

Тема 11: Основы гидродинамики

Гидростатика. Законы Паскаля и Архимеда

Плотностью тела называется величина равная отношению массы этого тела к его объёму: $\rho = \frac{m}{V}$

Размерность плотности: $[\rho] = \text{кг/м}^3$.

Если тело неоднородно, то его плотность есть функция координат точек тела.

Жидкостью называется тело, которое способно деформироваться (течь) под воздействием сколь угодно малой касательной силы (этим определением в понятие жидкость включается и понятие газ; газ отличается от жидкости способностью сжиматься и расширяться).

В состоянии равновесия в жидкости отсутствуют касательные напряжения, т.е. все силы, действующие на поверхность мысленно выделенного внутри жидкости объема произвольной формы, всегда направлены по нормали к поверхности. Кроме того, все силы на границе между жидкостью и сосудом, в котором она находится, также направлены по нормали к поверхности сосуда.

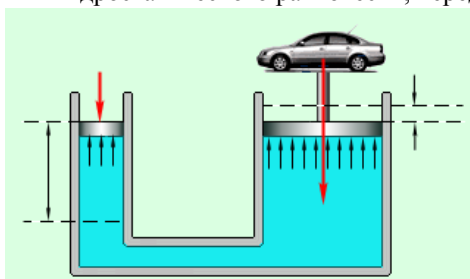
Гидростатика изучает поведение жидкостей и газов в состоянии равновесия.

Давлением называется физическая величина, равная отношению величины силы, приложенной по нормали к поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}$$

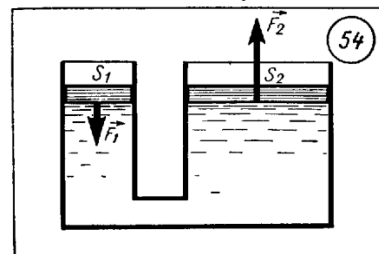
Давление измеряется в паскалях (Па): $[p] = \text{Па} = \text{Н/м}^2$.

Закон Паскаля: Давление, оказываемое на поверхность несжимаемой жидкости, находящейся в закрытом сосуде в состоянии гидростатического равновесия, передается без изменения к любой точке жидкости и к стенкам сосуда.



На законе Паскаля основана работа гидравлического пресса:

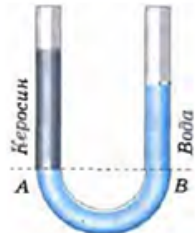
$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$



Следствие из закона Паскаля

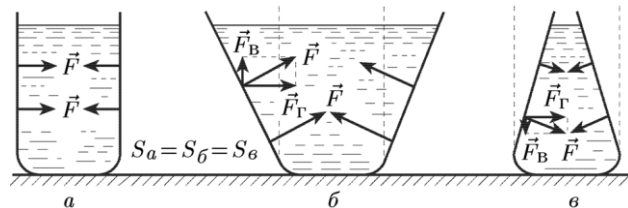
Давление в любой точке на одном и том же горизонтальном уровне в покоящейся жидкости или газе имеет одно и тоже значение

Давление на уровне АВ в обоих коленях трубки одинаково (см. рис)



Гидростатический парадокс:

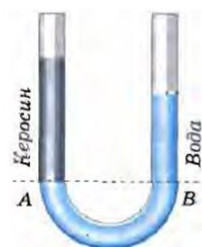
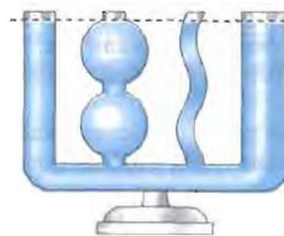
Давление жидкости на дно сосуда не зависит от формы сосуда, а определяется лишь высотой столба жидкости в данном сосуде. (на рис. давление жидкости на дно во всех сосудах одинаково)



Закон сообщающихся сосудов:

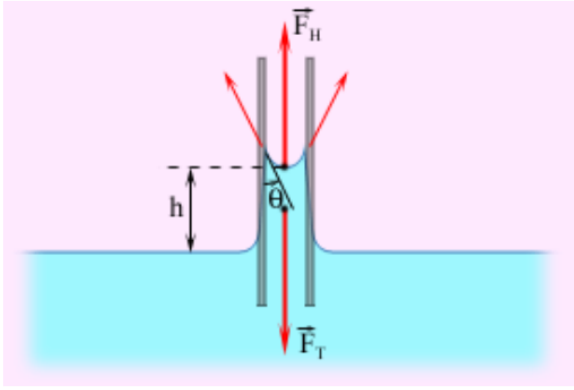
В сообщающихся сосудах однородная жидкость устанавливается всегда на одном и том же горизонтальном уровне. Высоты столбов неоднородной жидкости обратно пропорциональны их плотностям:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$



Капиллярные явления

Капилляром называется трубочка малого диаметра, в которой наблюдается подъём или опускание жидкости под действием сил поверхностного натяжения.



