

**К. Шютт**

# **Введение в физику полета**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
К11

**К. Шютт**  
К11 Введение в физику полета / К. Шютт – М.: Книга по Требованию, 2014. – 208 с.

**ISBN 978-5-458-46535-9**

Основная задача книги заключается в ответе на вопрос: как возникают аэродинамические силы, которые поддерживают в воздухе самолет, часто весящий несколько десятков тонн. Для ответа на этот вопрос сначала исследуются в систематической последовательности сопротивление тел, находящихся в потоке жидкости, линии тока и вихри, возникающие при обтекании этих тел, затем обтекание крыла самолета и распределение давления на нем - все в сопровождении многочисленных наглядных опытов. Материал дается в методическом изложении, неоднократно проверенном автором на большом круге слушателей с различной степенью подготовки. Книга - перевод с пятого немецкого издания К. Шютта. При переводе в основном сохранен текст оригинала. Некоторой переработке подверглись места, относящиеся к винту и виражу и даны фотографии советских самолетов вместо аналогичных иностранных. Книга предназначалась в основном для преподавателей физики в средней школе, желающих ввести в преподавание физики элементы теории авиации. Перевод Г.А. Вольперта с пятого немецкого издания

**ISBN 978-5-458-46535-9**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



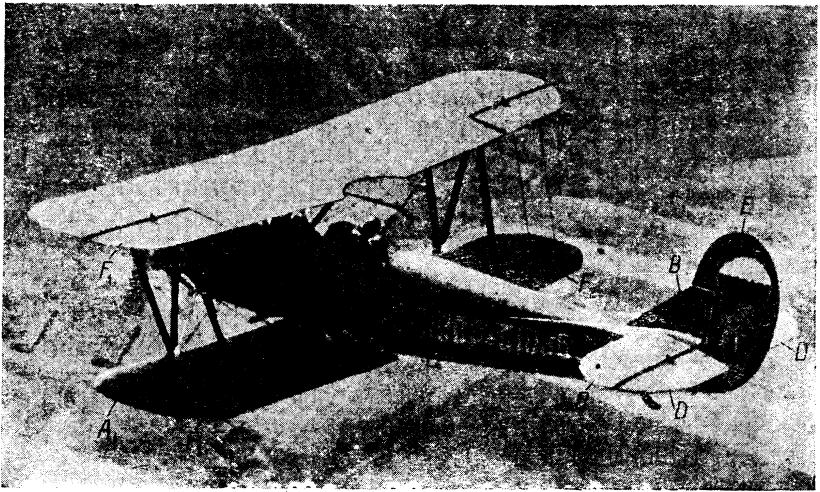
## ОГЛАВЛЕНИЕ.

	Стр.
I. Самолет и его части . . . . .	7
II. Сопротивление воздуха . . . . .	9
1. Форма тела и аэродинамическое сопротивление . . . . .	9
2. По каким траекториям движутся частицы воздуха при обтекании тела . . . . .	14
3. Воздушные потоки . . . . .	29
4. Формула для аэродинамического сопротивления . . . . .	34
5. Число Рейнольдса и его значение . . . . .	42
6. Примеры вычисления сопротивления . . . . .	47
7. Вредное сопротивление самолета . . . . .	50
8. Обтекаемые формы в сухопутном и водном транспорте . . . . .	56
III. Давление в текущей жидкости . . . . .	59
1. Манометр . . . . .	60
2. Динамическое давление . . . . .	62
3. Статическое давление . . . . .	63
4. Полное давление и уравнение Бернулли . . . . .	64
5. Вывод уравнения Бернулли . . . . .	66
6. Опыты, иллюстрирующие теорему Бернулли . . . . .	67
7. Измерение скорости течения при помощи насадок . . . . .	72
IV. Пограничный слой . . . . .	76
1. Картина течения в начальный период движения . . . . .	78
2. Пограничный слой в начальный период движения . . . . .	79
3. Примеры . . . . .	82
V. Несущая поверхность . . . . .	83
1. Воздушный змей . . . . .	85
2. Как воздух обтекает крыло . . . . .	89
3. Опыты . . . . .	91
4. Силы, действующие на самолет при горизонтальном полете . . . . .	96
5. Качество и угол планирования . . . . .	99
6. Формулы подъемной силы и лобового сопротивления . . . . .	101
7. Зависимость аэродинамических сил от угла атаки . . . . .	103
8. Поляра Лилленталя . . . . .	108
9. Разрезные крылья и крылья с закрылком . . . . .	116
10. Влияние контура крыла на его аэродинамические свойства . . . . .	119
11. Эффект Магнуса . . . . .	126
12. Теория циркуляции . . . . .	129

