

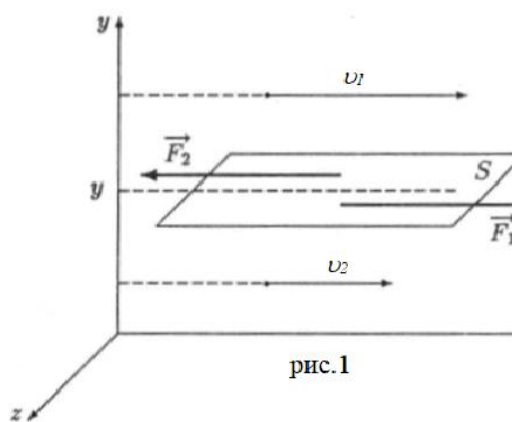
1. Движение в жидкостях и газах.
2. Подъемная сила крыла.
3. Эффект Магнуса.

1. Движение в жидкостях и газах.

Реальные жидкости и газы в отличие от идеальной жидкости и газа обладают **вязкостью (внутренним трением)**.

Вязкость (внутреннее трение) - это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой. При перемещении одних слоев реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны же слоя, движущегося медленнее, на слой, движущийся быстрее, действует тормозящая сила.

Сила внутреннего трения F тем больше, чем больше рассматриваемая площадь поверхности слоя S (рис.1), и зависит от того, насколько быстро меняется скорость течения жидкости при переходе от слоя к слою. На рисунке представлены два слоя, отстоящие друг от друга на расстоянии Δy и движущиеся со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 . При этом $\vec{v}_1 - \vec{v}_2 = \Delta \vec{v}$. Направление, в котором отсчитывается расстояние между слоями, перпендикулярно скорости течения слоев.



Величина $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta y}$ показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою в направлении y , перпендикулярном направлению движения слоев, и называется **градиентом скорости**. Таким образом, модуль силы внутреннего трения

$$F = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta y} \right| S \quad (1)$$

где коэффициент пропорциональности η , зависящий от природы жидкости, называется **динамической вязкостью** (или просто вязкостью). Единица вязкости - паскаль-секунда (Па·с): 1 Па·с равен динамической вязкости среды, в которой при ламинарном течении и градиенте скорости с модулем, равным 1 м/с на 1 м, возникает сила внутреннего трения 1 Н на 1 м² поверхности касания слоев ($1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$). Чем больше вязкость, тем сильнее жидкость отличается от идеальной, тем большие силы внутреннего трения в ней возникают.

Вязкость зависит от температуры, причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен (для жидкостей η с увеличением температуры уменьшается, у газов, наоборот, увеличивается), что указывает на различие в них механизмов внутреннего трения.

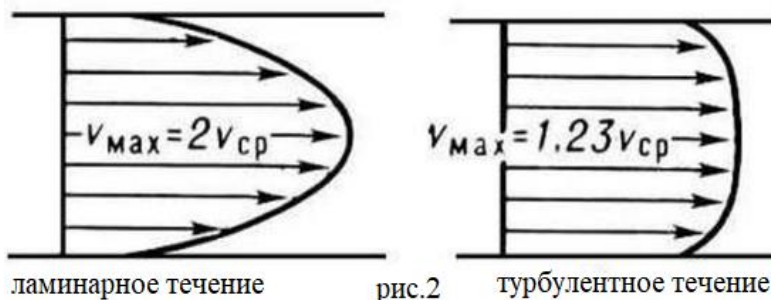
Физик П.Л.Капица (1894-1984; Нобелевская премия 1978 г.) открыл, что при температуре $2,17K$ жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние, в котором его вязкость равна нулю.

Существуют два режима течения жидкостей. Течение называется **ламинарным (слоистым)**, если вдоль потока каждый выделенный тонкий слой скользит относительно соседних, не перемешиваясь с ними, и **турбулентным (вихревым)**, если вдоль потока происходит интенсивное вихреобразование и перемешивание жидкости (газа).