Высота подъема (глубина опускания) жидкости в капилляре (узкая цилиндрическая трубка диаметром $d \leq 1 \text{ мм}$)

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} = \frac{2\sigma}{\rho g r} \cos \theta,$$

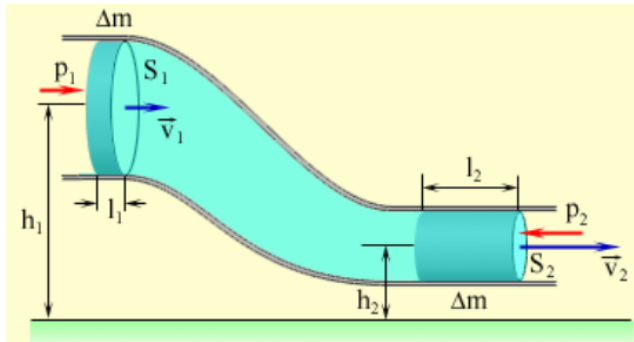
где σ - коэффициент поверхностного натяжения, $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$

R - радиус кривизны поверхности жидкости, м,

r - радиус капилляра, м,

ρ - плотность жидкости, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

θ - краевой угол,



Закон Бернулли для идеальной жидкости

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

где p - статическое давление, Па,

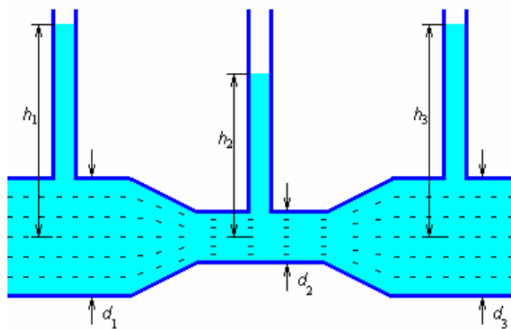
ρgh - гидростатическое давление, Па,

$\frac{\rho v^2}{2}$ - динамическое давление, Па,

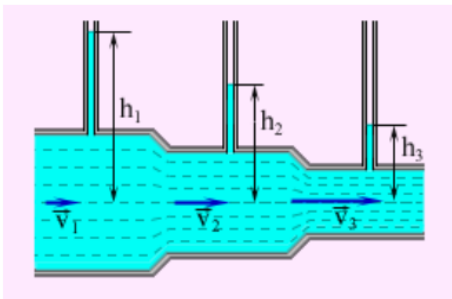
Закон Бернулли описывает стационарное течение несжимаемой жидкости и играет фундаментальную роль в гидродинамических исследованиях. Если известны давление p_1 и скорость v_1 в некотором сечении трубки тока, находящемся на высоте h_1 , то в любом другом сечении на высоте h величины p и v связаны соотношением

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1.$$

Следствие из закона Бернулли



При течении жидкости (газа) по горизонтальной трубке, имеющей различные сечения, скорость жидкости (газа) больше в местах сужения, а статическое давление больше в более широких местах, то есть там, где скорость меньше.



Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости:

Произведение скорости течения несжимаемой жидкости на поперечное сечение трубки тока есть величина постоянная для данной трубки тока.

$$\Delta V = S_1 v_1 t_1 = S_2 v_2 t_2 \quad \text{или} \quad Sv = \text{const}$$

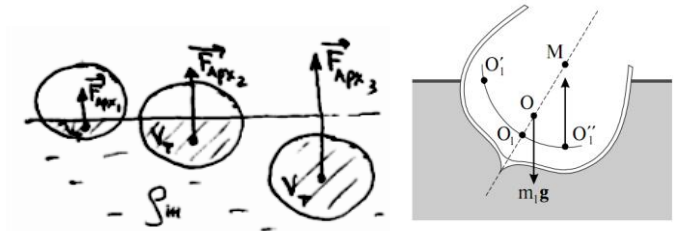
Сила Архимеда (выталкивающая сила, направленная вертикально вверх, действующая на погружённое в жидкость или газ тело).

$$F_{\text{арх}} = \rho_{\text{ж}} g V_T,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости (или газа), $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$,

g - ускорение свободного падения,

V_T - объём погружённой в жидкость части тела, $[\text{м}^3]$.

