговую орбиту высотой 100—130 км. Несмотря на малую плотность воздуха, аэродинамическое сопротивление не позволит существовать спутнику.

Однако если спутник снабдить двигателем малой силой тяги, рассчитанным на преодоление аэродинамического сопротивления, то спутник мог бы существовать в течение длительного времени.

Такой двигатель известен. Это электроракетный двигатель ионного или плазменного типа. В нем под действием электрической энергии ионизованный газ (N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 и др.) может ускоряться и выбрасываться со скоростью 20—80 км/с.

Если такой спутник снабдить воздухозаборником, то за один оборот вокруг земного шара мы смогли бы забирать воздух, размещенный в гигантском торе с внутренним диаметром $\approx 12\,000$ км и диаметром сечения тора, например, 8 м.

И если, скажем, половину воздуха, входящего за 1 с в воздухозаборник сжимать и направлять в топливный бак, а половину подавать в двигатель и выбрасывать из него со скоростью, в несколько раз превышающей скорость входа воздуха в воздухозаборник, то будет происходить полет с накоплением массы.

Накопленная масса за время полета t будет равна:

$$m = (m_{\text{в}} - m_{\text{сек}}) t$$

$m_{\text{в}}$ — секундная масса воздуха, входящего в воздухозаборник; $m_{\text{сек}}$ — секундная масса, используемая в двигателе в качестве топлива.

Время полета спутника-накопителя может составлять несколько лет при условии, что на борту аппарата находится ядерный реактор с преобразованием теплоты в электроэнергию.

Накопленным сжиженным планетным газом Марса, Венеры (CO_2), Юпитера, Сатурна, Нептуна (H_2 , метаном и др.) можно заправлять различные космические летательные аппараты.

Истоки проблемы присоединения массы восходят еще к Циолковскому, высказавшему мысль о перспективности использования внешних ресурсов в космических,

тяговых и иных системах, и в частности воздуха земной атмосферы в качестве «предмета для отбрасывания», исключающего расходование бортовой массы, заправляемой в ракету до ее старта.

13. 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 ее в атмосфере!

Люди упорно стремятся использовать дешевую энергию, и часто это удается.

Энергия рек путем установки плотин приводит в действие турбогенераторы, вырабатывающие дешесвую электроэнергию.

Другим примером использования дешевой энергии является использование энергии ветра с помощью ветродвигателей. Ветер обладает большой энергией. Сильный ветер гнет деревья, иногда срывает крыши с домов, а ураган сбрасывает железнодорожные вагоны и, вырывая деревья, бросает их на далекие расстояния.

Ветер принадлежит к безотходным источникам энергии. Преобразование такой энергии не связано с получением отходов, загрязняющих окружающее пространство.

Энергия ветра улавливается ветродвигателем (рис. 48). Ветродвигатели бывают многолопастными и малолопастными.

Но не вся энергия ветра, проходящая через поверхность, ометаемую ветродвигателем, может превратиться в механическую работу. Аэродинамики теоретически доказали, что только около 60% этой энергии можно перевести в механическую работу. А практически современные ветродвигатели превращают в механическую работу только 25—30% энергии ветра.

Теория и экспериментальные исследования ветродвигателей базируются на аэродинамике.

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

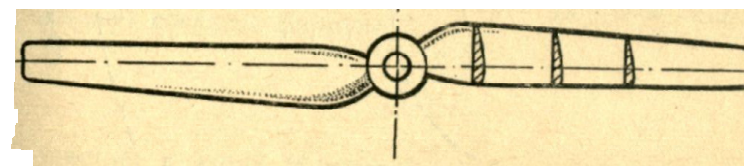
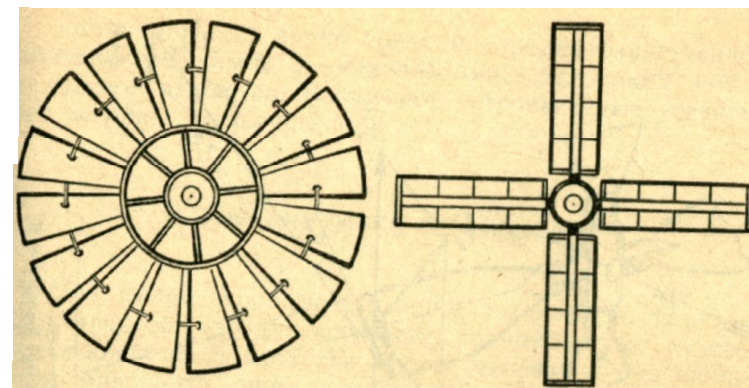


Рис. 48. Форма ветродвигателей.

У ветродвигателя на горизонтальном валу закреплены лопасти (рис. 49). Лопасти образуют с плоскостью вращения угол, называемый углом установки. В поперечном сечении лопасть современного ветродвигателя имеет вид профиля крыла самолета. Набегающий на лопасть воздушный поток атакует лопасть под некоторым углом атаки α . В результате обтекания на лопасти возникает сила аэродинамического сопротивления R_2 . Силу R_2 раскладывают по правилу параллелограмма на силы F_x и F_y . Сила F_x действует в направлении ветра. Она создает вредное трение в подшипниках ветродвигателя. Сила F_y действует в плоскости вращения ветродвигателя и создает 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 плоскости вращения ветродвигателя; второй поток возникает оттого, что ветродвигатель вращается, он действует в плоскости вращения лопасти. Скорости потоков

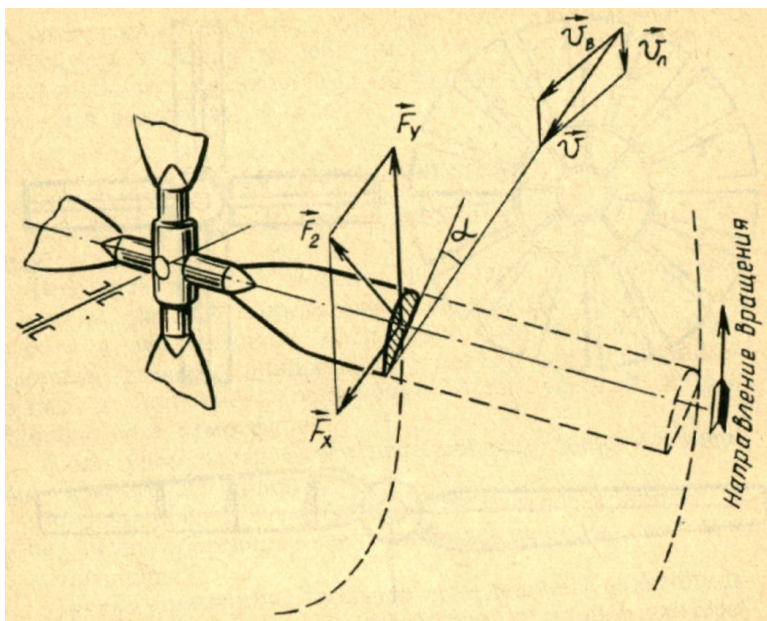


Рис. 49. Аэродинамические силы, действующие на лопасть ветродвигателя.