Ламинарное течение жидкости наблюдается *при небольших скоростях ее движения*. Внешний слой жидкости, примыкающий к поверхности трубы, в которой она течет, из-за сил молекулярного сцепления прилипает к ней и остается неподвижным. Скорости последующих слоев тем больше, чем больше их расстояние до поверхности трубы, и наибольшей скоростью обладает слой, движущийся вдоль оси трубы.

При турбулентном течении частицы жидкости приобретают составляющие скоростей, перпендикулярные течению, поэтому они могут переходить из одного слоя в другой. Скорость частиц жидкости быстро возрастает по мере удаления от поверхности трубы, затем изменяется довольно незначительно. Так как частицы жидкости переходят из одного слоя в другой, то их скорости в различных слоях мало отличаются. *Из-за большого градиента скоростей у поверхности трубы обычно происходит образование вихрей.*

Профиль усредненной скорости при турбулентном течении в трубах (рис.2) отличается от параболического



профиля при ламинарном течении более быстрым возрастанием скорости у стенок трубы и меньшей кривизной в центральной части течения. Характер течения зависит от безразмерной величины, называемой числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta} = \frac{\langle v \rangle d}{\nu} \quad (2)$$

где ρ - плотность жидкости; $\langle v \rangle$ - средняя по сечению трубы скорость жидкости; d - характерный линейный размер, например диаметр трубы; ν - кинематическая вязкость.

При малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 1000$) наблюдается ламинарное течение, переход от ламинарного течения к турбулентному происходит в области ($1000 \leq Re \leq 2300$), а при $Re = 2300$ (для гладких труб) течение турбулентное. Если число Рейнольдса одинаково, то режим течения различных жидкостей (газов) в трубах разных сечений одинаков.

Одной из важнейших задач аэро- и гидродинамики является исследование движения твердых тел в газе и жидкости, в частности изучение тех сил, с которыми среда действует на движущееся тело. Эта проблема приобрела особенно большое значение в связи с бурным развитием авиации и увеличением скорости движения морских судов.

На тело, движущееся в жидкости или газе, действуют две силы (их равнодействующую обозначим \mathbf{R}), одна из которых (\mathbf{R}_x) направлена в сторону, противоположную движению тела (в сторону потока), - **лобовое сопротивление**, а вторая (\mathbf{R}_y) перпендикулярна этому направлению - **подъемная сила** (рис.3). Если тело

симметрично и его ось симметрии совпадает с направлением скорости, то на него действует только лобовое сопротивление, подъемная же сила в этом случае равна нулю. Можно доказать, что в идеальной жидкости равномерное движение происходит без лобового сопротивления. Если рассмотреть движение цилиндра в такой жидкости (рис. 4), то картина линий тока симметрична как относительно прямой, проходящей через точки А и В, так и относительно прямой, проходящей через точки С и D, т. е. результирующая сила давления на поверхность цилиндра будет равна нулю.