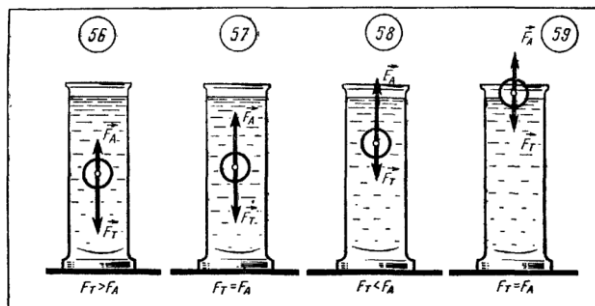


Закон Архимеда: На тело, погруженное в жидкость или газ, действует направленная вертикально вверх выталкивающая сила, равная по величине весу жидкости или газа, вытесненной телом.

Особенность силы Архимеда: приложена к центру тяжести объема вытесненной жидкости и направлена вертикально вверх.

Условия плавания тел:

- если $\rho_{\text{тела}} \geq \rho_{\text{жидкости}}$, то тело тонет,
- если $\rho_{\text{тела}} \leq \rho_{\text{жидкости}}$, то тело всплывает,
- если $\rho_{\text{тела}} = \rho_{\text{жидкости}}$, то тело находится во взвешенном состоянии.



Вязкое трение

Вязким трением называется сила трения, возникающая между слоями жидкости или газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными по модулю скоростями.

Со стороны слоя, движущегося быстрее, на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила и, наоборот, медленно перемещающиеся слои тормозят более быстро движущиеся слои газа. Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев. С молекулярно-кинетической точки зрения причиной вязкости является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями $\vec{v}$ и хаотического теплового движения молекул.

Рассмотрим два слоя А и В жидкости, движущихся параллельно друг другу со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ (рис. 1). Благодаря тепловому движению молекулы из слоя В переходят в слой А и «переносят» в этот слой импульсы $m_0 \vec{v}_2$ своего упорядоченного движения. Если $v_1 > v_2$, то такие молекулы при столкновениях с частицами слоя А ускоряют свое упорядоченное движение, а молекулы слоя А — замедляют. При переходе молекул из быстрее движущегося слоя А в слой В они переносят большие импульсы $m_0 \vec{v}_1$, и соударения между молекулами приводят к ускорению упорядоченного движения молекул слоя В. В результате этих процессов переноса импульсов молекул между слоями А и В возникают силы трения, направленные как уже сказано выше, по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Для силы внутреннего трения справедливо **уравнение Ньютона**:

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{dv}{dx} S, \quad (1)$$

где η — коэффициент вязкости, $\frac{dv}{dx}$ — градиент скорости в направлении оси OX (см.

рис.) (величина, показывающая, как быстро изменяется скорость жидкости или газа в направлении OX , перпендикулярном к направлению движения слоев,

S — величина площади поверхности слоя, по которой действует сила $F_{\text{тр}}$.

Формула Стокса. При небольших скоростях, сопротивление среды обусловлено практически только силами трения. Стокс установил, что сила сопротивления в этом случае пропорциональна коэффициенту динамической вязкости η , скорости v движения тела относительно жидкости и характерному размеру тела (предполагается, что расстояние от тела до границ жидкости, например до стенок сосуда, значительно больше размеров тела). Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела. Для шара радиуса шара r коэффициент пропорциональности оказывается равным 6π . Следовательно, сила сопротивления движению шарика в жидкостях при небольших скоростях в соответствии с формулой Стокса равна:

$$F_{\text{тр}} = 6\pi\eta r v. \quad (2)$$

силы тяжести ($m\vec{g}$), сила Архимеда ($\vec{F}_A$) и силы вязкости ($\vec{F}_{\text{тр}}$).

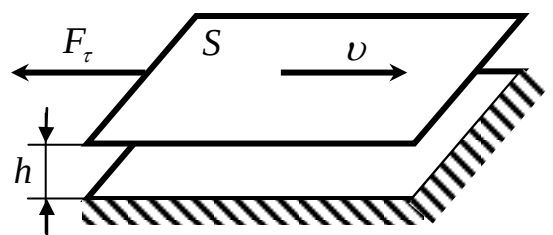


Рис. 1

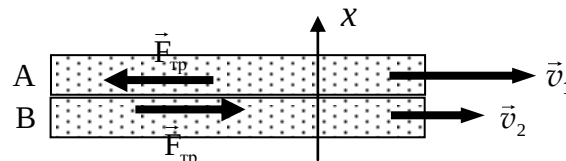


Рис. 1.

