

ЧАРУЮЩИЕ ТАЙНЫ ЖИДКОСТИ

*Существует поразительная возможность
овладеть предметом математически,
не понимая существа дела.*

А. Эйнштейн

Эксперимент остается навсегда.

П. Л. Капица

Тысячи лет люди наблюдают вечно изменчивое течение воды и пытаются разгадать ее тайну. Первоклассные физики и математики ломали и продолжают ломать головы, стараясь понять природу и прихотливое поведение потока воды. Но вступив в XXI век, мы с сожалением должны констатировать, что с конца XIX столетия - времени наивысшего расцвета науки о движении сплошных сред (гидродинамики в случае жидкости и аэродинамики в случае газа) - мы очень мало продвинулись в понимании природы этого вечно меняющегося течения. Все основные законы течения жидкости (для краткости везде будет говориться о жидкости, хотя, за некоторым исключением, те же закономерности присущи и газу) были открыты до первой половины XIX столетия. Перечислим их.

Постоянство потока массы жидкости

Его еще называют законом неразрывности, законом непрерывности, уравнением сплошности жидкости или законом сохранения вещества в гидродинамике. По существу, этот закон был открыт Б. Кастелли в 1628 году. Он установил, что скорость течения жидкости в трубах обратно пропорциональна площади их поперечного сечения. Другими словами, чем уже сечение канала, тем с большей скоростью движется в нем жидкость.

Вязкость жидкости

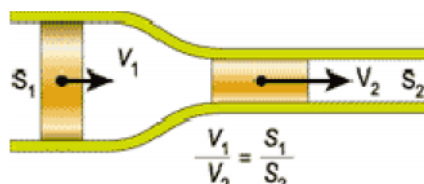
И. Ньютон (конец XVII века) экспериментально установил, что любой жидкости свойственна вязкость, то есть внутреннее трение. Вязкость приводит к возникновению сил трения между движущимися с различными скоростями слоями жидкости, а также между жидкостью и омываемым ею телом. Им же было установлено, что сила трения пропорциональна коэффициенту вязкости жидкости и градиенту (перепаду) скорости потока в направлении, перпендикулярном его движению. Жидкости, подчиняющиеся этому закону, называют ньютоновскими в отличие от неньютоновских жидкостей, у которых зависимость между силой вязкого трения и скоростью жидкости имеет более сложный характер.

В силу вязкого трения скорость жидкости на поверхности омываемого ею тела всегда равна нулю. Это совсем не очевидно, но тем не менее подтверждается во множестве экспериментов.

Опыт. Убедимся, что скорость газа на поверхности обдуваемого им тела равна нулю.

Возьмем вентилятор и припудрим его лопасти пылью. Включим вентилятор в сеть и через несколько минут выключим. Пыль на лопастях как была, так и осталась, хотя вентилятор вращался с довольно большой скоростью и она должна была бы слететь.

Омывая лопасти вентилятора с большой скоростью, поток воздуха на их поверхности имеет нулевую скорость, то есть неподвижен. Поэтому пыль на них и остается. По этой же причине с гладкой поверхности стола легко можно сдуть крошки, а пыль приходится вытирать.



Изменение давления жидкости в зависимости от скорости ее движения.

Д. Бернулли в своей книге «Гидродинамика» (1738) получил для идеальной жидкости, не обладающей вязкостью, математическую формулировку закона сохранения энергии в жидкости, который носит теперь название уравнения Бернулли. Оно связывает давление в потоке жидкости с ее скоростью и утверждает, что давление жидкости при ее движении меньше там, где сечение потока S меньше, а скорость жидкости соответственно больше. Вдоль трубки тока, которую можно мысленно выделить в спокойном безвихревом потоке, сумма статического давления, динамического $\rho V^2/2$, вызванного движением жидкости плотностью ρ , и давления ρgh столба жидкости высотой h остается постоянной:

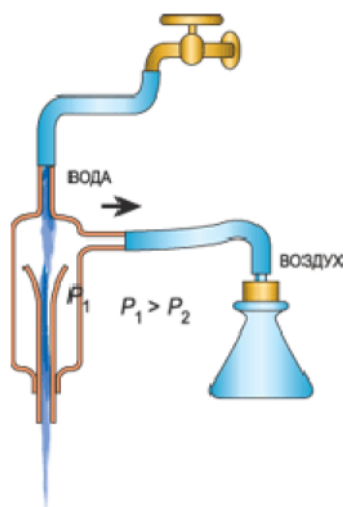
$$p + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = \text{Const.}$$

Это уравнение играет фундаментальную роль в гидродинамике, несмотря на то, что оно, строго говоря, справедливо только для идеальной, то есть не имеющей вязкости, жидкости.