	Стр.
<b>VI. Органы управления . . . . .</b>	<b>134</b>
1. Рули . . . . .	135
2. Стабилизатор и киль . . . . .	140
<b>VII. Винтомоторная группа . . . . .</b>	<b>148</b>
1. Мотор . . . . .	148
2. Воздушный винт . . . . .	159
<b>VIII. Моторный полет . . . . .</b>	<b>165</b>
1. Взлет . . . . .	165
2. Горизонтальный полет . . . . .	166
3. Подъем . . . . .	169
4. Полет на большой высоте . . . . .	170
5. Вираж . . . . .	171
6. Планирование . . . . .	175
7. Посадка . . . . .	178
8. Посадочная скорость . . . . .	179
9. Особые режимы полета . . . . .	181
10. Самолет как транспортное средство . . . . .	184
<b>IX. Элементы аэродинамического расчета самолета . . . . .</b>	<b>185</b>
1. Мощность, необходимая для полета . . . . .	186
2. Располагаемая и необходимая мощности . . . . .	189
3. Минимальная скорость . . . . .	190
4. Подъем . . . . .	192
5. Планирующий спуск . . . . .	194
6. Парящий полет . . . . .	195
7. Полет на большой скорости . . . . .	195
<b>X. Парящий полет . . . . .</b>	<b>196</b>
1. Физические основы . . . . .	197
2. Возникновение восходящих движений воздуха . . . . .	199
3. Старт . . . . .	201
4. Планеры . . . . .	203
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>205</b>

## I. САМОЛЕТ И ЕГО ЧАСТИ.

Для летания применяются два принципиально различных типа аппаратов. К первому типу принадлежат воздушный шар (свободный аэростат) и дирижабль. Эти аппараты состоят в основном из оболочки, наполненной таким газом, который легче воздуха (чаще всего применяется водород). Этот легкий



Фиг. 1. Советский учебный самолет У-2 в полете; парашютист готовится к прыжку.

газ и поднимает аэростат или дирижабль, которые благодаря этому могут держаться в воздухе без движения. Таким образом аппараты этого типа летают потому, что они *легче* воздуха. Наоборот, аппараты второго типа являются *тяжелее* воздуха. Главным представителем этого типа является самолет; он подобно птице снабжен крыльями. Когда самолет благодаря тяге воздушного винта движется в воздухе с достаточно большой скоростью, на его крылья действуют аэродинамические („воздушные“) силы.

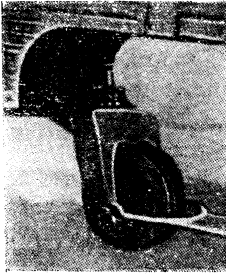
которые и поддерживают его. В дальнейшем мы будем рассматривать только самолет.

Перечислим важнейшие части самолета (фиг. 1):

1. *Несущие поверхности*, или *крылья*  $A_1$  и  $A_2$ , которыми при полете самолет опирается на воздух.

2. *Фюзеляж* (корпус) вытянутой формы, к которому прикреплены все остальные органы и в котором помещаются летчик, экипаж, пассажиры, груз, горючее и т. д.

3. *Винтомоторная группа*, т. е. *моторы* вместе с воздушными *винтами*; винтомоторная группа создает необходимую для движения самолета тягу.