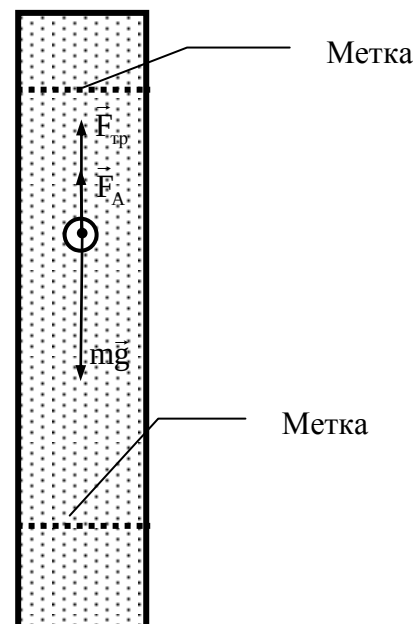


Рис. 2.

Число Рейнольдса. Критерий пренебрежения вязкостью.

Числом Рейнольдса называется безразмерная величина, равная $Re = \frac{\rho v r}{\eta}$,

где ρ - плотность жидкости или газа, v - скорость тела относительно жидкости или газа, r - характерный размер тела (например, радиус шара), η - коэффициент динамической вязкости жидкости или газа.

Текущую жидкость можно рассматривать как невязкую, если число Рейнольдса для такого течения $Re > 1$.

Дадим некоторые оценки течения жидкости по круглой трубе радиуса R . Число Рейнольдса в этом случае $Re = \frac{\rho v R}{\eta}$.

Если принять радиус трубы $R = 1$ см и скорость течения $v = 1$ см/с, то для воды ($\rho = 10^3$ кг/м³, $\eta = 1,15 \cdot 10^{-3}$ кг/(м · с)) при $t = 15^\circ\text{C}$ число $Re = 86$. Это означает, что силы вязкости не существенны, и воду можно рассматривать как невязкую жидкость. Однако это приближение становится несправедливым, если радиус трубки уменьшить на два порядка, и $Re = 0,86 < 1$. При таком течении распределение давлений и скоростей в потоке уже не подчиняется уравнению

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

Еще в большей степени это относится к вязкому глицерину ($\eta = 1,4 \text{ кг} \cdot \text{с} / (\text{м} \cdot \text{с})$). При течении воздуха по трубе

($\rho = 1,3$ кг/м³, $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5}$ кг/(м · с)) число Рейнольдса приблизительно на порядок меньше его значения для воды. Это указывает на то, что силы вязкости при течении воздуха и других газов играют большую роль, чем при течении воды.

Ламинарное и турбулентное течение.

Пусть жидкость вытекает из сосуда через горизонтальную стеклянную трубку (рис. 9). Для контроля за характером течения будем при помощи капилляра впускать ту же, но окрашенную жидкость во входное сечение трубки.

В случае малого поперечного сечения трубки и не очень большой скорости течения окрашенная струйка движется

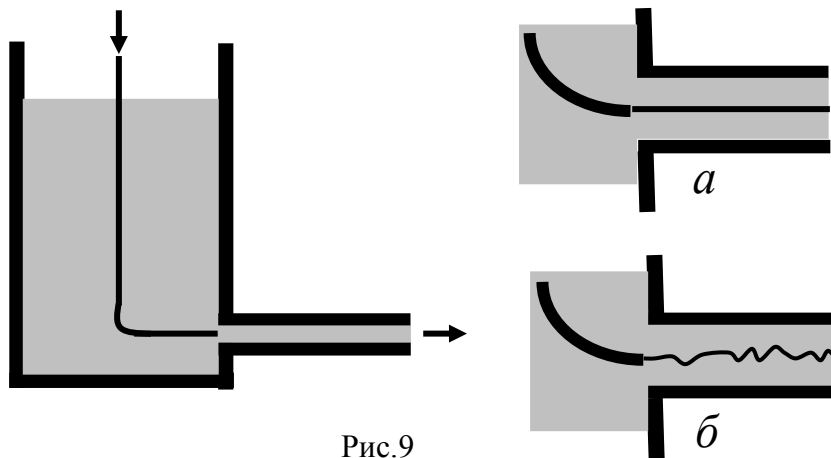


Рис.9

прямолинейно строго вдоль оси трубки (рис. 9а). При большем сечении или при увеличении скорости наблюдается нерегулярное движение, когда струйка разбивается на множество извилистых струек (Рис.9б). В первом случае движение называется **ламинарным**, а во втором — **турбулентным**.

Переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при некотором числе Рейнольдса, получившем название критического:

$$Re_{кр} = \left(\frac{\rho v R}{\eta} \right)_{кр} \quad (19)$$

Значение этого критического числа сильно зависит от формы входной части трубки. В случае закругленного конца, как показано на рис. 10, течение остается ламинарным вплоть до больших чисел Рейнольдса. Область критических чисел $Re_{кр}$ лежит между значениями 1200 (незакругленный вход) и 20000 (закругленный вход).

Тело в потоке вязкой жидкости. Лобовое сопротивление.