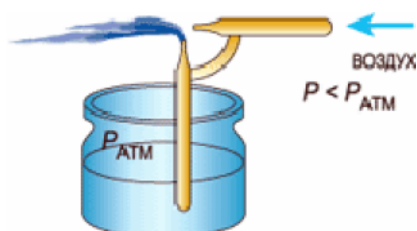
Опыт 1. Убедимся, что чем выше скорость воздуха, тем меньше давление в нем.

Зажжем свечу и через тонкую трубочку, например для коктейля, сильно дунем в нее так, чтобы струйка воздуха прошла примерно на расстоянии 2 см от пламени. Пламя свечи отклонится по направлению к трубочке, хотя на первый взгляд кажется, что воздух должен если и не задуть его, то по крайней мере отклонить в противоположную сторону.



Лабораторный водоструйный насос. В струе воды из крана создается разрежение, которое выкачивает воздух из колбы.

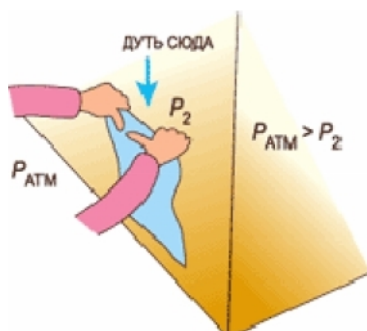
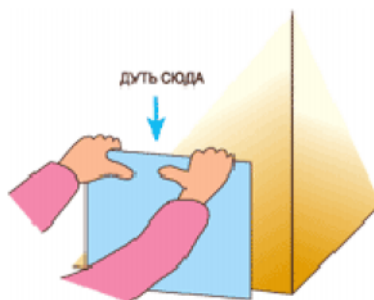
Почему? Согласно уравнению Бернулли, чем выше скорость потока, тем меньше давление в нем. Воздух выходит из трубочки с большой скоростью, так что давление в струе воздуха меньше, чем в окружающем свечу неподвижном воздухе. Перепад давления при этом направлен в сторону выходящего из трубочки воздуха, что и отклоняет к ней пламя свечи.



Принцип работы пульверизатора: атмосферное давление выжимает жидкость в струю воздуха, где давление ниже.

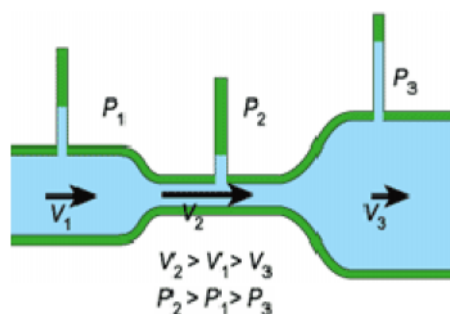
На этом принципе работают пульверизаторы, струйные насосы и автомобильные карбюраторы: жидкость втягивается в поток воздуха, давление в котором ниже атмосферного.

Опыт 2. Возьмем лист писчей бумаги за верхние края, поднесем его к стене и удержим на расстоянии примерно 3-5 см от стены. Подуем в промежуток между стеной и листом. Вместо того, чтобы отклониться от стенки, лист прижимается к ней за счет силы, которую может создавать только возникший перепад давления, направленный к стене. Значит, давление в струе воздуха между листом и стеной меньше, чем в неподвижном воздухе снаружи. Чем сильнее дуть в промежуток, тем плотнее будет прижиматься листок к стене.



Уравнение Бернулли объясняет также классический опыт с трубой переменного сечения. В силу закона неразрывности для сохранения потока массы жидкости в суженной части трубы ее скорость должна быть выше, чем в широкой. Следовательно, давление выше там, где труба шире, и ниже там, где она уже. На этом принципе работает устройство для измерения скорости или расхода жидкости - трубка Вентури.

