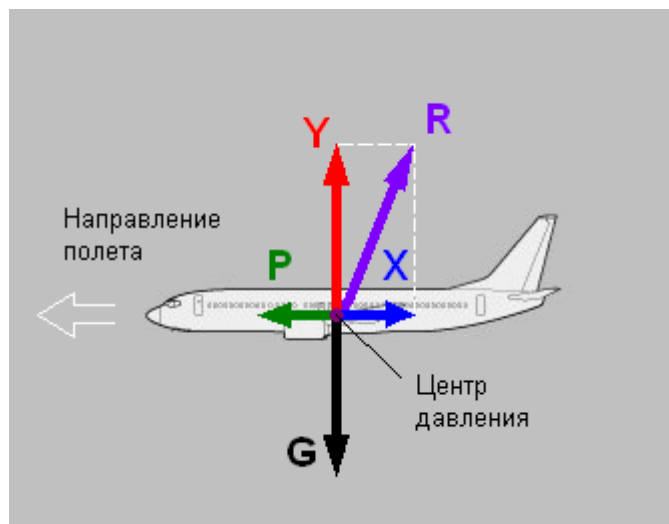


Управление образования администрации Озерского городского округа  
Челябинской области

Муниципальное бюджетное учреждение  
дополнительного образования  
**«Станция юных техников»**



## Основы Аэродинамики летающих моделей

*(Методическое пособие по теме «Аэродинамика» 3 часть)*

Составил педагог дополнительного  
образования Думенек В. Л.

г. Озерск  
2020 г.

**Методическое пособие** - предназначено для педагогов дополнительного образования авиамодельной направленности, при проведении занятий с обучающимися.

**Цель.** Расширить знания обучающихся по аэродинамике.

Аэродинамика — это наука о законах движения воздуха и силовом взаимодействии между телом и обтекающим его воздухом (в переводе с греческого «аэро» — воздух, «динамис» — сила).

Аэродинамика — теоретическая основа авиации и ракетной техники. Чтобы рассчитать самолет на прочность, исследовать его устойчивость, определить летные свойства, необходимо знать аэродинамические силы и моменты, которые возникают при полете самолета. Только с появлением аэродинамики стало возможным рациональное конструирование самолетов.

**Закон Бернулли.** Уравнение Бернулли:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$$

Где:

- $\rho$  — плотность жидкости,
- $v$  — скорость потока,
- $h$  — высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости,
- $p$  — давление в точке пространства, где расположен центр массы рассматриваемого элемента жидкости,
- $g$  — ускорение свободного падения.

Возьмём трубу, через которую протекает жидкость. Наша труба не одинакова по всей длине, а имеет различный диаметр сечения (рис. 1). Закон Бернулли выражается в том, что несмотря на различный диаметр, через любое сечение в этой трубе за одно и тоже время протекает одинаковый объём жидкости.

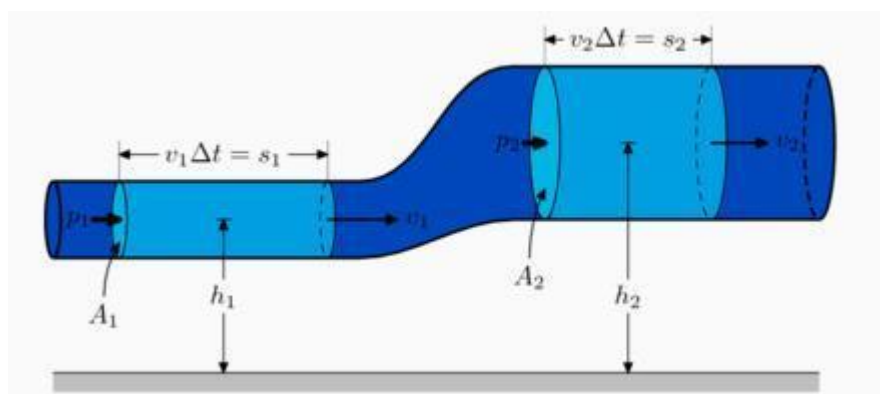
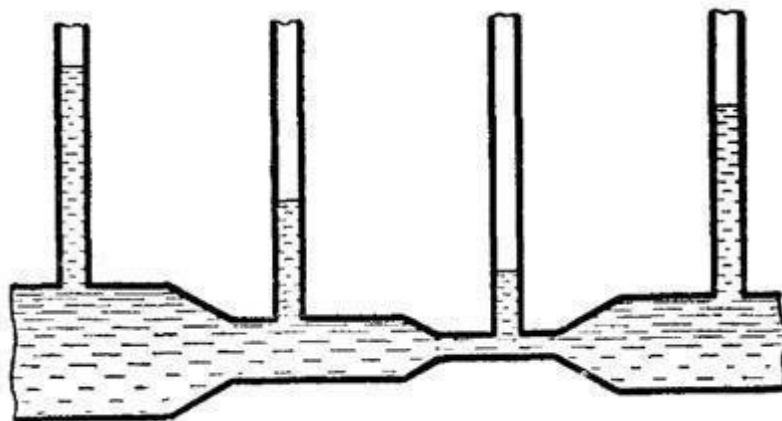


