

Движение тел в жидкостях и газах. Лобовое сопротивление и подъемная сила. Формула Стокса.

Преподаватель: Нургалиева
А.К.

Одной из важнейших задач гидроаэродинамики является исследование движения твердых тел в газе и жидкости, в частности, изучение тех сил, с которыми среда действует на движущееся тело.

На тело, движущееся в жидкости или газе, в общем случае действуют две силы, одна из которых направлена в сторону, противоположную движению тела — *лобовое сопротивление*, а вторая перпендикулярно к этому направлению — *подъемная сила*. Однако, если форма тела симметрична и его ось симметрии совпадает с направлением скорости, тогда на него не действует подъемная сила, а действует только лобовое сопротивление. Если считать, что тело движется в идеальной жидкости без внутреннего сопротивления, тогда не действует и лобовое сопротивление. В этом случае, не обладая вязкостью, идеальная жидкость должна свободно скользить по поверхности тела, полностью обтекая его.

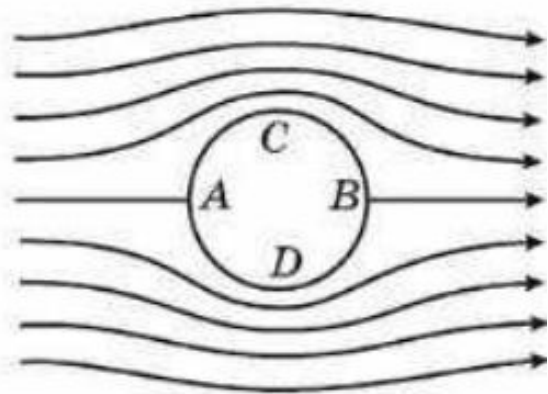


Рис 1

На рисунке 1 показаны линии тока при обтекании очень длинного цилиндра идеальной жидкостью. При этом, конечно, поток деформируется, однако вследствие полного обтекания картина линий тока оказывается совершенно симметричной как относительно прямой, проходящей через точки *A* и *B*, так и

относительно прямой, проходящей через точки *C* и *D*. Поэтому давление вблизи точек *A* и *B* будет одинаково (и больше, чем в недеформированном потоке, так как скорость вблизи этих точек меньше); точно так же давление вблизи точек *C* и *D* тоже будет одинаково (и меньше, чем в недеформированном потоке, так как скорость вблизи этих точек больше). Следовательно, результирующая сила давления на поверхность цилиндра очевидно будет равно нулю. Такой же результат получается и для тел другой симметричной формы.

Иначе протекают явления при движении тела в жидкости, обладающей вязкостью. В этом случае очень тонкий слой жидкости прилипает к поверхности тела и движется с ним как одно целое, увлекая за собой из-за трения последующие слои. По мере удаления от поверхности тела скорость слоев становится все меньше и, наконец, на некотором расстоянии от поверхности жидкость оказывается практически невозмущенной движением тела. Таким образом, тело оказывается окруженным слоем жидкости, в котором имеется градиент скорости. Этот слой называется *пограничным*. В нем действуют силы трения, которые и приводят к возникновению лобового сопротивления. Но дело не исчерпывается только этим. Наличие пограничного слоя в корне изменяет характер обтекания тела жидкостью. Полное обтекание становится невозможным.

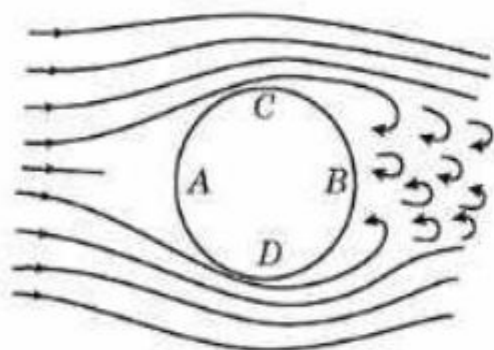


Рис. 2

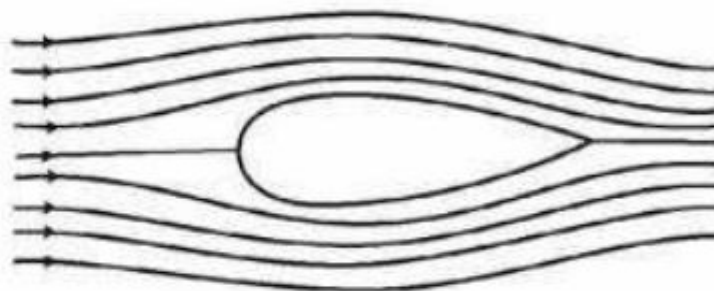


Рис. 3

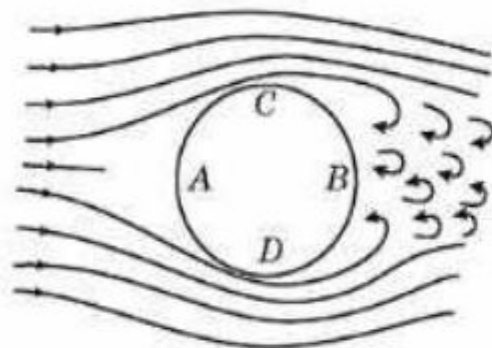


Рис. 2

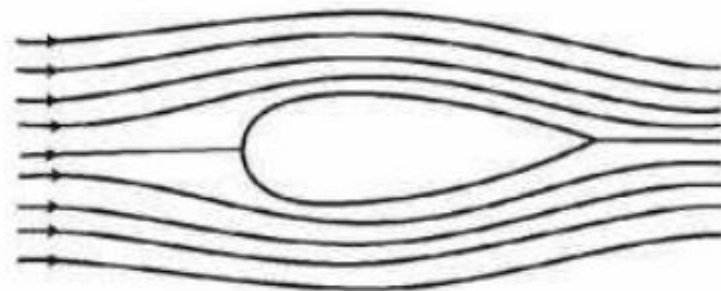


Рис. 3

Действие сил трения в поверхностном слое приводит к тому, что поток отрывается от поверхности тела, в результате чего позади тела возникают вихри (рис. 2). Давление в образующейся за телом вихревой области оказывается пониженным, поэтому результирующая сила давления будет отлична от нуля, в свою очередь обуславливая лобовое сопротивление.