Падение внутреннего давления в потоке - хорошо проверенный экспериментальный факт, тем не менее он, вообще говоря, парадоксален. Действительно, интуитивно ясно, что жидкость, «протискиваясь» из широкой части трубы в узкую, «сжимается», а это должно привести к росту давления в ней. Такому поведению жидкости в настоящее время нет объяснения даже на молекулярном уровне, по крайней мере, автор его нигде не обнаружил.



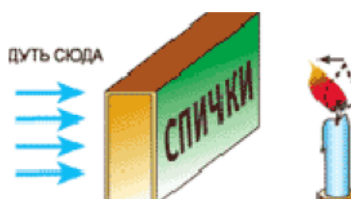
Сопrotивление, испытываемое телом при движении в жидкости

Существование сопротивления среды было обнаружено еще Леонардо да Винчи в XV столетии. Мысль, что сопротивление жидкости движению тела пропорционально скорости тела, впервые высказал английский ученый Дж. Уиллис. Ньютон во втором издании своей знаменитой книги «Математические начала натуральной философии» установил, что сопротивление состоит из двух членов, одного - пропорционального квадрату скорости и другого - пропорционального скорости. Там же Ньютон сформулировал теорему о пропорциональности сопротивления максимальной площади сечения тела,

перпендикулярного направлению потока. Силу сопротивления тела, медленно движущегося в вязкой жидкости, рассчитал в 1851 году Дж. Стокс. Она оказалась пропорциональной коэффициенту вязкости жидкости, первой степени скорости тела и его линейным размерам.

Необходимо отметить, что сопротивление жидкости движущемуся в нем телу в значительной мере обуславливается именно наличием вязкости. В идеальной жидкости, в которой вязкость отсутствует, сопротивление вообще не возникает.

Опыт 1. Посмотрим, как возникает сопротивление движущегося в жидкости тела. Хотя в опыте тело неподвижно, а движется воздух, результата это не меняет. Какая разница, что движется - тело в воздухе или воздух относительно неподвижного тела?

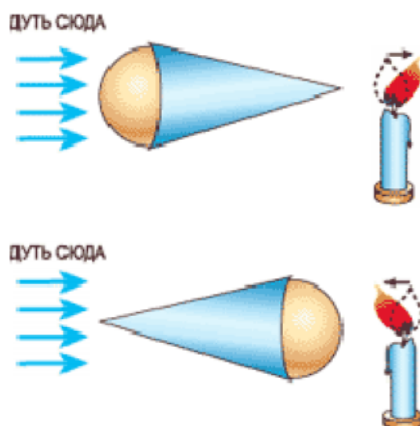


Возьмем свечу и коробок спичек. Зажжем свечу, поставим перед ней на расстоянии примерно 3 см коробок и сильно дунем на него. Пламя свечи отклоняется к коробку. Это означает, что позади коробка давление стало меньше, чем позади свечи, и разность давлений направлена по движению потока воздуха. Следовательно, тело при движении в воздухе или жидкости испытывает торможение.

Поток воздуха набегает на переднюю поверхность коробка, огибает его по краям и не смыкается позади, а отрывается от препятствия. Поскольку давление воздуха меньше там, где его скорость выше, давление по краям коробка меньше, чем позади него, где воздух неподвижен. Позади коробка возникает разность давлений, направленная от центра к его краям. В результате воздух за коробком устремляется к его краям, образуя завихрения, что и приводит к уменьшению давления.

Сопротивление зависит от скорости движения тела в жидкости, свойств жидкости, формы тела и его размеров. Важную роль в создании сопротивления играет форма задней стороны движущегося тела. Позади плоского тела возникает пониженное давление, поэтому сопротивление можно уменьшить, предотвратив срыв потока. Для этого телу придают обтекаемую форму. Поток плавно огибает тело и смыкается непосредственно за ним, не создавая области пониженного давления.

Опыт 2. Чтобы продемонстрировать различный характер обтекания, а следовательно, и сопротивление тел различной формы, возьмем шар, например мяч для пинг-понга или тенниса, приклеим к нему бумажный конус и поставим за ним горящую свечу.