Фиг. 2. Костыльное колесо.

4. *Шасси* — посадочное приспособление, которым самолет опирается на землю, когда он не летит. На колеса шасси надеты резиновые шины. Шасси дает две точки опоры. Третьей точкой опоры служит *костыльное колесо*, находящееся под хвостовой частью самолета (фиг. 2). На легких самолетах третьей точкой опоры служит костыль. Зимой, когда почва покрывается снегом, колеса шасси заменяются лыжами.

В гидросамолетах вместо колес имеются поплавки (фиг. 175 на стр. 180) или же сам корпус выполняется в виде плавающей лодки (фиг. 48 на стр. 55).

5. *Органы управления*, состоящие из стабилизатора, кия, рулей и элеронов. Стабилизатор  $C$  и киль  $B$  помещаются на хвосте самолета. Они обеспечивают устойчивость самолета при внезапных нарушениях равновесия (например вследствие резких порывов ветра), возвращая его в нормальное положение. Рули и элероны служат для управления самолетом: руль высоты  $D$  — для поворотов в продольной плоскости, руль направления  $E$  — для поворотов в горизонтальной плоскости, а элероны  $F_1$  и  $F_2$  — для наклона в поперечной вертикальной плоскости.

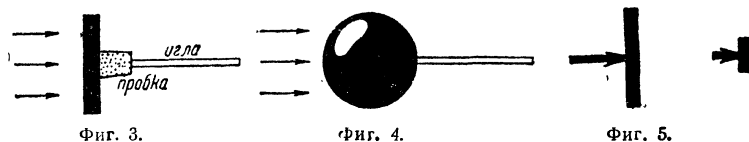
*Для полета на самолете*—аппарате тяжелее воздуха — *основное значение имеют, очевидно, несущие поверхности*. Поэтому в дальнейшем изложении несущие поверхности будут стоять в центре нашего внимания. Выяснив, на чем основано их действие, мы одновременно поймем и действие органов управления и винта. Но прежде чем заняться выяснением, почему несущие поверхности поддерживают самолет, необходимо подробно остановиться на понятии сопротивления воздуха,

## II. СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА.

Когда какое-нибудь тело (автомобиль, велосипед, самолет) движется целиком или частично в воздухе, последний стремится затормозить движение; возникает сила, которая действует на движущееся тело в сторону, прямо противоположную направлению движения. Если мы начнем дуть на нашу руку, то заметим, что на нее действует определенное давление; следовательно, и неподвижное тело, обдуваемое потоком воздуха (ветром), испытывает действие силы, которая стремится сообщить ему движение по направлению ветра. В обоих случаях указанную силу называют *аэродинамическим* (воздушным) *сопротивлением тела*, причем для краткости часто говорят просто *сопротивление тела*, а иногда — *сопротивление воздуха*. Итак, аэродинамическое сопротивление возникает всегда, когда *воздух движется относительно тела*, причем величина этого сопротивления получается, вообще говоря, совершенно одинаковой независимо от того, движется ли тело в покоем воздухе или, наоборот, неподвижное тело обдувается потоком воздуха. Для исследования и измерения аэродинамического сопротивления обычно удобнее оставлять рассматриваемое тело неподвижным, а воздух заставлять набегать на тело.

### 1. ФОРМА ТЕЛА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

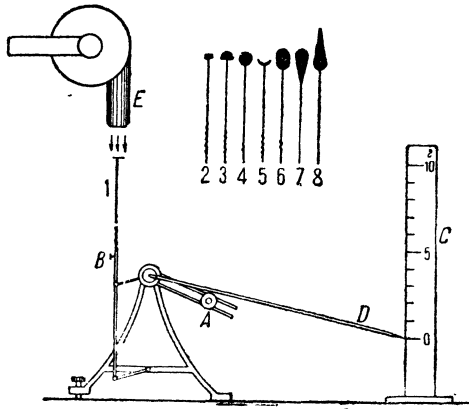
**Опыт 1.** Начнем сильно дуть на круглый картонный диск (фиг. 3), причем будем держать его так, чтобы игла, воткнутая в пробку, к которой приклеен диск, упиралась своим тупым концом в указательный палец. Давление, которое при этом



Фиг. 3—5. Аэродинамическое сопротивление зависит от лобовой площади и формы тела и от скорости воздуха.