Рис. 1. Закон Бернулли.

Т.е. сколько жидкости проходит через одно сечение трубы за некоторое время, столько же ее должно пройти за такое же время через любое другое сечение. А так как объём жидкости не изменяется, а сама жидкость практически не сжимается, то изменяется что-то другое.

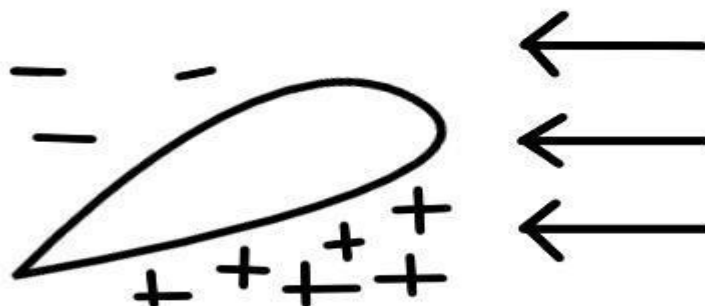
Изменяется давление жидкости и её скорость. В более узкой части трубы скорость движения жидкости выше, а давление ниже. И наоборот, в широких частях трубы скорость ниже, а давление выше. Если трубу, по которой течет жидкость, снабдить впаянными в нее открытыми трубками—манометрами, то можно будет наблюдать распределение давления вдоль трубы (рис. 2).



*Рис. 2. Труба разного сечения с трубками-манометрами.*

Все сказанное о движении жидкости по трубам относится и к движению газа. Если скорость течения газа не слишком велика и газ не сжимается настолько, чтобы изменялся его объем, и если, кроме того, пренебречь трением, то закон Бернулли верен и для газовых потоков. В узких частях труб, где газ движется быстрее, давление его меньше, чем в широких частях.

Применительно к аэродинамике закон Бернулли выражается в том, что набегающий на крыло воздушный поток имеет различную скорость и давление под крылом и над крылом, ввиду чего возникает подъёмная сила крыла (рис. 3).



*Рис. 3. Разность давлений при обтекании крыла воздушным потоком.*

Проведём простой эксперимент. Возьмём небольшой листок бумаги и разместим его прямо перед собой таким образом (рис. 4):



*Рис. 4. Эксперимент с листком бумаги №1*

А затем подуем над его поверхностью. При этом листок, вопреки ожиданиям, вместо того, чтобы прогнуться ещё больше по направлению к Земле, наоборот выпрямится (рис. 5).



*Рис. 5. Результат эксперимента №1.*

Всё дело в том, что, выдувая воздух над поверхностью листка, мы уменьшаем его давление, в то время как давление воздуха под листком остаётся прежним. Получается, что над листком образуется область пониженного давления, а под листком - повышенного. Воздушные массы пытаются «перебраться» из области высокого давления в область низкого, образуя подъемную силу. И листок выпрямляется.

Можно провести и другой опыт. Возьмём 2 листка бумаги и разместим их перед собой следующим образом (рис. 6):



*Рис. 6. Эксперимент с листком бумаги №2.*

А затем подув в область между ними, листки бумаги, вопреки нашим ожиданиям, вместо того, чтобы отодвинуться друг от друга, наоборот приблизятся (рис. 7).



*Рис. 7. Результат эксперимента №2.*

Здесь мы наблюдаем тот же самый эффект. Воздушные массы с внешних сторон листком имеют большее давление, нежели ускоренный нами воздух между листками. Это и приводит к тому, что листки бумаги притягиваются к друг другу.