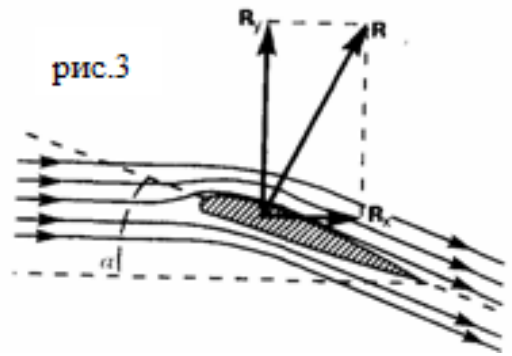


рис.3

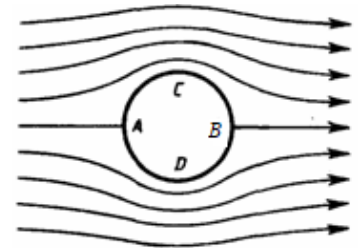


рис.4

Иначе обстоит дело при движении тел в вязкой жидкости (особенно при увеличении скорости обтекания). Вследствие вязкости среды в области, прилегающей к поверхности тела, образуется пограничный слой частиц, движущихся с меньшими скоростями. В результате тормозящего действия этого слоя возникает вращение частиц и движение жидкости в пограничном слое становится вихревым. Если тело не имеет обтекаемой формы (нет плавно утончающейся хвостовой части), то пограничный слой жидкости отрывается от поверхности тела. За телом возникает течение жидкости (газа), направленное противоположно набегающему потоку. Оторвавшийся пограничный слой, следуя за этим течением, образует вихри, вращающиеся в противоположные стороны (рис.5). Таким образом, при малых значениях числа Рейнольдса доминируют силы внутреннего трения: вязкость велика и мы имеем дело с ламинарным потоком. При больших значениях числа Рейнольдса, наоборот, доминируют силы динамического лобового сопротивления, и поток становится турбулентным.

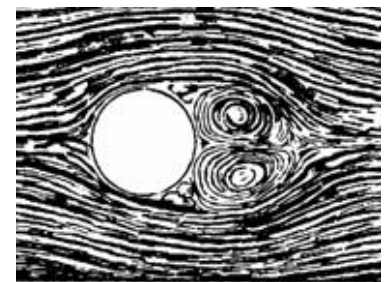


рис.5

Лобовое сопротивление зависит от формы тела и его положения относительно потока, что учитывается безразмерным коэффициентом сопротивления C_x , определяемым экспериментально:

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S \quad (3)$$

где ρ - плотность среды; v - скорость движения тела; S - наибольшее поперечное сечение тела. Составляющую R_x можно значительно уменьшить, подобрав тело такой формы, которая не способствует образованию завихрения.

Подъемная сила может быть определена формулой, аналогичной (3):

$$R_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S \quad (4)$$

где C_y - безразмерный коэффициент подъемной силы. Для крыла самолета требуется большая подъемная сила при малом лобовом сопротивлении [это условие выполняется при

малых углах атаки α (угол к потоку, рис.3). Крыло тем лучше удовлетворяет этому условию, чем больше величина $K = \frac{C_y}{C_x}$, называемая качеством крыла.

2. Подъемная сила крыла.

Современный самолет – это сложнейшее сооружение, состоящее из сотен тысяч деталей, электронно-вычислительных устройств. Полетная масса самолетов достигает нескольких сотен тонн. Как же возникает подъемная сила, удерживающая самолет в воздухе?

Со стороны атмосферы на крылья и корпус самолета действуют огромные силы давления. Если в качестве примера взять пассажирский самолет Ил-62, то площадь нижней поверхности крыла самолета равна 280 м^2 . Атмосферное давление равно 10^5 Па , поэтому на крылья воздух действует с силой $2.8 \cdot 10^7 \text{ Н}$. Эта сила в 18 раз превышает вес самолета с пассажирами ($1.54 \cdot 10^6 \text{ Н}$).

Для возникновения подъемной силы давление воздуха на нижнюю поверхность крыла должно быть больше, чем на верхнюю поверхность. Такое перераспределение давления происходит при обтекании крыла воздушным потоком. Избыточное давление, необходимое для того, чтобы возникла подъемная сила, равная силе тяжести, действующей на самолет Ил-62, равно:

$$\frac{1.54 \cdot 10^6 \text{ Н}}{280 \text{ м}^2} = 5.5 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Это избыточное давление составляет примерно 0.05 от нормального атмосферного давления. Отсюда видно, что для взлета самолета достаточно создать незначительное давление. Как возникает это давление?

Когда воздушный поток начинает обтекать крыло, то из-за действия сил трения у задней кромки крыла образуется вихрь, в котором воздух вращается против часовой стрелки, если крыло движется влево (рис.6). Но по законам механики при возникновении вращения против часовой стрелки должно возникнуть вращение по часовой стрелке (это следует из закона сохранения момента импульса).