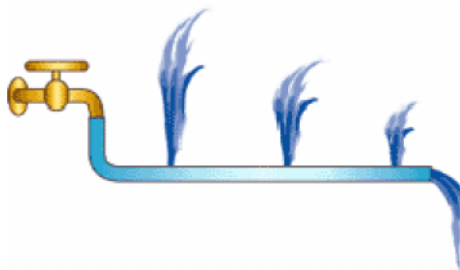
Повернем тело шариком к себе и подуем на него. Пламя отклонится от тела. Теперь повернем тело к себе острым концом и снова подуем. Пламя отклоняется к телу. Этот опыт показывает, что форма задней поверхности тела определяет направление перепада давления позади нее, а следовательно, и сопротивление тела в потоке воздуха.

В первом опыте пламя отклоняется от тела; это означает, что перепад давления направлен по потоку. Струя воздуха плавно обтекает тело, смыкается за ним и далее движется обычной струей, которая отклоняет пламя свечи назад и может даже задуть его. Во втором опыте пламя отклоняется к телу - как и в эксперименте с коробком, позади тела создается разрежение, перепад давления направлен против потока. Следовательно, в первом опыте сопротивление тела меньше, чем во втором.

Падение давления в вязкой жидкости при ее движении в трубе постоянного сечения

Опыт показывает, что давление в жидкости, текущей по трубе постоянного сечения, падает вдоль трубы по течению: чем дальше от начала трубы, тем оно ниже. Чем уже труба, тем сильнее падает давление. Это объясняется наличием вязкой силы трения между потоком жидкости и стенками трубы.

Опыт. Возьмем резиновую или пластиковую трубку постоянного сечения и такого диаметра, чтобы ее можно было насадить на носик водопроводного крана. Сделаем в трубке два отверстия и откроем воду. Из отверстий начнут бить фонтанчики, причем высота ближнего к крану фонтанчика будет заметно выше, чем расположенного дальше по потоку. Это показывает, что давление воды в ближайшем к крану отверстии выше, чем в дальнем: оно падает вдоль трубы в направлении потока.



Объяснение этого явления на молекулярном уровне автору не известно. Поэтому приведем классическое объяснение. Выделим в жидкости маленький объем, ограниченный стенками трубки и двумя сечениями слева и справа. Так как жидкость течет по трубке равномерно, то разность давлений слева и справа от выделенного объема должна быть уравновешена

силами трения между жидкостью и стенками трубки. Следовательно, давление справа, в направлении потока жидкости, будет меньше давления слева. Отсюда заключаем, что давление жидкости уменьшается в направлении течения воды.

На первый взгляд приведенное объяснение удовлетворительно. Однако возникают вопросы, ответа на которые пока нет.

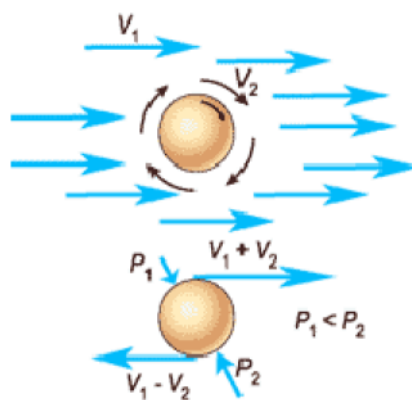
1. Согласно уравнению Бернулли, уменьшение давления в жидкости при ее движении вдоль трубы должно означать, что скорость ее, наоборот, должна расти вдоль потока, то есть течение жидкости должно ускоряться. Но этого не может быть в силу закона неразрывности.

2. Силы трения между стенками трубы и жидкостью должны в принципе тормозить ее. Если это так, то при торможении скорость жидкости вдоль канала должна падать, что в свою очередь приведет к росту давления в ней по потоку. Однако внешнее давление, прокачивающее жидкость по трубе, компенсирует силы трения, заставляя жидкость течь равномерно с одинаковой по всему каналу скоростью. А раз так, то и давление жидкости вдоль канала должно быть везде одинаковым.

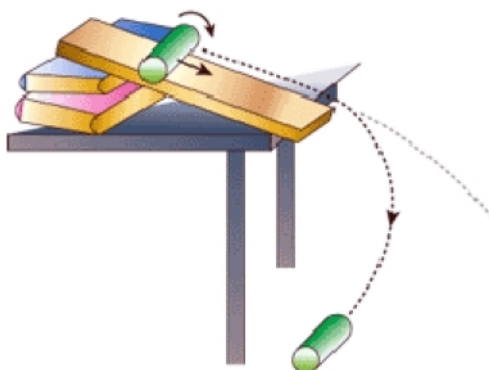
Итак, налицо экспериментальный факт, который легко проверить, однако объяснение его остается открытым.