Одной из важнейших проблем гидро- и аэродинамики является всестороннее исследование и установление основных закономерностей воздействия потоков жидкости и газа на обтекаемые ими тела. Эта область знаний приобрела исключительное значение при проектировании гидроэлектростанций, ветряных двигателей, в турбиностроении, авиации и др.

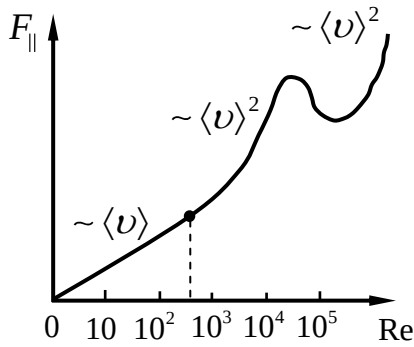


рис. 1

Рис.13

Опыт показывает, что при движении тела в жидкости или газе на него действует сила, которую называют **силы сопротивления**. Эта сила возрастает с увеличением скорости тела относительно жидкости или газа..

На рис. 1. изображена зависимость силы сопротивления при движении в жидкости шара радиусом r в зависимости от числа Рейнольдса.

При малых скоростях тела, когда $Re \leq 10^2$, сила сопротивления пропорциональна скорости тела $F_c \sim v$. При таких скоростях происходит ламинарное течение жидкости вокруг тела.

Линейный участок кривой, изображенной на рисунке 1, оканчивается при числах Рейнольдса $Re \approx 10^2$.

При малых числах Рейнольдса, сила лобового сопротивления для шара подчиняется закону Стокса:

$$F_c = 6\pi\eta r v. \quad (27)$$

При скоростях тела, когда $Re > 10^2$, позади шара происходит отрыв линий тока (рис. 2) и возникает турбулентное течение жидкости за шаром. Хотя течение в тонком пограничном слое остается ламинарным, позади шара образуются вихри. Симметрия давлений в точках А и А' нарушается. Спереди шара течение такое же, как и в отсутствие трения,

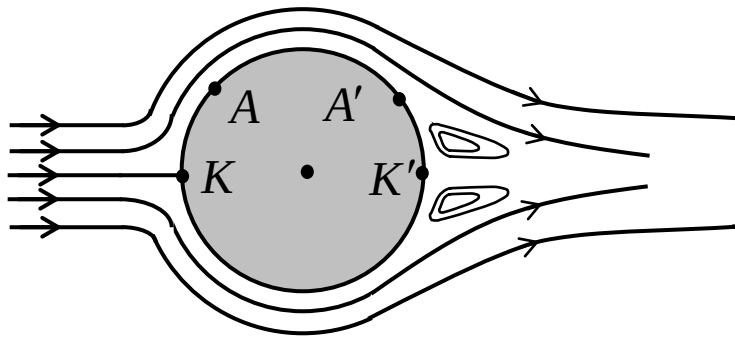


рис. 2

поэтому давление в точке K $p_k = p_0 + \rho v^2/2$. Однако в точке K' давление $p'_k \approx p_0$. Поэтому результирующая сила давления, действующая на шар в направлении потока, будет пропорциональна гидродинамическому напору $\rho v^2/2$ и площади поперечного сечения шара $S = \pi r^2$. На практике силу лобового сопротивления вычисляют по формуле

$$F_c = C_x \cdot S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (30)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления для тела данной формы.

Область квадратичной зависимости силы F , от скорости v простирается вплоть до чисел Рейнольдса $Re \sim 10^5$.

При больших скоростях пограничный слой постепенно турбулизуется и при $Re = 3 \cdot 10^5$ он полностью турбулентен. В области постепенной турбулизации пограничного слоя сила сопротивления с ростом скорости даже уменьшается, поскольку сокращается область срыва потока. Однако затем квадратичная зависимость от скорости потока опять восстанавливается, правда, с несколько меньшим коэффициентом C_x .

Для ламинарного и турбулентного обтекания тел можно использовать единую формулу для расчета силы лобового сопротивления

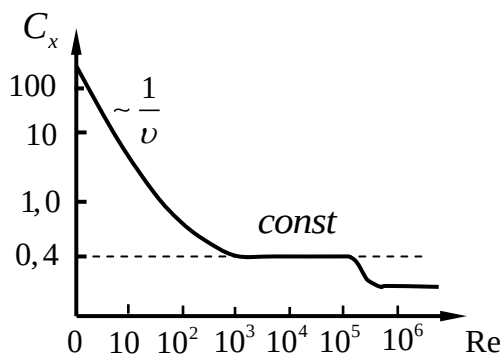


рис. 3

$$F_c = C_x \cdot S \frac{\rho v^2}{2}, \quad (31)$$

в которой коэффициент лобового сопротивления должен зависеть от скорости так, как это изображено на рис. 3.