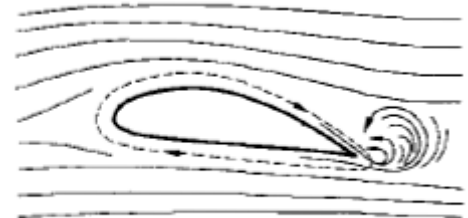


рис.6

Такое вращение воздуха и возникает вокруг крыла (рис.6). На обтекающее крыло поток накладывает циркуляция воздуха вокруг крыла. В результате скорость воздушного потока над крылом оказывается больше, чем под крылом, так как над крылом скорость циркуляции имеет такое же направление, как и скорость набегающего на крыло потока, а под крылом эти скорости противоположны по направлению. Но согласно закону Бернулли давление должно быть больше там, где скорость меньше. Следовательно, под крылом давление больше, чем над ним. Из-за этого и возникает подъемная сила.

Теория возникновения подъемной силы крыла при обтекании его потоком газа была впервые разработана русским ученым Н. Е. Жуковским.

Можно приближенно оценить, от чего зависит перепад давлений вокруг крыла. Если самолет движется со скоростью v относительно воздуха, то в системе координат, связанной с самолетом, крыло неподвижно, а на него набегают воздушный поток с такой же по модулю скоростью. Обозначим модуль скорости циркулирующего потока через u . Тогда модуль

скорости воздуха над крылом будет равен $v_1 = v + u$, а под крылом $v_2 = v - u$. Запишем закон Бернулли:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2$$

откуда
$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{\rho v_1^2}{2} - \frac{\rho v_2^2}{2} = 2\rho v u \quad (5)$$

В нижних слоях атмосферы, где плотность воздуха больше, достаточная подъемная сила может возникнуть и при малых скоростях движения самолета \vec{v} . На больших высотах плотность воздуха уменьшается, но там могут быть развиты значительные скорости, и за счет этого будет возникать необходимая подъемная сила.

Скорость самолета Ил-62 равна 900 км/ч, а на тех высотах, где он летает, плотность воздуха порядка 1 кг/м³. Поэтому при скорости циркуляции порядка 10 м/с возникает необходимый для полета перепад давлений:

$$\Delta p = 2\rho v u = \left(2 \cdot 1 \cdot \frac{900 \cdot 10^3}{3600} \cdot 10 \right) \text{Па} = 5 \cdot 10^3 \text{Па}$$

Таким образом, закон Бернулли дает возможность понять, почему возникает подъемная сила у крыла самолета. Скорость обтекания воздухом верхней кромки крыла больше, чем нижней. Поэтому давление воздуха на нижнюю кромку крыла больше, чем на верхнюю кромку.

3. Эффект Магнуса.

Возникновение подъемной силы, действующей на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости или газа, называют эффектом Магнуса. Эффект Магнуса был впервые обнаружен при изучении полета вращающихся артиллерийских снарядов: подъемная сила, действующая со стороны встречного потока воздуха, отклоняет снаряд от линии прицела. Этот эффект описан немецким физиком Генрихом Густавом Магнусом в 1853 году.

Эффект Магнуса можно наблюдать на опыте со скатывающимся по наклонной плоскости легким цилиндром. После скатывания по наклонной плоскости центр масс цилиндра движется не по параболе, как двигалась бы материальная точка, а по кривой, уходящей под наклонную плоскость.

Вращающийся объект создаёт в среде вокруг себя вихревое движение. С одной стороны объекта направление вихря совпадает с направлением обтекающего потока и, соответственно, скорость движения среды с этой стороны увеличивается. С другой стороны объекта направление вихря противоположно направлению движения потока, и скорость движения среды уменьшается. Ввиду этой разности скоростей возникает разность давлений, порождающая поперечную силу от той стороны вращающегося тела, на которой направление вращения и направление потока противоположны, к той стороне, на которой эти направления совпадают. Эта поперечная сила заставляет вращающийся объект отклоняться от траекторий свободного падения.

В футболе этот эффект проявляется в том, что вокруг закрученного в броске или ударе мяча образуются вихревые потоки воздуха. Из-за этого по одну сторону мяча направление движения воздуха соответствует направлению встречного потока, а по обратную сторону мяча направление вихря противоположно встречному потоку. В результате возникают поперечно действующие силы, изменяющие траекторию.

