

Механика жидкостей и газов

В механике жидкостей и газов изучаются равновесие и движение жидкостей и газов, а также их взаимодействие с твердыми телами. В частности, в гидро- и аэростатике рассматриваются условия и закономерности равновесия жидкостей и газов под воздействием приложенных к ним сил, а также условия равновесия твердых тел, находящихся в жидкостях или газах.

Давление. Действие тел (твердых, жидких или газообразных) на мысленно выделенный объем жидкости (газа) можно отнести к одному из двух типов: действие на расстоянии и контактное воздействие.

Величина далекодействующих сил (гравитационных и электромагнитных) пропорциональна выделенному объему жидкости (газа), поэтому эти силы называются объемными. Величина контактных сил пропорциональна площади выделенного участка поверхности, ограничивающей данный объем, поэтому эти силы получили название поверхностных.

Если любой выделенный объем жидкости или газа находится в равновесии, то поверхностные силы действуют лишь перпендикулярно элементарным поверхностям, ограничивающим этот объем. Существование касательных составляющих поверхностных сил при равновесии невозможно, так как из-за текучести любая сколь угодно малая касательная сила вызывает деформацию сдвига жидкости (газа), т.е. нарушает равновесие. Поэтому при описании взаимодействия элементов жидкости (газа) между собой и с другими телами рассматривают лишь нормальные компоненты поверхностных сил.

Давлением называют скалярную величину, равную отношению величины ΔF_n нормальной компоненты поверхностной силы, действующей на элементарную площадку, к площади этой площадки ΔS :

$$p = \frac{\Delta F_n}{\Delta S}$$

Если сила давления F равномерно распределена по поверхности площадью S , то давление

$$p = \frac{F_n}{S}$$

Прибор для измерения давления называется манометром.

Единицы измерения давления: паскаль, мм. рт. ст. Единица давления в Международной системе единиц называется паскалем (Па). Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м²: 1 Па = 1 Н/м². На практике также широко применяется внесистемная единица давления — миллиметр ртутного столба (мм. рт. ст.). Это давление, оказываемое на дно сосуда столбиком ртути высотой в 1 мм: 1 мм. рт. ст. = 133 Па.

Закон Паскаля. Когда внешняя сила действует на твердое тело, то создаваемое ею давление передается телом в направлении действия силы. Жидкости и газы ведут себя принципиально иначе. Согласно закону Паскаля, давление, оказываемое на покоящуюся жидкость внешними силами, передается ею одинаково во всех направлениях без изменения. То же самое утверждение справедливо и для газа.

Это означает, что давление на элементарную площадку, помещенную в покоящуюся жидкость или газ, одинаково при любой ориентации площадки.

Давление жидкости на дно и стенки сосуда. Следствием закона Паскаля является уравнение, описывающее распределение давления внутри покоящейся несжимаемой жидкости, находящейся в поле тяготения. Записывая условия равновесия мысленно выделенного вертикального столба жидкости, можно получить для давления жидкости на глубине h следующее выражение:

$$p(h) = \rho gh$$

где ρ — плотность жидкости, которая вследствие ее несжимаемости одинакова на любой глубине, g — ускорение свободного падения. Давление, определяемое этой формулой, называется гидростатическим. Это давление создает жидкость, находящаяся в равновесии под действием силы тяжести.

Поскольку давление верхних слоев жидкости на нижележащие слои передается ими одинаково по всем направлениям, приложенное к поверхности жидкости внешнее давление p_0 увеличивает давление в каждой точке жидкости на одну и ту же величину. В этом случае

$$p(h) = \rho gh + p_0$$

Таким образом, сила тяжести и внешнее давление на поверхности жидкости создают внутри покоящейся жидкости давление, которое, согласно закону Паскаля, передается на и дно, и на стенки сосуда. По третьему закону Ньютона дно и стенки сосуда оказывают на жидкость такое же по величине давление.

Если стенки сосуда вертикальные, то силы давления стенок сосуда на жидкость направлены горизонтально и не имеют вертикальной составляющей. В этом случае сила гидростатического давления жидкости на дно сосуда равна весу жидкости в сосуде. Если стенки сосуда наклонные, то сила давления стенок на жидкость имеет вертикальную составляющую. Поэтому в расширяющемся кверху сосуде сила давления жидкости на дно равна разности веса жидкости и вертикальной составляющей силы давления стенок. В этом случае сила гидростатического давления на дно меньше веса жидкости. В сужающемся кверху сосуде, наоборот, сила давления на дно равна сумме веса жидкости и вертикальной составляющей силы давления стенок на жидкость. В этом случае сила гидростатического давления на дно больше веса жидкости.

К гидростатическому давлению добавляется давление воздуха p_0 , которое он оказывает на свободную поверхность жидкости. Это не влияет на равновесие сосуда с жидкостью, поскольку такое же давление воздух оказывает на стенки и дно сосуда снаружи.

Гидравлический пресс. Закон Паскаля позволяет объяснить действие широко применяемого на практике устройства — гидравлического пресса. Гидравлический пресс состоит из двух цилиндров разного диаметра, снабженных поршнями и соединенных трубкой. Пространство под поршнями заполняется жидкостью (обычно минеральным маслом). Пусть на поршень площади S_1 действует нормальная сила F_1 , а на поршень площади S_2 — нормальная сила F_2 . Если поршни находятся на одном уровне, то согласно закону Паскаля давление под поршнями одинаково, т.е. $\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$. Отсюда $F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}$.