Иллюстрацией к возникновению силы лобового сопротивления из-за несимметричного обтекания тела служат представленные в таблице 1 величины коэффициентов лобового сопротивления для тел различной формы. Наименьшим коэффициентом лобового сопротивления обладает каплевидное тело, у которого тупой нос и заостренная задняя часть. При

обтекании этого тела поток хорошо смыкается позади него, препятствуя, тем самым, падению давления за телом.

Таблица 1

Тело		C_x
	диск	1,11
	полусфера	1,35...1,40
	полусфера	0,30...0,40
	шар	0,4
	каплевидное	0,045
	каплевидное	0,1

Течение вязкой жидкости по трубам. Формула Пуазейля.

Рассмотрим течение вязкой жидкости, обратившись непосредственно к опыту. Подсоединим тонкую горизонтальную стеклянную трубу с впаянными в нее вертикальными манометрическими трубками при помощи резинового шланга к водопроводному крану (рис. 6). При небольшой скорости течения хорошо видно понижение уровня воды в манометрических трубках в направлении течения ($h_1 > h_2 > h_3$). Это, в свою очередь, указывает на наличие градиента давления вдоль оси трубки — статическое давление в жидкости уменьшается по потоку.

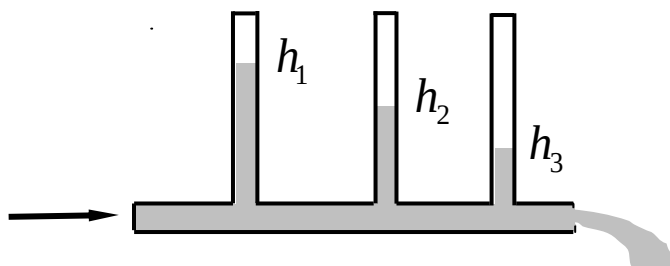


Рис.6

При равномерном прямолинейном течении жидкости силы давления уравниваются силами вязкости.

Расход жидкости, протекающей через поперечное сечение трубы определяют по формуле Пуазейля

$$N_v = \frac{\pi R^4}{8\eta} \frac{p_1 - p_2}{\ell} \quad (18)$$

Здесь расход воды N_v пропорционален разности давлений $p_1 - p_2$ на концах трубы длиной ℓ .

Следует обратить внимание на существенную зависимость пропускной способности трубы от ее радиуса R . При заданном давлении на входе водопроводной сети увеличение диаметра труб вдвое приводит к увеличению их пропускной способности в 16 раз!

20. Механика жидкостей и газов

Закон Паскаля

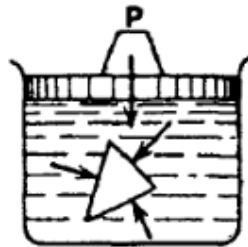


Рис. 1.39

Закон Архимеда

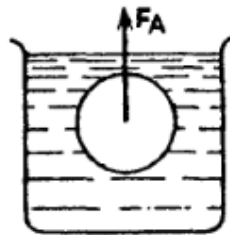


Рис. 1.40

Сообщающиеся сосуды

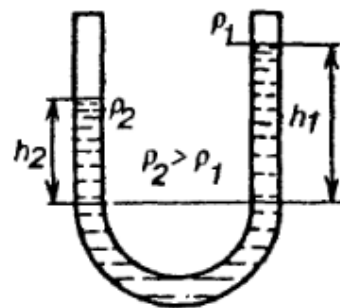


Рис. 1.41

Внешнее давление в неподвижной жидкости (газе), находящейся в замкнутом объеме, передается во все стороны равномерно; иначе — давление в неподвижной жидкости в некоторой точке одинаково во всех направлениях.

На тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная по модулю силе тяжести вытесненной им жидкости (газа); эта сила (архимедова сила) F_A приложена к центру масс погруженной части тела или к центру масс всего тела, если оно погружено в жидкость полностью. Сила Архимеда направлена вертикально вверх (рис. 1.40).

Без учета поверхностного натяжения (см. гл. II) высоты уровней h жидкостей, находящихся в поле тяготения, обратно пропорциональны плотностям жидкостей (рис. 1.41):

$$h_1/h_2 = \rho_2/\rho_1 \quad (1.102)$$

(индексы 1 относятся к одной жидкости, индексы 2 — к другой).

Если $\rho_1 = \rho_2$, то уровни размещаются на одной высоте.