Этот же принцип используют для осуществления своих полётов парaplаны, дельтапланы, самолёты, планёры, вертолётны и др. летательные аппараты. Именно это позволяет взлететь вверх многотонному пассажирскому самолёту.

Сумма статического и динамического давлений во всех сечениях является величиной постоянной. Закон Бернулли имеет большое практическое применение в аэродинамике, устанавливая связь между скоростью потока в данном сечении струи жидкости (газа) и давлением в этом же сечении: при увеличении скорости струи статическое давление в ней уменьшается. Закон Бернулли объясняет многие явления: действие пульверизатора, принцип действия карбюратора авиамодельного двигателя, возникновение подъемной силы.

**Аэродинамические спектры обтекания тел.** Картину обтекания тел воздушным потоком принято называть аэродинамическим спектром. Характер его может быть различным в зависимости от формы тела и его ориентировки в потоке, от скорости потока и физических свойств среды. Обтекание может быть плавным и со срывом потока. Рассмотрим спектры обтекания пластины, шара и удобообтекаемого тела.

Плоская пластинка является плохообтекаемой формой. Она уже при своем движении создает перед собой зону повышенного, а за собой - зону пониженного давления. Возникшая разность давлений порождает силу, перпендикулярную поверхности пластинки и направленную в сторону, обратную движению, - силу сопротивления.

При рассмотрении обтекания шара картина аналогичная, но разность давлений впереди и позади шара будет значительно меньше, а, следовательно, и сила сопротивления уменьшится.

Более совершенной формой, дающей наименьшее сопротивление, является каплевидное тело (удобообтекаемое). Сила сопротивления у него в 20-25 раз меньше, чем у плоской пластинки. Вблизи тела, при обтекании его воздушным потоком, слой воздуха оказывается заторможенным. Этот слой называют пограничным. Толщина его может быть различна и зависит от формы тела, качества обработки поверхности и других причин.

При движении тела сопротивление трения вызывается трением частиц воздуха в пограничном слое. Завихрения за задней кромкой обтекаемого тела образуют область пониженного давления. Таким образом создается сопротивление воздуха ( $X$ ), определяемое по формуле:

$$X = C_x S \rho v^2 / 2,$$

где  $C_x$  – коэффициент сопротивления;  
 $S$  – площадь миделя (наибольшего сечения тела, перпендикулярного к направлению движения);  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  – скорость движения тела, м/с.

Коэффициент  $C_x$  зависит от формы тела, качества обработки его поверхности, от расположения тела относительно набегающего потока, от параметров, характеризующих число Рейнольдса ( $Re$ ), и др.

**Число Рейнольдса.** Опыты, проводимые при различном состоянии воздуха, показывают, что спектры обтекания геометрически подобных тел оказываются подобными только тогда, когда отношение сил инерции, действующих на частицы воздуха, к силам трения одинаково. Если спектры обтекания одинаковы, то и аэродинамические коэффициенты, в том числе и  $C_x$ , тоже будут равны. Величина, характеризующая отношение сил инерции к силам трения, называется числом Рейнольдса и имеет следующее выражение:

$$Re = vl / (\mu / \rho),$$

где  $v$  – скорость, м/с;  
 $l$  – линейный размер тела, расположенный вдоль движения (для крыла – хорда), м;  
 $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па×с;  
 $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Отношение  $\mu / \rho = \nu$  (ню) есть кинематическая вязкость, или кинематический коэффициент вязкости. Он учитывает силы вязкости (через  $\mu$ ) и силы инерции (через  $\rho$ ); для воздуха при  $t=15^\circ\text{C}$  и  $p=760$  мм рт. ст.  $\nu = 1,45 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с.

Кинематическая вязкость воздуха зависит от температуры и давления. Следовательно, число  $Re$  уменьшается с увеличением температуры воздуха, так как растет знаменатель дроби  $\nu (Re = vl/\nu)$ . При подъеме на высоту плотность уменьшается более резко, чем вязкость, т. е. число  $Re$  также уменьшается.

Движение воздуха при обтекании тел может быть ламинарным и турбулентным. При ламинарном движении воздуха отдельные его слои скользят друг относительно друга, не смешиваясь; при турбулентном движении происходит перемешивание слоев вследствие образующихся завихрений.

Практически при обтекании тел воздухом пограничный слой на некотором участке сохраняется ламинарным, а затем переходит в турбулентный. Значение числа  $Re$ , при котором осуществляется переход ламинарного течения в турбулентное, называется критическим числом Рейнольдса и обозначается  $Re_{кр}$ . Число Рейнольдса - важнейшее понятие аэродинамики.