будет ощущать наш палец, есть аэродинамическое сопротивление диска. Если мы будем дуть слабее, то это сопротивление уменьшится. Сопротивление второго, меньшего, диска будет меньше. Для сравнения сопротивления в обоих случаях изобразим их стрелками разной длины (фиг. 5).

**Опыт 2.** Возьмем теперь большой картонный диск и легкий шар из целлулоида (фиг. 4) одинакового диаметра с диском. Если мы будем дуть на диск и шар по возможности одинаково сильно, то мы заметим, что сопротивление шара меньше. Диск и шар имеют при опыте одинаковую лобовую площадь (лобовой площадью называется проекция тела на плоскость, перпендикулярную к направлению движения; в обоих случаях этой площадью будет круг одинакового диаметра). Если бы мы стали дуть на диск с его ребра (соответствующим образом укрепив иголку), то его лобовая площадь была бы меньше,



• Фиг. 6. Воздушный поток, получаемый при помощи фена, обдувает различные тела, укрепленные на весах. Стрелка  $D$  указывает на шкале  $C$  величину сопротивления.

и мы почувствовали бы меньшее давление, т. е. в этом случае сопротивление диска меньше.

Таким образом мы приходим к заключению, что *аэродинамическое сопротивление тела зависит от скорости воздуха относительно тела, от величины лобовой площади и от формы тела.*

**Опыт 3.** Для дальнейшего исследования воспользуемся устройством, изображенным на фиг. 6. Для измерения силы служат весы, употребляемые для взвешивания писем. Противовес удален и заменен передвигающимся грузом  $A$ . Стрелка  $D$ , длиною почти в  $1\text{ м}$ , сделана из вставленных одна в другую соломинок. Около конца стрелки поставлена шкала  $C$ . Тела  $1—8$ , сопротивление которых исследуется, все симметричны относительно оси и все имеют одинаковый вес <sup>1)</sup>. Большая часть из них изготовлена из дерева на токарном станке. Все, за исключением тела  $2$ , имеют одинаковую лобовую площадь: круг с диаметром  $2\text{ см}$ . Проволочный стержень, на котором укреплено исследуемое тело, вставляется свободным концом в гильзу  $B$  весов (способ закрепления показан на фиг. 86,

<sup>1)</sup> Это легко сделать, наввертывая на стержень, на котором укреплено тело, кусок проволоки необходимой длины.

на стр. 88). Длина стержней подобрана так, чтобы после закрепления наибольшие поперечные сечения всех тел находились на одинаковом расстоянии от устья фена<sup>1)</sup>  $E$  (площадь наибольшего поперечного сечения как раз равна лобовой площади). Включим электрический ток и начнем обдувать по очереди тела 1—8. Стрелка  $D$  каждый раз будет отклоняться кверху на определенное число делений шкалы, указанное в таблице 1.

Таблица 1.

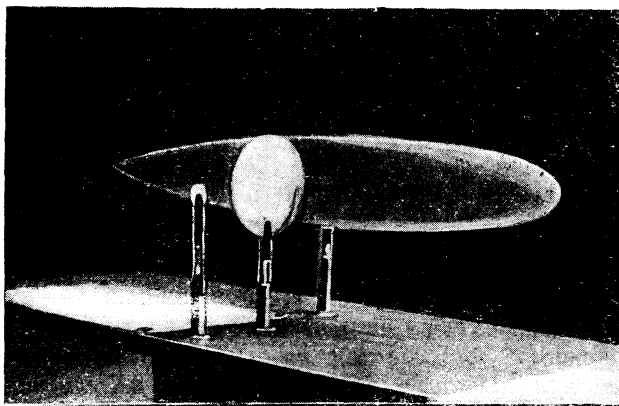
1. Большой круглый диск . . . . .	около 4,5
2. Малый круглый диск . . . . .	„ 2,5
3. Полушар, снизу закрытый . . . . .	„ 2,5
4. Шар . . . . .	„ 2
5. Полюшар, сверху открытый . . . . .	„ 7
6. Тело овальной формы . . . . .	„ 2
7. Обтекаемое тело, направленное тупым концом кверху . . . . .	меньше 1
8. Обтекаемое тело, направленное тупым концом книзу . . . . .	около 2