7

Течение идеальной жидкости

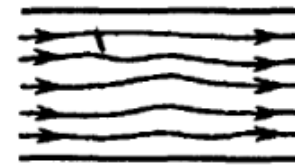


Рис. 1.42

Идеальной называется такая жидкость, в которой отсутствуют силы трения. Течение жидкости называется *ламинарным*, если скорость и давление в каждой точке не зависят от времени. Графически течение изображается *линиями тока* (рис. 1.42); это такие линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора скорости.

Трубка тока

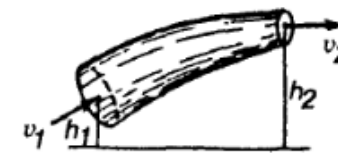


Рис. 1.43

Уравнение Бернулли

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

Поверхность, которая образуется линиями тока, проходящими через контур в жидкости (например, окружность), называется *трубкой тока*.

В одной и той же трубке тока для любого ее сечения выполняется условие (рис. 1.43)

$$p + \rho gh + \rho v^2/2 = \text{const} \quad (1.103)$$

p — давление, v — скорость, h — высота, на которой расположено данное сечение.

Формула Торичелли

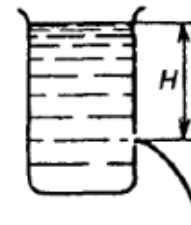


Рис. 1.44

Скорость v , с которой вытекает жидкость из малого отверстия в сосуде, определяется по формуле (рис. 1.44)

$$v^2 = 2gH, \quad (1.104)$$

H — расстояние от верхнего уровня жидкости до отверстия.

Течение вязкой жидкости. Вязкость

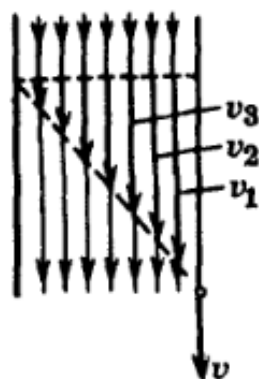


Рис. 1.45

Градиент скорости

Единица вязкости

При ламинарном течении реальной жидкости (или газа), когда слои смещаются относительно друг друга, возникают силы внутреннего трения, тормозящие движения слоев, движущихся с большей скоростью, и ускоряющие слои с меньшей скоростью.

$$F_{\text{вт}} = -\eta S \Delta v / \Delta l \quad (1.105)$$

Δv — разность скоростей движущихся слоев, Δl — расстояние между этими слоями по направлению перпендикулярному скорости;

η — динамическая вязкость — сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями площадью 1 м^2 , которые находятся друг от друга на расстоянии 1 м по нормали к вектору скорости, при разности скоростей между этими слоями 1 м/с .

Векторная величина, модуль которой равен:

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} (\Delta v / \Delta l) = dv / dt$$

называется градиентом скорости.

Паскаль-секунда, Па·с.

Движение твердого тела в вязкой жидкости



Рис. 1.46

При движении в жидкости твердого тела (например, шара, пластины) ближайший слой жидкости прилипает к нему и движется

вместе с ним; остальные слои скользят друг относительно друга.

Действующая на движущееся в жидкости твердое тело сила направлена в сторону, противоположную движению тела; она называется *гидродинамической силой* (или *лобовым сопротивлением*). Лобовое сопротивление имеет две составляющие — силу трения и силу давления. Сила трения обусловлена вязкостью жидкости, сила давления — разностью давлений на передней и задней поверхностях движущегося тела. Сила трения пропорциональна скорости, сила давления пропорциональна квадрату скорости.

Гидродинамическая сила

Гидродинамическую силу можно рассчитать по формуле:

$$F_{\text{гх}} = C_x \rho v^2 S / 2, \quad (1.106)$$

C_x — безразмерная величина, которая называется *коэффициентом гидродинамического сопротивления*; ρ — плотность жидкости, S — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную вектору скорости v .

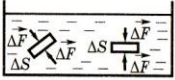
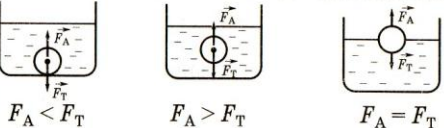
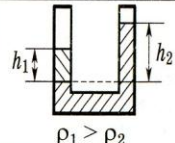
Значения C_x приводятся в таблице (см. ниже п. 21).