Если в формулу  $Re = vl/(\mu/\rho)$  подставить значения  $\rho$  и  $\mu$ , которые в наших расчетах будут неизменными, получим:  $1225vl/(1,82 \times 10^{-6})$ . Эта формула пригодна только для расчета при  $t = + 15^\circ C$  и  $p = 760$  мм рт. ст. Если линейный размер брать в миллиметрах, формула примет упрощенный вид:

### **Основные свойства воздуха.**

**Атмосферой** называется газовая оболочка, окружающая земной шар. Газ, составляющий эту оболочку, называется воздухом. Высота атмосферы более 2000 км. Атмосфера разделяется на тропосферу, стратосферу и ионосферу.

**Тропосферой** называется самый нижний слой атмосферы (7-8 км над полюсами и 16-17 км над экватором). В нём содержится около 80% массы всей атмосферы, хотя по объёму тропосфера около 1% атмосферы. Состоит тропосфера из: 78% азота, 21% кислорода и около 1% других газов. В тропосфере сосредоточен почти весь водяной пар (именно он образует облака).

**Температура воздуха.** Температура задаёт скорость хаотического движения молекул. Чем больше температура, тем больше скорость их движения. В тропосфере с повышением высоты уменьшается температура воздуха на  $6,5^\circ$  на каждые 1000м. Тёплые слои воздуха поднимаются вверх, холодные слои опускаются вниз. Это, в совокупности со свойствами водяного пара, приводит к образованию облаков, выпадению осадков и образованию ветров.

**Градиент температур** – разность температур в разных точках пространства или в разное время. К примеру, если ночью термометр показывает  $15^\circ C$  а днём  $30^\circ C$ , то градиент температур за день составляет  $15^\circ$ . Чем больший температурный градиент, тем большая термичность

воздуха, а значит и больше и сильнее восходящие воздушные потоки. В зимнее время земля прогревается слабее и температурный градиент очень мал. Поэтому зимой более спокойная атмосфера, более пригодная для обучения дельтапланеризму.

**Давление воздуха.** Давление – это сила, действующая на единицу площади перпендикулярно к ней. Всякое тело находящееся в неподвижном воздухе, испытывает со стороны последнего давление, одинаковое со всех сторон (**закон Паскаля**). Атмосферное давление объясняется тем, что воздух, подобно другим веществам, имеет вес и притягивается Землёй силой притяжения. Атмосферное давление уменьшается вместе с высотой. Чем больше давление, тем плотнее воздух (т.е. больше **плотность воздуха**). На высотах больше 5км из-за низкого давления затруднено дыхание. Многие альпинисты покоряющие вершины 7-8км гор используют кислородные баллоны со сжатым газом.

**Влажность воздуха.** Влажность воздуха — это количество паров воды в воздухе. Чем больше паров воды, тем выше влажность. Влажность бывает абсолютной (% воды относительно остальных газов) и относительной (% воды от максимально возможной в данных условиях). Чаще всего оперируют именно относительной влажностью. Более подробнее этот вопрос будет рассмотрен в разделе метеорология.

**Инертность воздуха** — свойство воздуха, характеризующее его способность сопротивляться изменениям. Чем плотнее воздух, тем сложнее его «растормозить», т. е. тем больше его инертность.

**Сжимаемость воздуха.** Сжимаемость — это свойство газов изменять свою плотность при изменении давления. Наибольшую значимость имеет при полётах скоростях близких или больших скорости звука.

**Методические рекомендации.** С некоторыми понятиями теории полета обучающиеся познакомились во 2 год занятий. В дальнейшем при прохождении различных тем они также будут изучать основные теоретические положения. На изучение данной темы отводится 2-3 ч - одно занятие. Иногда целесообразно изучать данную тему в течение 2 занятий по 1,5 ч, используя оставшееся время на практическую работу.

### **Список литературы:**

**Аэродинамика 1.** Н.Ф. Краснов. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. 384 стр. Москва Высшая школа 1976 г.

**Аэродинамика.** Д.М. Прицкер, Г.И. Сахаров. 310 стр. Машиностроение Москва 1968 г.

**Аэродинамика.** А.М. Мхитарян, Изд. 2-е, переработанное и дополненное. 448 стр. Москва. Машиностроение 1976 г.

**Интернет ресурсы.**