Мы видим, что наибольшее сопротивление имеют открытый сверху полушар 5 и диск 1, а наименьшее — обтекаемое тело 7; у этого тела сопротивление почти в пять раз меньше, чем у диска 1. *Обтекаемым телом называется такое тело, которое при данной лобовой площади имеет наименьшее сопротивление.* Обратим внимание на форму такого тела: оно довольно сильно вытянуто в длину, спереди закруглено, а сзади, постепенно суживаясь, заканчивается острием. Такую форму придают корпусам дирижаблей. Замечательно, что сопротивление обтекаемого тела меньше, когда оно обдувается с тупого конца (тело 7); если же такое тело обращено к потоку воздуха острым концом (тело 8), то сопротивление получается бóльшим.

Устье фена имеет диаметр в 4 см; наибольшее поперечное сечение всех тел 1—8 расположено от устья фена на расстоянии 5 см. Скорость воздушного потока при этих условиях равна около 12 м/сек. Это соответствует ветру, сила которого оценивается в 6 баллов (по 12-балльной шкале); такой ветер считается сильным. Однако эта скорость ( $12 \cdot 3,6 \approx 43$  км/час) значительно ниже скорости самолета.

<sup>1)</sup> Фен — небольшой электрический прибор, при помощи которого получается поток теплого или холодного воздуха. Применяется для сушки волос в парикмахерских, для прогревания в медицине и т. д. В рассматриваемом опыте фен следует укрепить на штативе.

При помощи описанного простого устройства можно легко и быстро показать большой аудитории, что аэродинамическое сопротивление тела в значительной мере зависит от формы тела и что всякому телу, обдуваемому потоком воздуха, всегда выгодно придавать форму обтекаемого тела. Однако для точных измерений наше устройство не годится. Исследования, произведенные с моделями различных тел в аэродинамической трубе (см. стр. 34), показали, что влияние формы тела на сопротивление значительно сильнее, чем это следует из наших опытов. Это поясняет модель, изображенная на фиг. 7. Мы видим на



Фиг. 7. Сопротивление обтекаемого тела и сопротивление маленького диска одинаковы, сопротивление большого диска в 25 раз больше. Маленький диск представляет собой эквивалентную пластинку обтекаемого тела.

ней прежде всего большое обтекаемое тело, длина которого равна 75 см; а диаметр наибольшего поперечного сечения 15 см; рядом помещен большой круглый диск с лобовой площадью, в точности равной лобовой площади обтекаемого тела. Как показывают точные измерения, сопротивление этого диска в 25 раз больше, чем сопротивление обтекаемого тела. Рядом с большим диском помещен другой, маленький; его диаметр в пять раз меньше диаметра лобовой площади обтекаемого тела; следовательно, его лобовая площадь в 25 раз меньше, чем площадь обтекаемого тела. Но сопротивление этого маленького диска равно сопротивлению большого обтекаемого тела.

Наглядное представление о величине сопротивления тела дает площадь эквивалентной пластинки. Так называется плоская пластинка, которая при обдувке потоком воздуха,

перпендикулярным к ее плоскости, имеет такое же сопротивление, как и рассматриваемое тело. Следовательно, эквивалентная пластинка обтекаемого тела длиной в  $\frac{3}{4}$  м и с наибольшим диаметром в 15 см равна по площади маленькому диску, изображенному на фиг. 7 слева.