можно обозначить так же, как и силы, — через векторы ($\vec{v}_в$ — скорость ветра и $\vec{v}_л$ — линейная скорость). Если эти две скорости сложить, то получим направление и значение суммарной скорости набегающего воздуха. Заметим, что если ветродвигатель не вращается, то на лопасть будет набегать только один поток — ветер, направленный перпендикулярно плоскости вращения колеса.

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

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

Иногда ветродвигатели устанавливаются на самолетах и планерах для вращения электрогенератора.

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

14. АЭРОДИНАМИКА АВТОМОБИЛЯ

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

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

На магистральных дорогах легковой автомобиль может мчаться со скоростью около 100—140 км/ч. Эта скорость равна скорости ураганного ветра. Автомобиль лучше преодолевает это воздействие воздуха, если его форма обтекаема.

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

На скорости движения автомобиля, равной 40 км/ч, примерно 80% мощности затрачивается на преодоление сопротивления качения колес 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.

По целому ряду причин конструкторы автомобилей не могут к ней приблизиться так, как это сделали конструкторы самолетов, планеров и дирижаблей. **Автомобиль**, выполненный по идеальной форме, был бы непомерно длинен, кроме того, на выбор формы **автомобиля** влияет то обстоятельство, что **автомобиль** в отличие от самолета 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.

При конструировании **гоночных** автомобилей приходится считаться с вредным действием подъемной силы кузова. Подъемная сила возникает при действии **скоростного** напора на наклоненный кузов. Этот наклон появляется при **подпрыгивании** автомобиля на неровностях дороги. Подъемная сила уменьшает сцепной вес автомобиля, благодаря чему уменьшается давление колеса на дорогу, а с ним и движущая сила, приложенная к **покрышкам** баллона. Для **уменьшения** подъемной силы кузова гоночного автомобиля ему придают наклон вперед.

В целом же для **снижения** лобового сопротивления современному легковому автомобилю стремятся придать **плавные** обтекаемые формы: покатый капот, наклоненное ветровое окно, фары, утопленные в корпусе кузова, запасное колесо спрятано в багажник, крылья на колесах **объединены** с корпусом кузова, колеса сбоку прикрываются щитками, гладкое днище кузова и т. д.

Благодаря этому коэффициент лобового сопротивления в современных **отечественных** автомобилях уменьшен приблизительно 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 открытых грузовых автомобилей.

Представляет интерес вопрос: может ли автомобиль мчаться быстрее звука? До последних дней этот вопрос был спорный.

Могут ли его колеса вращаться с «бешеной» скоростью? Не разлетятся ли колеса под действием колоссальных центробежных сил? Хватит ли тяговых усилий двигателя для преодоления аэродинамического сопротивления при разумной массе автомобиля? Ведь

при скорости звука скоростной аэродинамический напор встречного потока воздуха $I \quad I$ составит около $72 \ 330 \text{ Н/м}^2$.

Будет ли автомобиль устойчив?

Долгое время все эти вопросы были спорными. Их надо было преодолеть при разработке и испытании гоночного автомобиля. В 1979 г. автомобиль поставил мировой рекорд скорости 1190 км/ч. Автомобиль имел весьма вытянутую форму (**длина** 14 м), подобно ракетному корпусу, с очень большими удлинением и заострением, что способствовало уменьшению аэродинамического сопротивления. В качестве двигателя использовался авиационный турбореактивный двигатель. Так что проблема передачи крутящего момента от двигателя к колесам отпадала. Устойчивость пути на больших скоростях достигалась наличием развитого вертикального оперения. Автомобиль имел, как и самолет, трехколесную схему шасси. Переднее колесо — управляемое. Покрышки колес были рассчитаны на крайне малый ресурс.

Рекордные заезды проводились на автодроме, представляющем собой длинное дно высохшего соленого озера. Это дно обычно используется в качестве аэродрома для испытаний новейших самолетов. Поверхность его почти идеально ровная, **благодаря** равномерному осадку солей и мельчайших частей грунта при высыхании озера в прошлом.

Мы привыкли отмечать аэродинамику в технике и часто не замечаем аэродинамических явлений в природе, а они встречаются на каждом шагу.

Понаблюдайте за природой: 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.

Природа многое подсказала создателям самолетов, вертолетов, парашюта. Но, наверное, не все. Еще много догадок и творческих мыслей придет к тому, кто умеет внимательно и зорко смотреть вперед, кто захочет пытливо изучать секреты природы.

Полеты в природе подчиняются законам аэродинамики. Ознакомимся с наиболее характерными примерами проявления аэродинамических закономерностей в природе.

1. ПОЛЕТ ПТИЦ

С давних пор человека привлекал полет птиц.

Пытливый ум человека добился того, что человек с 1912 г. стал летать быстрее птиц, с 1916 г. летает выше птиц и, наконец, с 1924 г. научился летать без посадки дальше птиц.

При полете птицы выполняют всевозможные фигуры. Они могут совершать вираж, глубокий разворот, «мертвую петлю», обратную «мертвую петлю» и т. д. Челове-

ество отняло у птиц и эту монополию. Начало этому было положено в 1913 г. русским летчиком П. Н. Нестеровым, впервые совершившим вираж, глубокий разворот и «мертвую петлю».

Если учесть несовершенство и примитивность тогдашней авиационной техники и отсутствие парашюта, то можно понять всю смелость полета русского летчика.

До настоящего времени человек не превзошел птиц по экономичности полета. Так, например, у самого лучшего самолета на 1 Вт мощности двигателя приходится около 0,02 кг/Вт массы, а у птицы кондора, который может поднять в воздух овцу, на 1 Вт приходится около 0,11 кг/Вт массы.