Эффект Магнуса

Речь идет о возникновении силы, перпендикулярной потоку жидкости при обтекании ею вращающегося тела. Этот эффект был обнаружен и объяснен Г. Г. Магнусом (около середины XIX столетия) при изучении полета вращающихся артиллерийских снарядов и их отклонения от цели. Эффект Магнуса состоит в следующем. При вращении летящего тела близлежащие слои жидкости (воздуха) увлекаются им и также получают вращение вокруг тела, то есть начинают циркулировать вокруг него. Встречный поток рассекается телом на две части. Одна часть направлена в ту же сторону, что и циркулирующий вокруг тела поток; при этом происходит сложение скоростей набегающего и циркулирующего потоков, значит, давление в этой части потока уменьшается. Другая часть потока направлена в сторону, противоположную циркуляции, и здесь результирующая скорость потока падает, что приводит к увеличению давления. Разность давлений с обеих сторон вращающегося тела и создает силу, которая перпендикулярна к направлению встречного, набегающего потока жидкости (воздуха).



Опыт. Склеим из листа плотной бумаги цилиндр. Из доски, положенной одним краем на стопку книг, сделаем на столе наклонную плоскость и положим на нее цилиндр. Скатившись, он вроде бы должен дальше двигаться по параболе и упасть дальше от края. Однако вопреки ожидаемому траектория его движения загибается в другую сторону, и цилиндр залетает под стол. Все дело в том, что он не просто падает, а еще и вращается, создавая вокруг себя циркуляцию воздуха. Возникает избыточное давление, направленное в сторону, противоположную поступательному движению цилиндра.



Эффект Магнуса позволяет игрокам в пинг-понг и теннис отбивать «крученые» мячи, а футболистам - посылать «сухой лист», ударяя мяч по краю.

Ламинарный и турбулентный потоки

Опыт обнаруживает две совершенно разные картины движения жидкости. При низких скоростях наблюдается спокойное, слоистое течение, которое называется ламинарным. При больших скоростях течение становится хаотическим, частицы и отдельные области жидкости движутся беспорядочно, закручиваясь в вихри; такое течение называется турбулентным. Переход от ламинарного течения к турбулентному и обратно осуществляется при определенной скорости жидкости и зависит также от вязкости и плотности жидкости и характерного размера обтекаемого жидкостью тела. До сих пор не ясно, возникают ли вихри с самого начала и имеют просто очень малые размеры, не видимые нами, или вихри возникают начиная с некоторой скорости движения жидкости.

Опыт. Посмотрим, как происходит переход ламинарного потока в турбулентный. Откроем кран и пустим воду сначала тоненькой струйкой, а потом все сильнее и сильнее (конечно, так, чтобы не затопить соседей). Тоненькая струйка движется плавно и спокойно. По мере того, как увеличивается напор воды, скорость струи растет, и, начиная с некоторого момента, вода в ней начинает закручиваться - возникают вихри. Появляясь сначала только в ограниченной области струи, с ростом напора вихри в конце концов охватывают все течение - оно становится турбулентным.



Струя воды падает в поле тяжести, испытывая ускорение. Как только скорость течения возрастает настолько, что число Рейнольдса превышает критическое значение, ламинарное течение (вверху) переходит в турбулентное. Для данного течения $Re \gg 2300$.

Оценить скорость течения жидкости или газа, при которой возникает турбулентность, можно при помощи так называемого числа Рейнольдса $Re = \rho v l / \mu$, где ρ - плотность жидкости или газа, μ - их вязкость (вязкость воздуха, например, $18,5 \cdot 10^{-6}$ Па.с; воды - $8,2 \cdot 10^{-2}$ Па.с), v - скорость потока, l - характерный линейный размер (диаметр трубы, длина обтекаемого тела и пр.). Для каждого вида течений существует такая критическая величина $Re_{кр}$, что при $Re < Re_{кр}$ возможно только ламинарное течение, а при $Re > Re_{кр}$ оно может стать турбулентным. Если измерить скорость течения воды из крана или вдоль желоба, то, исходя из приведенных значений, можно самим определить, при каком значении $Re_{кр}$ в потоке начинает развиваться турбулентность. Оно должно быть порядка 2000.

Доктор физико-математических наук А. МАДЕРА