Таблица 1 показывает, что сопротивление полушара, открытого сверху, особенно велико. Это может испытать каждый, если откроет зонтик и подставит его ветру нижней стороной. На большом сопротивлении такого полушара основано действие парашюта (фиг. 8), позволяющего летчику или пассажиру в случае необходимости выпрыгнуть из самолета и благополучно спуститься вниз. После прыжка парашют раскрывается и принимает форму зонтика, обращенного вогнутой стороной к земле. Большое сопротивление купола парашюта приводит к тому, что ускоренное падение быстро переходит в равномерный спуск. В самой верхней части купола устраивается небольшое отверстие (плюсное отверстие). Благодаря этому отверстию движение парашюта становится более устойчивым: раскачивание уменьшается, предупреждается возможность опрокидывания.

**Вывод.** *Сопротивление тела можно весьма значительно уменьшить, если снабдить тело „обтекателем“ соответствующей формы (выполняется в виде специальной крышки). Наименьшим сопротивлением обладает обтекаемое тело. Сопротивление зависит от величины лобовой площади, от формы тела и от относительной скорости воздуха и тела.*



Фиг. 8 Прыжок из самолета с парашютом. Парашют находится в ранце, который висит на спине (второй, запасный парашют — на груди). Летчик после прыжка держит кольцо (на фигуре — в правой руке); пружина выбрасывает вытяжной парашютик (на фигуре — белый комок наверху), а вытяжной парашютик вытягивает за собой большой. Обычно парашюты делаются из шелка. Диаметр парашюта в раскрытом виде равен 6,5—8,5 м, скорость падения 5—7 м/сек. Парашют применяется также для сбрасывания грузов, например, продовольствия на пароходы, застрявшие во льдах.

Чтобы выяснить, на чем основано уменьшение сопротивления тела, которому придана обтекаемая форма, займемся вопросом о траекториях, по которым движутся частицы воздуха при обтекании тела.

## 2. ПО КАКИМ ТРАЕКТОРИЯМ ДВИЖУТСЯ ЧАСТИЦЫ ВОЗДУХА ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛА?

Предварительно сделаем следующее замечание. Газообразные и жидкие тела отличаются от твердых тел весьма большой подвижностью своих частиц. Но в то время как газы равномерно заполняют все предоставленное им пространство, жидкости этого не делают. Если объем предоставленного жидкости пространства больше объема жидкости, то жидкость занимает лишь часть пространства и образует свободную поверхность. Однако, несмотря на такое отличие жидкостей и газов, законы течения для них совпадают (если только скорость течения газа значительно меньше скорости звука в этом газе). Поэтому в большинстве случаев выводы, полученные для течения воды, можно перенести на случай течения воздуха, и наоборот. В дальнейшем мы будем применять слово жидкость в смысле собирательного понятия как для жидкостей, имеющих свободную поверхность (капельные жидкости), так и для жидкостей, не имеющих такой поверхности (газы).

Воспользуемся этим совпадением законов движения для газов и жидкостей и проследим обтекание тела не воздухом, а водою. Это значительно удобнее, так как воду легче окрасить в какой-нибудь цвет и тем самым сделать течение видимым. Итак, мы хотим выяснить, по каким траекториям движутся частицы жидкости при обтекании тела. В дальнейшем мы будем рассматривать главным образом *установившиеся течения*. Так называются течения, при которых в каждой точке потока скорость не изменяется во времени, хотя в разных точках она может быть различной. В случае установившегося течения траектории частиц жидкости совпадают с так называемыми *линиями тока*; это — такие линии, касательные к которым в каждой их точке дают направление скорости частицы жидкости в этой точке. Поэтому в дальнейшем мы будем говорить о линиях тока. Для наблюдения этих линий применяется прибор, изображенный на фиг. 9 и 10.

Буквами  $G_1$  и  $G_2$  обозначены две стеклянные пластинки, находящиеся друг от друга на расстоянии 1 мм. Сверху к этим