По сравнению с искусственными летательными аппаратами приспособляемость к изменяющимся условиям полета у «живых» летунов (птиц, насекомых, животных) выше. «Живая природа» нам многое может подсказать, тем более что рациональность некоторых аэродинамических эффектов проверена в природе естественным отбором.

К летательным аппаратам, как и к птицам, насекомым и животным, на разных этапах полета предъявляются различные требования. Удовлетворить их при фиксированных аэродинамических конфигурациях летательного аппарата становится труднее. Поэтому на помощь приходят методы, заимствованные у природы, а именно выпуск дополнительных поверхностей на посадке, создание приспособляемого к полету крыла, уборка посадочных устройств и многое другое.

Изучению полета 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 легкую и гибкую аэродинамическую поверхность. Если на крыло птицы посмотреть вдоль (рассечь поперек) раз-

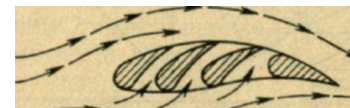


Рис. 50. а — птичий профиль; б — щелевой профиль крыла.

маха, то мы увидим характерный аэродинамический профиль, как говорят, птичий профиль (рис. 50, а).

Этим профилем часто пользовались строители первых самолетов. Профиль крыла птицы весьма гибок и в зависимости от условий полета может принимать различный вид, сильно меняя свою вогнутость. Сплошное крыло птицы может быть многоцелевым, обладающим большим коэффициентом подъемной силы.

Щелевое крыло, применяемое на некоторых самолетах (рис. 50, б), позаимствовано человеком у птиц.

Для полета любого аппарата нужна подъемная сила и сила тяги. Они также нужны и для полета птицы. Как известно, у самолета эти силы создаются раздельно: подъемная сила — крыльями, а тяга — винтовым или реактивным двигателем.

У птицы же подъемная сила и сила тяги создаются совместно — 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 разных углов атаки крыльям, т. е. для различных встреч профиля крыла с потоком воздуха.

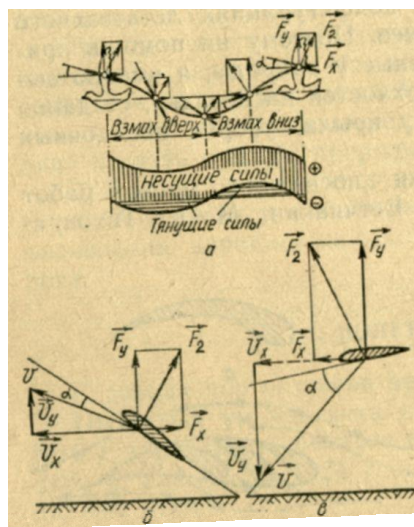


Рис. 51 Аэродинамические силы, действующие на крыло птицы.

Полный взмах крыла 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; разберем один из них.

Летит птица в установившемся горизонтальном полете. 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 (рис. 51, а).

При опускании (взмахе вниз) (рис. 51, б) крыла, сложив по правилу параллелограмма вертикальную скорость крыла v_y , направленную вниз с горизонтальной скоростью \vec{v}_x , равной скорости полета птицы, получим истинное направление скорости и ее значение:

$$\vec{v} = \sqrt{\vec{v}_y + \vec{v}_x}.$$

Исследования махания крыльями, проведенные известным советским ученым 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 F_2 , направленная вверх и вперед. Разлагая ее по правилу параллелограмма на две составляющие, получим вертикальную силу, противодействующую силе тяжести птицы, и горизонтальную силу, направленную вперед, т. е. силу тяги. Эта сила уравновешивает лобовое сопротивление птицы.

При подъеме (при взмахе вверх) (рис. 51, б) крыло имеет вертикальную скорость \vec{v}_y , направленную вверх, и одновременно горизонтальную скорость \vec{v}_x . Складывая эти скорости, получим истинную скорость. Если крыло в направлении этой скорости расположено под положительным углом атаки α , то при таком обтекании возникнет аэродинамическая сила, направленная вверх и назад. Разлагая ее, получим вертикальную силу, поднимающую птицу вверх, и горизонтальную силу, тянущую крыло назад, — отрицательную силу тяги.

Из рассмотрения взмахов видно, что птица получает поддерживающую силу как при опускании, так и при подъеме крыла. Тянущую же силу птица получает при опускании крыла, но она больше отрицательной силы тяги, в результате чего птица летит вперед. Построенные легкие модели с машущими крыльями, производящие взмахи по разобранному выше способу, успешно летали.

Помимо машущего полета, птица может совершать парящий полет. Это такой полет, при котором птица может набирать или сохранять высоту, не прибегая к

взмахам крыльев. Парящий полет птицами совершается с широко распростертыми крыльями. Парение птицами достигается за счет использования различных восходящих потоков. Подчеркнем отличие парения от планирования.

Как было сказано ранее, планирование — это полет со снижением, при нем птицы, не пользуясь взмахами, с распростертыми крыльями производят снижение.

В зависимости от того, к какому способу полета приспособлена птица, среди них различают птиц-парителей, малопарящих птиц и птиц-непарителей, летающих исключительно за счет 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 полета, ноги поджаты и почти не видны из перьев, напоминая самолетное «убранное шасси». Переход крыла к корпусу плавен (особенно у чаек). Хвостовое оперение минимально.

Современный планер является летающим аппаратом, во многом позаимствованным у птиц-парителей. Взгляните на них, высоко летящих с распластанными крыльями. Как много у них общего с планерами — большое удлинение крыльев, плавные линии, обтекаемый корпус.

Планеру не хватает только гибкости крыла и тех приборов, которые заменили бы человеку чутье птицы к восходящим потокам воздуха. Особенно планеры близки к морским парителям — альбатросам, чайкам, буревестникам. Заметим, что наиболее совершенной птицей в аэродинамическом отношении считается альбатрос. Он имеет самый большой размах крыльев, достигающий 4,2 м, и наибольшее удлинение крыльев: $\lambda = 17,65$.

Для сравнения птиц-парителей и планеров приводим таблицу.

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-парителей и у планеров. Особенно сильно влияет на аэродинамические качества удлинение крыльев.