Когда футболист бьет по мячу справа от центра, мяч вращается против часовой стрелки и сила Магнуса действует налево, заставляя мяч двигаться вдоль искривленной налево линии. При ударе мяча слева от центра мяч вращается по часовой стрелке, и сила Магнуса действует направо, заставляя мяч изгибаться вправо. Это может привести к отклонению шара на несколько футов от исходной траектории к моменту его достижения сетки. Это, без сомнения, полезная стратегия при попытке забить гол, так как это делает путь мяча менее предсказуемым для вратаря, при его попытке поймать мяч.

Для потока жидкости или газа, обтекающего тело, неважно, чем вызвано завихрение - вращением тела или его несимметричностью. Такой поток будет создавать силу, направленную перпендикулярно его течению. Если вращается само тело, эта сила называется сила Магнуса, а если завихрённость вызвана его формой, то сила называется подъёмной.

Ниже приведены примеры проявления эффекта Магнуса.

1. Возьмём листок бумаги за короткую сторону и подуем вдоль листа. Лист поднимается вверх. Объяснение опыта: Скорость над листом больше, чем под листом, а давление меньше. Эта разность давлений и поднимает лист вверх

2. Возьмём два листа бумаги и расположим их перед своим лицом вертикально, параллельно друг другу на расстоянии 5-6 см друг от друга. Если резко дунуть в промежуток между листьями(ближе к нижним краям). Листы будут сближаться. Затем вместо листов возьмём два воздушных шара или два яблока. Результат будет тот же.

Объяснение опыта: скорость воздуха между листьями больше, чем за листьями, а давление меньше. Эта разность давлений и сближает листы.

3. Зажжём две свечи. Дунем между ними через стеклянную трубочку. Кажется, что пламя притягивается друг к другу.

Объяснение опыта: скорость воздуха между пламенем больше, чем за пламенем, а давление меньше. Эта разность давлений и сближает пламя.

4. Осенью 1912 г океанский пароход "Олимпик" плыл в открытом море, а почти параллельно ему, на расстоянии сотни метров, проходил с большой скоростью другой корабль, гораздо меньший, броненосный крейсер "Гаук". Когда оба судна приблизились на определенное расстояние, произошло нечто неожиданное: меньшее судно стремительно свернуло с пути, словно повинувшись неведомой силе, повернулось носом к большому кораблю и, не слушаясь руля, двинулось почти прямо на него. "Гаук" врезался носом в бок "Олимпики". Удар был так силен, что "Гаук" проделал в борту "Олимпики" большую пробоину. Случай столкновения двух кораблей рассматривался в морском суде. Капитана корабля "Олимпик" обвинили в том, что он не дал команду пропустить броненосец. А на самом деле причина этой катастрофы объяснялась законом Бернулли.

5. В судостроении, ярким примером применения эффекта Магнуса является корабль немецкого инженера А.Флеттнера, известного изобретателя «флеттнеровского корабельного руля». Флеттнер на своем корабле вместо парусов использовал вращающиеся цилиндры. На парусном судне всякое изменение курса, направления или силы ветра связано с изменением положения парусов. На больших кораблях это особенно трудно и утомительно. Во время бурь и сильного ветра паруса приходилось снимать, в то время как вращающиеся цилиндры нужно только замедлить, либо остановить вращение. Это являлось важным преимуществом «ротора». У кораблей-роторов для изменения числа оборотов до нужной величины требовалось рулевому только поворачивать ручку реостата электродвигателя. Только при изменении ветра на противоположное необходимо изменить

направление вращения ротора. Испытания такого корабля проводились в 1924 году. 12 ноября корабль «Букау» выехал из порта города Киль (Германия). Роторы действовали практически бесшумно, а способность корабля к маневрированию оказалась превосходной. Корабль показал себя с лучшей стороны и при испытании корабля во время бури. К сожалению, он зависел от капризов погоды, поэтому не смог конкурировать с тепловым двигателем.

https://www.youtube.com/watch?v=x35Xywi_BKI

https://online.mephi.ru/courses/physics/osnovi_mehaniki/data/lecture/9/p4.html