Таким образом, лобовое сопротивление складывается из сопротивления трения и сопротивления давления. При данных поперечных размерах тела сопротивление давления сильно зависит от формы тела. Наименьшим сопротивлением давления обладают тела хорошо обтекаемой каплевидной формы (рис. 3).

При малых числах Рейнольдса, т. е. при небольших скоростях движения и небольших размерах тела, сопротивление среды обусловлено практически только силами трения. Английский ученый Дж. Стокс установил, что сила сопротивления в этом случае пропорциональна коэффициенту вязкости η , скорости движения v тела относительно жидкости и характерному размеру тела r . Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара, если в качестве характерного размера взять радиус, коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна

$$F = 6\pi\eta rv.$$

Разность статических давлений в различных точках поверхности твердого тела, движущегося в жидкости или газе, может вызвать не только силу сопротивления, но и так называемую *подъемную силу*. Для возникновения подъемной силы вязкость жидкости не имеет существенного значения. На рисунке 4 показаны линии тока при обтекании идеальной жидкостью полуцилиндра.

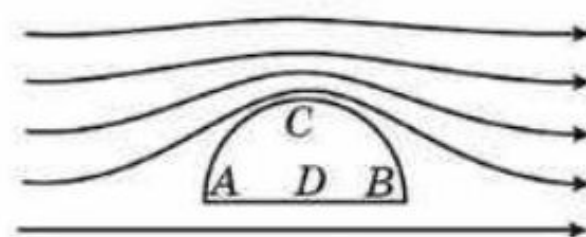


Рис. 4

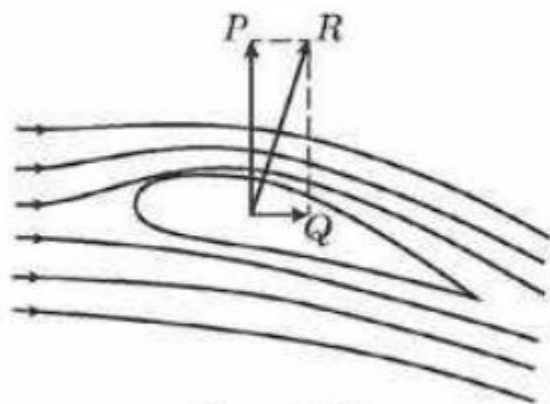


Рис. 5

Вследствие полного обтекания линии тока будут симметричны относительно прямой CD . Однако относительно прямой AB картина будет несимметричной. Линии тока сгущаются вблизи точки C , поэтому давление здесь будет меньше, чем вблизи точки D , и возникает подъемная сила P . Аналогичным образом возникает подъемная сила и в вязкой жидкости.

В рассмотренном выше примере обтекания цилиндра вязкой жидкостью выяснили, каким образом возникает сила лобового сопротивления. При этом в нем не возникает подъемная сила. Однако, если при обтекании этот цилиндр еще и вращается, тогда ситуация меняется. При вращении цилиндр увлекает прилегающие к его поверхности слои вязкой жидкости во вращение и вокруг цилиндра возникает вихревое движение.

С одной стороны цилиндра направление вихря совпадает с направлением обтекающего потока и, соответственно, скорость движения среды с этой стороны увеличивается. С другой стороны цилиндра направление вихря противоположно направлению движения потока, и скорость движения среды уменьшается. Ввиду этой разности скоростей возникает разность давлений, порождающих поперечную силу от той стороны вращающегося тела, на которой направление вращения и направление потока противоположны, к той стороне, на которой эти направления совпадают. Этот эффект был впервые описан немецким физиком Генрихом Магнусом и получил название *эффектом Магнуса*.

Возникновение подъемной силы широко используется в повседневной практике. Силой, поддерживающей самолет в воздухе, служит подъемная сила, действующая на его крылья. Лобовое сопротивление играет при полете самолета вредную роль. Поэтому крыльям самолета и его фюзеляжу придают хорошо обтекаемую форму. Профиль крыла должен вместе с тем обеспечивать достаточную по величине подъемную силу. Оптимальным для крыла является показанный на рисунке 25.5 профиль, найденный русским ученым Н. Е. Жуковским. На этом рисунке Q — это лобовое сопротивление, а P — подъемная сила.

Домашнее задание

Краткий конспект

Ответить на вопросы (устно)

Проанализировать предложенные ситуации (устно)

Решить задачи №1, №2

1. От чего зависит величина лобового сопротивления?
2. Что такое *пограничный слой*?
3. Как возникает подъемная сила?
4. В чем заключается эффект Магнуса?
5. Как определяется сила Стокса?

Анализируйте

1. Проанализируйте, почему футбольный мяч можно "закрутить" в ворота с углового удара?
2. Проанализируйте, почему, если близко стоишь около идущего поезда, возникает эффект "притягивания" к колесам?

Решайте

1. Определите скорость ветра, если он оказывает давление 200 Па на стену. Ветер дует перпендикулярно стене. Плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$.
(Ответ: 8,8 м/с)
2. В широкой части горизонтальной трубы нефть течет со скоростью 2 м/с. Определите скорость течения нефти в узкой части трубы, если разность давлений в широкой и узкой частях трубы составляет 50 мм. рт. ст.
(Ответ: 4,33 м/с)