Т а б л и ц а 1

Наименование птицы	Удли- нение крыла, λ	Удель- ная на- грузка на крыло, Н/м^2	Мини- маль- ная ско- рость сниже- ния при плани- рова- нии, м/с	Наименование планера	Удли- нение крыла, λ	Удель- ная на- грузка на крыло, Н/м^2	Мини- маль- ная ско- рость сниже- ния при плани- рова- нии, м/с
Альбатрос	17,65	120	0,51	«Темп»	12,9	161	0,8
Пеликан	10,86	88	0,42	«Рот- Фронт-7»	22,3	274	1,9
Чайка сере- бристая	9,8	25,2	—	Учебный «УС-6»	10,5	184	—
Гриф	9,8	76,6	—	Мускулет	18,6	22	—
Беркут	8,46	73,7	—				

Взлетно-посадочные качества птиц безупречны, за исключением тяжелых водоплавающих птиц.

Большинство птиц не могут «висеть» в неподвижном воздухе, но некоторые из них, 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. Масса колибри 1,6—20 г.

Наряду с посадочными и взлетными характеристиками птицы являются скоростью, дальностью и высотой полета. По наблюдениям наибольшей скоростью горизонтального полета $v = 144$ км/ч обладает стриж. Это не значит, что птицы в ином виде полета не могут летать быстрее. В пикирующем полете сокол-сапсан, преследуя добычу, развивает скорость до 360 км/ч. В горизонтальном же полете он развивает скорость 90 км/ч.

Заметим, в «живой природе» нет аналога летательному аппарату, который движется со скоростью звука.

Маневрирование птиц при полете на больших скоростях, например при полете чаек в погоду со шквалистым ветром, требует от птицы большого искусства. Если у птиц не было бы интуиции о необходимости уменьшения площади крыльев путем складывания или уменьшения угла атаки крыльев в момент ураганных порывов ветра, то крылья чайки могли бы быть поломаны.

Крайне редко такие случаи **отмечались**, когда отдельные чайки после ураганного ветра бродили по пляжу с поврежденными крыльями.

Скорость, при которой крыло чайки не выдержит скоростного напора, экспериментально в натуральных условиях не установлена.

В этой связи хочется вспомнить экспериментальный полет на планере, который был совершен в Советском Союзе в 30-е годы с научными целями.

Целью полета было установление скорости и особенностей поведения планера, при которых его крыло сломаётся в полете.

Эксперимент провел летчик-испытатель С. Н. Анохин. На большой высоте он постепенно, отдавая ручку управления от себя, ввел планер авиаконструктора О. К. Антонова в крутое снижение и, разгоняясь, наблюдал за поведением конструкции крыла до тех пор, пока оно не затрещало и сломалось пополам.

Было зафиксировано: в момент разрушения крыла **скорость** полета достигала 220 км/ч. Результаты полета позволили проверить теоретические расчеты и совершенство методики расчета на прочность и вибрации крыла в полете.

Птицы успешно соперничают с планерами по высоте полета.

Наблюдениями с гор и самолетов установлено, что наибольшая высота полета 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. На Тибете грифы и кондоры летают на высоте около 7000 м.

Дальность полета 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 днем и ночью летели из Новой Шотландии в Южную Америку, пройдя путь около 4000 км.

Человек, научившись летать, раньше всего превзошел птицу по скорости полета, затем по высоте полета и лишь позднее по **дальности** полета. Полеты на дальность в **сильной** степени связаны с экономичностью полета.

Экономичность полета летательного аппарата (в том числе и птиц) можно охарактеризовать отношением

массы 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. Проведем сравнение по экономичности полета между самолетом и птицей.

Таблица 2 показывает, что наибольшей нагрузкой на ватт мощности, а следовательно, и наибольшей грузоподъемностью обладают рекордные самолеты (по дальности). Им приходится нести с собой большой груз в виде горючего. Нагрузка на единицу мощности у них в среднем равна около **0,02** кг/Вт. Из таблиц 1 и 2 видно, что мускулет находится ближе к птицам, чем к самолетам. Мускулет — это летательный аппарат, который приводится в действие мускульной силой человека.

Нагрузка на 1 Вт у различных птиц весьма велика — до 0,18 кг/Вт, т. е. существенно больше, чем у самолета. Это подтверждает высокую экономичность полета 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 полет в технике еще не удалось воссоздать, хотя было сделано много попыток. Правда, отдельные легкие модели с машущими крыльями летают. Не надо думать, что здесь мыслится слепое подражание природе, копирование полета птиц.

Таблица 2

Название птиц	Нагрузка на единицу мощности, кг/Вт	Самолет	Нагрузка на единицу мощности, кг/Вт
Аист белый	0,180	Рекордный на дальность	0,020
Чайка	0,108	Пассажирский	0,0108
Грач	0,088	Учебный	0,0081
Голубь сизый	0,074	Бомбардировщик	0,0053
Ворона серая	0,070	Истребитель	0,0024
		Мускулет	0,1070

С развитием авиационной техники птицам и самолетам становится тесно в небе, что приводит к опасным обоюдным последствиям.

Вероятность столкновения самолетов с птицами повышается в сезонные миграционные перелеты птиц осенью и весной. Эти перелеты совершаются на высоте 300—2500 м. Крупные птицы, включая водоплавающих, летят еще выше. Местные же или кочующие птицы летят существенно ниже — на высоте 300—400 м. Стрижи и некоторые виды хищных птиц летят на высоте до 1500—3000 м.

Пролетающие стаи птиц определяются по засветке на экранах радиолокационной станции. Радиолокаторы, работающие в диапазоне волн 23 см, способны обнаружить стаи птиц на удалении приблизительно 90 км.

Изучение орнитологической обстановки на маршруте полета самолета и в районе аэродрома — очень важное мероприятие, способствующее безопасности полета. Оператор радиолокационной станции определяет наличие прелетных стай птиц на заданном участке маршрута.

В районе аэродрома при снижении и наборе высоты, а также на взлете и посадке самолета во избежание столкновений с птицами операторы должны изучать районы возможных скоплений птиц, знать их суточные перелеты, время и высоту перелетов, места гнездований и сосредоточения стай.

Мы перечислили далеко не полностью все аспекты отрицательного воздействия авиационной техники на природу.

Несомненно, надо сейчас уже изучать и предвидеть, как будет тесно в небе нашей маленькой планеты и как надо уберечь хрупкую, но жизненно важную природу.

2. ПОЛЕТ НАСЕКОМЫХ

Считается, что из всех известных в настоящее время видов живых существ приблизительно $\frac{3}{4}$ их способны к полету. Сюда относятся около 10 000 видов птиц, около 600 видов летучих мышей и главным образом летающие насекомые — их насчитывают около I млн. видов: стрекозы, бабочки, всевозможные жуки, мухи, комары, саранча, кузнечики и т. д.