Формула Стокса

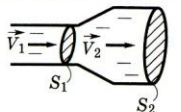
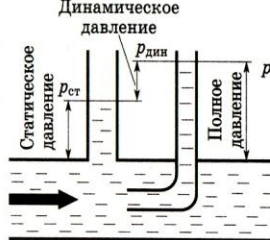
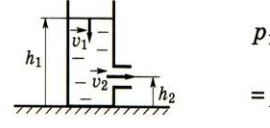
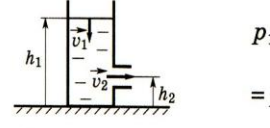
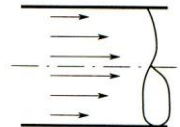
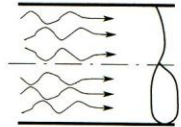
При движении шара в вязкой жидкости сила трения, действующая на него, рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ш}} = -6\pi\eta Rv, \quad (1.107)$$

7. Механика жидкостей и газов

Основные определения	Рисунки, формулы, пояснения, величины
Сила и давление в жидкостях и газах	
1 Газ — агрегатное состояние вещества, в котором частицы слабо связаны между собой силами взаимодействия, движутся хаотично и заполняют весь предоставленный им объем 2 Жидкость — агрегатное состояние вещества, состоящее из слабо связанных друг с другом частиц и сохраняющих в то же время расстояние между собой постоянным, что обеспечивает изменчивость формы и постоянство объема	• В ряде явлений механики жидкости и газы характеризуются <i>одинаковыми параметрами</i> и их поведение определяется <i>идентичными уравнениями</i>. Поэтому часто (в том числе и здесь) <i>при описании физических явлений, пользуясь термином «жидкость», и имеют в виду не только собственно жидкость, но и газ</i>
3 Давление, p [Па] — векторная физическая величина, характеризующая интенсивность воздействия силы на поверхность тела	 ► Давление равно отношению модуля силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности
4 Закон Паскаля: давление, производимое на жидкость внешними силами, передается ею одинаково по всем направлениям	 $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad p_1 = p_0 + \rho g h_1 \quad p_2 = p_0 + \rho g h_2 = p_1 + \rho g (h_1 - h_2)$
5 Закон Архимеда: на всякое тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила (F_A), направленная вверх и равная силе тяжести вытесненной им жидкости	$F_A = \rho g V$ Тело тонет Тело всплывает Тело плавает  $F_A < F_T \quad F_A > F_T \quad F_A = F_T$
6 Закон сообщающихся сосудов: высоты столбов разнородных жидкостей h_1, h_2 обратно пропорциональны плотностям этих жидкостей ρ_1, ρ_2	 $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad h_1 \rho_1 = h_2 \rho_2$ $\rho_1 > \rho_2$
7 Поток — пространство, заполненное частицами движущейся жидкости 8 Стационарное течение — течение жидкости, при котором форма и расположение линий тока, а также значение скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются	 • Для определения направления скоростей частиц в потоке используют <i>линии тока</i>. Густота линий характеризует скорость течения жидкости. По линиям тока можно судить о направлении и модуле скорости в разных точках потока, т. е. о состоянии движения жидкости

7. Механика жидкостей и газов (окончание)

Основные определения	Рисунки, формулы, пояснения, величины
9 Закон постоянства потока — при стационарном течении жидкости в трубах через любое сечение проходит одинаковое количество жидкости за одинаковые интервалы времени	 $Q = \rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 \quad S_1 v_1 = S_2 v_2$ $Q = m/t = \text{const}$ Q [м³/с] — объемный расход жидкости
10 Статическое давление в потоке, $p_{\text{ст}}$ [Па] — давление, обусловленное потенциальной энергией жидкости, находящейся под давлением столба жидкости	 Динамическое давление $p_{\text{дин}}$ Статическое давление $p_{\text{ст}}$ Полное давление p • В покоящейся жидкости динамическое давление равно нулю, а полное давление равно статическому
11 Динамическое давление в потоке, $p_{\text{дин}}$ [Па] — давление, обусловленное кинетической энергией движущейся жидкости	 $p_{\text{ст}} = \rho g h \quad p_{\text{дин}} = \frac{\rho v^2}{2}$ Статическое давление Динамическое давление $p = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}$ • При увеличении скорости потока динамическое давление возрастает, а статическое уменьшается
12 Полное давление в потоке, p [Па] — давление, складывающееся из статического и динамического давления	 $p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$ Если $p_1 = p_2, v_1 \ll v_2; v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$
13 Закон Бернулли: в стационарном потоке сумма статического и динамического давлений остается постоянной	 $p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$ Если $p_1 = p_2, v_1 \ll v_2; v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$
14 Ламинарное (слоистое) течение — упорядоченное течение, характеризующееся отсутствием перемешивания между соседними слоями	Ламинарное течение  $F_{\text{тр}} = \eta v_{12} S / a$
15 Турбулентное (вихревое) течение — неупорядоченное, хаотическое течение, характеризующееся интенсивным перемешиванием, теплообменом, большими значениями коэффициента трения	Турбулентное течение  $F_{\text{сопр}} = \frac{S c_p v^2}{2}$ • Турбулентное течение возникает в результате потери устойчивости ламинарного течения