Полет многих насекомых отличается большим совершенством. Крупная стрекоза-дозорщик из семейства ко-

ромысел не отставала от тихоходного самолета, летевшего со скоростью 144 км/ч. По другим данным, у стрекоз отмечалась скорость полета, равная 96 км/ч. У бабочек-бражников максимальная скорость полета доходит до 54 км/ч. Стрекозы, слепни, бражники по скорости полета могут быть сравнены с некоторыми птицами. Большинство других насекомых летает гораздо медленнее.

Дальность полета без посадки у некоторых насекомых, как например у саранчи, весьма велика, например, при перелете саранчи через Красное море, где промежуточные посадки этих насекомых были невозможны. С промежуточными же посадками американская бабочка при своих миграциях покрывает расстояние до 4000 км, как, например, при полете из Мексики в Канаду и Аляску.

Некоторые насекомые способны создавать достаточную для полета аэродинамическую силу при подъеме 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 полетов. Некоторая часть их, например поденки, может парашютировать. Для этого они, взлетев вертикально вверх на 1—2 м, останавливают крылья в несколько приподнятом состоянии и медленно опускаются вертикально вниз.

Планирующий полет 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—5 мин, а стрекозы даже парить, используя восходящие потоки воздуха от нагретой земли. Однако планирующий вид полета, а тем более парящий полет у насекомых встречается редко.

Машущий полет является основным видом полета 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

стрекозы	—	80—100
осы	—	110
шмеля		240
комнатной мухи	—	330
пчелы	—	400
комара	—	594

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

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

Большинство насекомых прекрасно маневрируют в воздухе. С полного хода они могут резко повернуть в сторону. У некоторых это достигается внезапным прекращением работы крыльев той стороны тела, куда насекомое должно повернуть, что вызывает своего рода резкий и далекий прыжок летящего насекомого в **сторону**. **Управляемым** полетом хорошо владеют стрекозы: они при охоте за мелкими летающими насекомыми или драке между собой могут резко отклониться в сторону и, следуя друг за другом, в точности повторять маневры впереди летящего насекомого. Кроме этого, стрекоза, преследуя ускользающую от нее вверх добычу, может взлететь 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.

Некоторым насекомым доступен полет назад, а также «зависающий полет», при котором их туловище неподвижно висит в воздухе. У мух и пчел в это время **энергично** работают крылья, оставляя в воздухе силуэт в виде двух туманных полукругов. Из этого положения насекомое время от времени может внезапно перескочить в сторону так быстро, что уловить это глазом невозможно; можно лишь убедиться, что насекомое из прежнего места исчезло и появилось в другом месте.

Наряду с этим часть насекомых плохо **управляет** своим полетом. Не умея в короткое время создать долж-

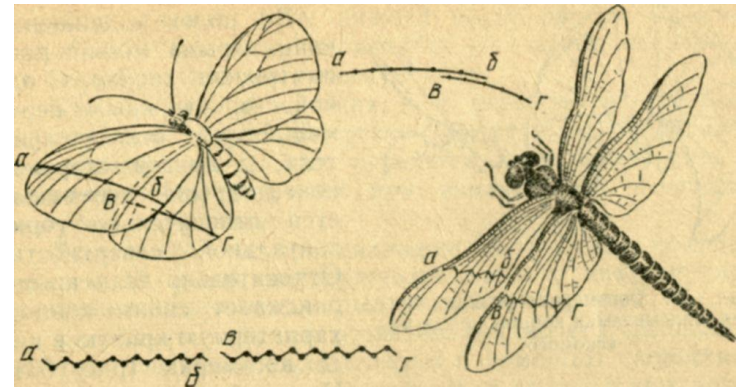


Рис. 52. Профиль крыльев у насекомых.

ную аэродинамическую силу, способную изменить направление полета, они часто налетают на **различные** препятствия. Крылья насекомых сплошные, поэтому они ближе к самолетным, чем к птичьим. Они представляют собой гибкие, **эластичные**, чаще всего прозрачные хитиновые пластинки, имеющие в продольном направлении утолщения — жилки, играющие роль самолетных 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 рисунке 52 и цветной вклейке VII, 2.

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

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

Как и всякому летательному аппарату, для полета насекомого нужна подъемная сила и сила тяги. Эти аэродинамические силы создаются крыльями.

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

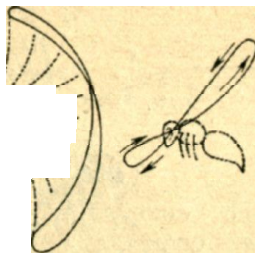


Рис. 53. Восьмеркообразная кривая, описываемая концом крыла на сскогого.

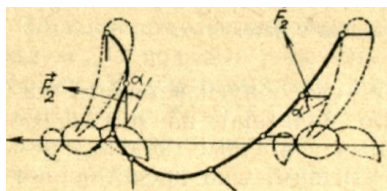


Рис. 54. Кривая, описываемая концом крыла насскогого.

тать крыльями под прямыми лучами солнца. В воздухе блестящие кусочки золота вычерчивали восьмерку подобно тому, как это получается, когда горящим углем быстро машут в темноте.

По отношению к неподвижному наблюдателю крыло описывает своим концом волнообразную кривую, напоминающую синусоиду (рис. 54).

В разных точках кривой, которую описывает машущее крыло, резко меняется наклон пластинки (профиля) крыла. При движении крыла вниз и одновременно вперед 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.

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

При взмахе вниз, т. е. при движении по нисходящей

В полете 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 восьмерки (рис. 53). При обычном горизонтальном полете ось этой кривой наклонена к горизонту в среднем приблизительно на 45°. Для исследования восьмеркообразной кривой приклеивались кусочки сусального золота к концу крыла золотом, закрепляли ее неподвижно и заставляли работать.

линии синусоиды, в ее нижней части профиль крыла, приобретая все увеличивающийся угол атаки, испытывает большую аэродинамическую силу.

Крыло при взмахе вверх, т. е. переходя на восходящую линию синусоиды, резко меняет свое 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 подъемной силой, поддерживает тело в воздухе; при движении крыла вверх крыло **СОЗДАЕТ** силу тяги.

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

3. ПОЛЕТ МЛЕКОПИТАЮЩИХ, РЫБ И РАСТЕНИЙ

Некоторые млекопитающие и рыбы могут летать. Для этого у них есть аэродинамические поверхности. 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, населяющие леса Южной Америки и питающиеся насекомыми и соками плодов. Крыланы, или, как их иногда называют, летучие собаки, обитают в тропической части Америки, в Индии и Австралии.

Животными, у которых аэродинамические поверхности развиты слабо и служат только вспомогательными органами, являются обыкновенные белки, белки-летяги, водящиеся в лесах Сибири (рис. 55), шерстокрылы (рис. 56), живущие на островах Индийского океана, и когуаны, иногда называемые летучими маки. Их пассивные, **немашущие**, аэродинамические поверхности позволяют им после прыжка совершать только планирующий полет.

Обыкновенная белка имеет пушистый хвост, обладающий относительно большой аэродинамической поверх-

Рис. 55. Сибирская белка-летяга в полете.

НОСТЬЮ. Им белка ловко пользуется при прыжках с ветки на ветку. Возникающая на распушенном хвосте аэродинамическая сила удлиняет 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—50 м. Как ей это удастся? Оказывается, увеличение дальности прыжка в 4—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, покрытые 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 создается достаточная подъемная сила, позволяющая белкам-летягам совершать планирующие полеты.

Белка-летяга при помощи своих аэродинамических поверхностей может немного изменять направление своего полета, 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.

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 и на длину 70 м.

С аэродинамической точки зрения у рассмотренных животных мы не обнаруживаем тех совершенств, которые имеются у птиц и некоторых насекомых. Этим животным не дано парить или совершать машущий полет. 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 $\lambda = 6—8$ (см. цв. вклейку VII, 1). Летучие мыши и крыланы летают при помощи взмахов крыльями. Полет летучих **мышей** легкий и быстрый. Они хорошо маневрируют в воздухе, на одном месте подобно птицам — зимородку и пустельге.

Летучие мыши могут совершать большие перелеты и подниматься на высоту до 2000 м. Обладая хорошими летными качествами, летучие мыши интересны и тем, что имеют сплошное крыло, образованное не перьями, а голыми сплошными перепонками. Этот факт лишний раз доказывает, что полет с помощью взмахов крыльями можно совершать не только на крыльях, покрытых перьями, но и на сплошных и что машущий полет не является монополией пернатых.

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

Летучие рыбы. 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 ветра забрасывает их на палубу проходящего корабля. Если рассмотреть такую рыбу, то в глаза бросается большая длина грудных и хвостовых плавников (рис. 57). Расправленные грудные плавники по форме напоминают удлинненные крылья, обладающие сравни-

Рис. 57. Летучие рыбы.

тельно большой площадью, на которой при полете **летучей** рыбы возникает аэродинамическая сила. Летучая рыба, предварительно разогнавшись в воде, сильным движением хвоста вырывается в воздух и, пользуясь распростертыми плавниками, как крыльями, совершает пологий планирующий полет. Этот полет летучей рыбе нужен для защиты от преследования морских хищников: акул, косаток и др.

Полет летучей рыбы стабилизируется хвостовыми плавниками. Аэродинамические поверхности летучих рыб неактивны, 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 $100\text{—}300\text{ Н/м}^2$. Полеты летучие рыбы совершают со скоростью около 30 км/ч, поднимаясь при этом до 3 м. Дальность полета достигает $100\text{—}150$ м, редко больше. Продолжительность пребывания в воздухе равна $10\text{—}18$ с.

Крылатые семена. 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 разлета созревших семян.

Семена клена (рис. 58) имеют сравнительно большую аэродинамическую поверхность в виде двух симметрично расположенных лопастей. Лопастей семечка клена имеют

Рис. 58. Аэродинамические формы семян: березы, клена, ясеня.

некоторую аэродинамическую закрутку. Поэтому, падая **на** землю, они совершают быстрое вращательное движение, несколько напоминая авторотацию (самовращение) вертолетного несущего винта. При таком вращении аэродинамические силы увеличивают время падения семечка, а следовательно, увеличиваются шансы на отос ветром семечка в сторону.

Семя ясеня в отличие от клена имеет одну длинную опать, тоже вращающуюся при падении созревшего семечка. Семена березы имеют по бокам два легких симметричных крылышка. Легкие семена тополя окружены маленьким пухообразным комочком. При движении воздуха на этой поверхности появляется аэродинамическая сила, позволяющая семенам тополя в теплые сухие дни подниматься высоко в воздух и долго **парить**, далеко улетаая от родного дерева.

Аэродинамическими поверхностями наделены семена одуванчика, чертополоха, **мать-и-мачехи**, рогоза и т. д. (рис. 59). Природа придала этим семенам легкую поверхность, обладающую большой парусностью.

В атмосфере всегда действуют токи воздуха от малейших дуновений до сильного ветра. Они-то, воздействуя **на** поверхность созревшей шапки одуванчика, раздувают ее и создают аэродинамические силы, уносящие на многие километры семена-путешественники.

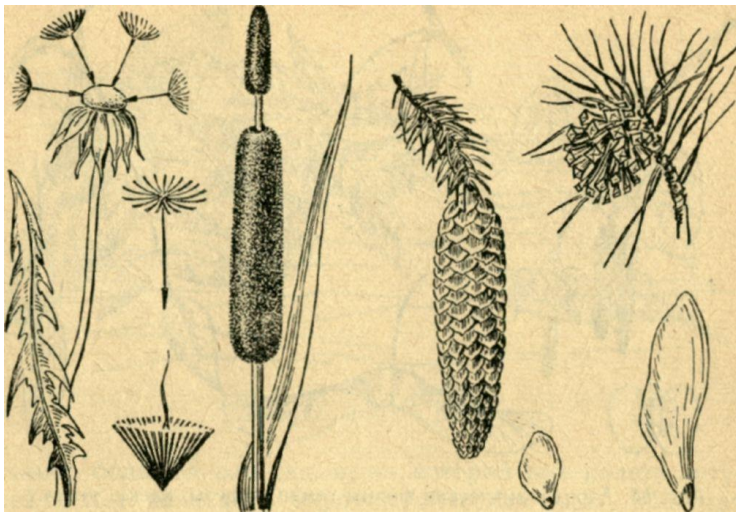


Рис. 59. Аэродинамическая форма семян одуванчика и рогоза.

Рис. 60. Аэродинамическая форма семян сосны и ели.

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 такого крылышка семечко под воздействием ветра быстро, как бугер, скользит по насту, передвигаясь на десятки километров от материнского дерева (рис. 60).

У степных растений — курая, рогачка, качима, катрана и др., известных в народе под именем «перекати-поле» (рис. 61), само семечко не имеет аэродинамической

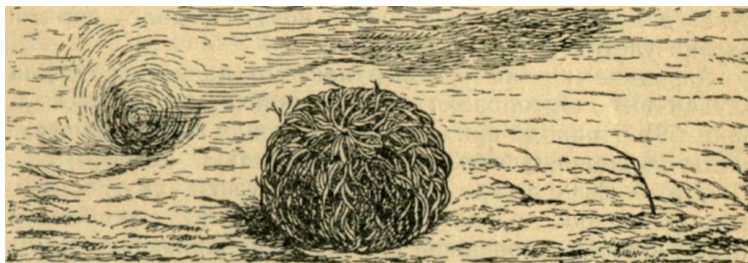


Рис. 61. Аэродинамическая форма растений «перекати-поле».

поверхности, но зато высохшие стебли этих кустов переплетаются в шарообразную форму, представляющую собой значительную аэродинамическую поверхность. Осенью стебель такого растения под действием ветра отламывается у корня и сухой шар перекатывается 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 все на своем пути (см. цв. вклёску VIII, 2).

Солнце неравномерно нагревает земную поверхность из-за ее неоднородности (моря, суша, горы, степи, леса). Это и является основной причиной возникновения местных воздушных течений. Более нагретый воздух, расположенный над обнаженной землей, 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. В нижнем слое менее нагретый воздух направляется в сторону теплого.

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 завихренное 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 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

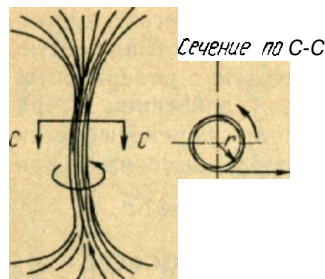


Рис. 62. Схема смерча.

воздуха, поперечник которых достигает десятки и сотни метров. Одновременно столб несется вперед. Воздух в нем вращается вокруг вертикальной оси и при этом перемещается вверх. Скорость движения внутри него может быть около 100 м/с (рис. 62). При 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 ее в себя, образуя колоннообразную вращающуюся массу воды. Такой вихрь носит название водяного смерча, а вихрь, проносящийся над сушей, — *тромба*. Водяные смерчи образуются на морях, озерах и реках. Особенно эффектны, 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.

Вместе с водой смерч втягивает в себя все достаточно легкие 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 вихря оставаться на высоте. Позднее, когда смерч пройдет некоторое расстояние и интенсивность его ослабнет, они падают на землю вместе с дождем. Иногда это происходит в большом отдалении от воды.

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 m полный шкив диаметром 1 м, имеющий несколько наклоненных радиальных перегородок (см. цв. вклейку VII I, 1). Если шкив привести в быстрое вращательное движение, то он начнет 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 придет 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 своем пути возвышенность, отклоняется ею вверх. За возвышенностью поток будет снижаться.

Восходящие и нисходящие потоки могут еще образовываться в области грозовых и кучевых облаков, достигая скорости 10—30 м/с. Кучевые облака — это вершина восходящих воздушных потоков.

Закон образования воздушных течений необходимо знать пилотам планеров, самолетов и вертолетов.

При полете в восходящих и нисходящих течениях самолеты испытывают сильную «болтанку». При встрече с такими потоками резко и часто меняются углы атаки крыльев. Так, например, если самолет летит под углом атаки 1° со скоростью 100 м/с и под него поддул восходящий поток со скоростью 20 м/с, то угол атаки увеличится в 12 раз (рис. 63). Если на тот же самолет подействует нисходящий поток со скоростью 20 м/с, то угол атаки уменьшится, примет отрицательное значение, при котором подъемная сила станет отрицательной и самолет начнет проваливаться.

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

Эти явления часто и неправильно объясняют наличием в воздухе каких-то «воздушных ям». У человека, летящего на самолете, воздушная «болтанка» вызывает ощущение,

близкое к тому, что испытывают при качке на море.

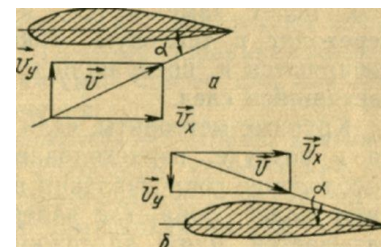


Рис. 63. Изменение угла атаки самолета при полете; а — в восходящем потоке; б — в нисходящем потоке.

В таких резко меняющихся условиях, особенно у передних кромок грозových облаков, летать опасно. Самолет может разрушиться. По имеющимся летным наставлениям грозные облака надо обходить.

Другим интересным явлением в атмосфере, относящимся к аэродинамике больших скоростей, является полет метеоритов. Полет метеорита можно видеть в ясную ночь, когда внезапно на небе появляется яркая «падающая» звезда. Она беззвучно прочерчивает светящийся след среди неподвижных звезд и также тихо исчезает.

Метеоритные тела бывают размером от мельчайших крупинок до крупных металлических и каменных глыб. Каждый час на нашу Землю обрушивается большое число метеоритов-пришельцев из далеких пространств. И если бы воздух атмосферы не оказывал им сопротивления, то наша Земля подверглась бы варварской небесной бомбардировке. Воздух, окутывающий Землю, служит надежной «броней» от метеоритов. Но иногда эта «броня» ими пробивается, и тогда на землю выпадают метеориты. Эти метеориты до взятия проб грунта на Луне советскими и американскими космическими аппаратами были единственными небесными телами, которые можно взять в руки. Метеоритные камни влетают в атмосферу холодными, имея в среднем на высоте 100—120 км скорость $1,2 \cdot 10^4$ — $7 \cdot 10^4$ м/с.

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

Мелкие метеоритные камни массой в несколько долей килограмма встречают в воздухе огромное сопротивление, полет 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 рассыпаться в воздухе, израсходовав кинетическую энергию на преодоление сопротивления воздуха, в конце пути замедляют полет. Зона, где задерживается полет метеорита, называется зоной задержки. Из нее метеорит падает на Землю, как обычно брошенный с большой высоты камень, достигая при встрече с Землей скорости 100—200 м/с.

Из ознакомления с аэродинамикой больших скоростей

известно, 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. 64). Волна уплотнения от метеорита, распространяясь в воздухе, доходит до поверхности Земли, порождая звуковые и ударные волны. Сопротивление воздуха на больших скоростях зависит от числа M . У ракет это число доходит до 25. У метеоритных тел оно может достигать 100.

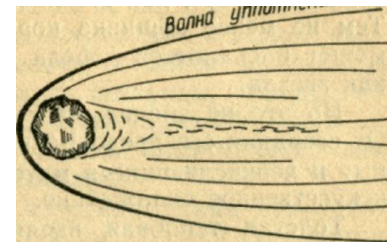


Рис. 64. Схема обтекания метеорита.

Летательным аппаратам будущего предстоит летать со скоростью метеоритов, поэтому изучение полета метеоритов представляет большой интерес. Недалеко то время, когда аэродинамики, вооруженные 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 аэродинамикам.

Полет метеоритов в атмосфере напоминает нам о тех трудностях, с которыми встречается человечество при осуществлении космических полетов.

Космический корабль дважды пронизывает атмосферу Земли — в начале и конце полета. При взлете корабль пересекает атмосферу со скоростью, значительно меньшей, чем при возвращении. Поэтому аэродинамическое сопротивление и аэродинамический нагрев при подъеме не имеют столь грозного значения.

При возвращении из «космического рейса», врезаюсь с колоссальной скоростью в атмосферу, космический корабль встречает огромное сопротивление воздуха, которое вызывает высокий аэродинамический нагрев.

Однако скорость космического корабля при входе в атмосферу меньше скорости метеоритных тел. Поэтому у космического корабля аэродинамическое сопротивление не вызывает столь резкого торможения и столь вы-

сокого нагрева, как это наблюдается у метеоритных тел. Тем не менее обшивка корпуса корабля нагревается и может раскалиться добела и на время даже засветится как звезда.

Но это не значит, что космический корабль сгорит. От сгорания его предохраняют **абляционные**¹, жаропрочные и **неокисляющиеся** материалы, тепловая изоляция и искусственное охлаждение.

Толстая тепловая изоляция задерживает большую часть теплоты, а проникшую внутрь корабля — встречает мощная система искусственного охлаждения.

Приближаясь к Земле, космический корабль имеет огромную скорость, которую необходимо **снизить для** благополучного приземления.

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

Кроме аэродинамического способа торможения, возможно еще торможение при помощи собственного двигателя, выбрасывающего струю газов по направлению полета. Такое торможение для достаточного снижения скорости **космического** корабля требует дополнительно большой массы топлива, да вдобавок требуется еще топливо, которое необходимо, чтобы унести с собой посадочное топливо. Из этого следует, что аэродинамический способ торможения является более рациональным.

При аэродинамическом торможении скорость сначала уменьшается за счет сопротивления, испытываемого корпусом корабля. Когда сопротивления, оказываемого корпусом, становится недостаточно, можно ввести в действие относительно небольшой специальный парашют. Конечно, такой **тормозной** парашют изготавливается не из легкого шелка или капрона, а из жаропрочного материала.

* * *

Прочитав эту книгу, читатель ознакомился с основами аэродинамики и многочисленными примерами и явлениями, взятыми из техники и природы.

¹ Абляция (лат. ablatio) — отнимание, отнесение материала с поверхности тела потоком горячего газа.

Значение аэродинамики далеко не исчерпывается приведенными примерами. Аэродинамика, как и всякая **наука**, позволяет глубже проникать в тайны природы и помогает человечеству устранить преграды, стоящие 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 конструкторами и летчиками-испытателями скоростных самолетов проделана большая работа по освоению сверхзвуковых и звуковых скоростей. Перед учеными и инженерами, работающими в аэродинамических **лабораториях**, на заводах и участвующими в экспериментах, стоит задача дальнейшего усовершенствования устройств и изучения явлений, связанных с аэродинамикой.

Некоторые характеристики пассажирских самолетов и вертолетов

Показатели	Самолеты						
	Ил-18Д	Ан-24	Як-42	Ту-134А	Ту-154А	Ил-62М	Ил-86
Число пассажиров . . .	122	50	120	76	164	198	350
Коммерческая нагрузка самолета*, т	13,5	5	14,5	8,2	18	23	42
Взлетная масса самолета	64	21,0	52	47	94	165	206
Крейсерская скорость**, км/ч	650	450 475	820	850	850	900	850—950
Практический потолок полета, км	9,2	8,9		11,5	12,3	12	
Дальность полета, км .	6600	2000	1850	3000	4800	11050	3600—5800
Длина разбега при взлете, м	1300	550—700	750—900	1400—1500	1200—1370		1200—1500
Скорость, при которой самолет отрывается от земли, км/ч	235	170—180	230	275—290	≈ 270		

* Коммерческую (полезную) нагрузку самолета составляет масса почты, грузов, багажа, пассажиров (в нее не входит масса топлива, смазочного масла, служебного снаряжения и др.).

** Крейсерская скорость — скорость полета самолета на наиболее экономичном режиме.

Длина пробега при посадке, м	800—900	550	1000—1200	600—800	1000		1100—1200
Посадочная скорость, км/ч	260	170		235 -250	240		260
Мощность одного двигателя, кВт (л. с.)	3130(4250)	1880(2550)	—	—	—	—	
Тяга одного двигателя, кН	—	—	63,7	66,7	102,9	112,8	127,5
Число двигателей .	4	2	3	2	3	4	4
Габариты самолета, м .	35,9	23,5	36,4	37,0	47,9	53,1	53,5
	10,2	8,3	9,8	9,1	11,4	12,4	15,5
размах крыла .	37,4	29,2	34,9	29,0	37,5	42,5	48,1

[illegible][illegible]

ВИКТОР ПАВЛОВИЧ КАЗНЕВСКИЙ

АЭРОДИНАМИКА В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

Зав. редакцией *И. В. Хрусталь*

Редактор *Т. Л. Каткова*

Мл. редактор *Л. С. Дмитриева*

Художники *С. Ф. Лукин, В. Д. Соловьев,*

В. М. Иванова

Художественный редактор *В. М. Прокофьев*

Технический редактор *В. В. Новоселова*

Корректор *Т. А. Воробьева*

ИБ № 8379

Сдано в набор 13.02.85. Подписано к печати 18.07.85.
А12939. Формат 84 X 108¹/₃₂. Бум. ки.-журн. отечест.
Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ.
л. 6,72+0,42 вкл. Усл. кр.-отт. 9,24. Уч.-изд. л. 6,31+0,58
вкл. Тираж 123 000 экз. Заказ № 174. Цена 30 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство
«Просвещение» Государственного комитета РСФСР по
делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
129846, Москва, 3-й проезд Марьиной роши, 41.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль,
ул. Свободы, 97.