Если поршни находятся на разных уровнях, то давления под ними различаются на величину $\Delta p = \rho g \Delta h$, где ρ — плотность жидкости, а Δh — разность высот поршней. В этом случае предыдущая формула вообще говоря неверна, однако указанной разницей давлений как правило можно пренебречь по сравнению с давлением жидкости в прессе, создаваемом поршнями.

Гидравлический пресс является механизмом, позволяющим развивать большое усилие на одном из поршней при небольшом усилии на другом. Положенный в его основу принцип используется и в других гидравлических машинах (гидравлические подъемники, гидроусилители и т.п.).

Сообщающиеся сосуды. Система сосудов, соединенных трубами, заполненными покоящейся жидкостью, называется сообщающимися сосудами. Равенство давлений жидкости на одном и том же уровне приводит к тому, что свободные поверхности однородной жидкости в сообщающихся сосудах любой формы находятся на одном уровне (если влияние сил поверхностного натяжения пренебрежимо мало). Если в сообщающихся сосудах находятся жидкости с различными плотностями, то при равенстве давлений высота столба жидкости с меньшей плотностью будет больше высоты столба жидкости с большей плотностью.

Атмосферное давление. Опыт Торричелли. Наша Земля окружена атмосферой — слоем воздуха, состоящего из смеси различных газов. Давление воздуха у поверхности Земли равно примерно $p_0 = 10^5$ Па. Однако человек в повседневной жизни не замечает действия атмосферного давления, поскольку все органы внутри его тела сжаты до такого же давления.

Одними из первых экспериментальных доказательств существования атмосферного давления явились опыты итальянского физика Е. Торричелли, проделанные им в 1643 — 1644 годах. Для этих опытов он использовал стеклянную трубку длиной в 1 м, запаянную с одного конца. Заполняя эту трубку ртутью и опуская ее открытым концом в чашку со ртутью, Торричелли убедился, что ртуть из трубки выливается в чашку не полностью. Каждый раз высота оставшегося столба ртути была примерно одинаковой и составляла около 760 мм.

Прибор, описанный Торричелли представляет собой *ртутный барометр*. Действие этого прибора, являющегося разновидностью сообщающихся сосудов — трубки со ртутью и атмосферы — основано на том, что давление в области над поверхностью ртути в трубке (в «торричеллевой пустоте») пренебрежимо мало. Из условий механического равновесия ртути следует связь между давлением атмосферы и высотой столба ртути h_{Hg}

$$p_0 = \rho g h_{\text{Hg}}$$

Закон Архимеда. Зависимость давления в жидкости или газе от глубины приводит к возникновению выталкивающей силы, действующей на любое тело, погруженное в жидкость или газ. Выталкивающая (архимедова) сила представляет собой результирующую элементарных сил давления, действующих на поверхность тела со стороны окружающей жидкости (газа). В соответствии с законом Архимеда, выталкивающая сила направлена вертикально вверх; ее величина равна весу жидкости (газа) в объеме погруженной части тела, а точка приложения совпадает с центром тяжести объема вытесненной телом жидкости (газа).

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность окружающей жидкости (газа), V — объем погруженного в нее тела.

Плавание тел. Пусть тело, погруженное в жидкость, предоставлено самому себе. Если сила тяжести, действующая на это тело, равна архимедовой силе, то тело плавает внутри жидкости, т.е. находится в безразличном равновесии на любой глубине. Если сила тяжести больше архимедовой силы, то тело опускается вниз (тонет). Если сила тяжести меньше архимедовой силы, то тело поднимается вверх (всплывает на поверхность жидкости) до тех пор, пока вес жидкости, вытесненной погруженной в нее части тела, не станет равным силе тяжести, действующей на тело.

Пример 1.

Бутылку с подсолнечным маслом, закрытую пробкой, перевернули. Определите среднюю силу, с которой действует масло на пробку площадью 6 см^2 , если расстояние от уровня масла в сосуде до пробки равно 20 см . ($\rho_{\text{м}}=0,9 \text{ г/см}^3$)

Решение:

Силу, с которой масло давит на пробку, найдём по формуле:

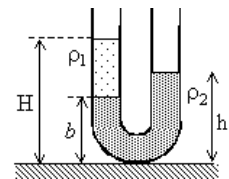
$$F = p \cdot S, \text{ где } p = \rho_{\text{м}} \cdot g \cdot h - \text{давление масла}$$

$$F = \rho_{\text{м}} \cdot g \cdot h \cdot S = 900 \cdot 10 \cdot 0,2 \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 72 \cdot 10^5 (\text{Па})$$

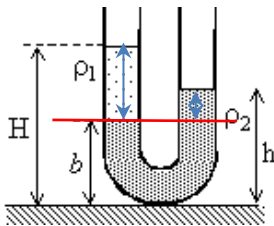
Ответ: $F = 72 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Пример 2.

В широкую U-образную трубку с вертикальными прямыми коленами налиты керосин плотностью $\rho_1 = 0,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ и вода плотностью $\rho_2 = 1,0 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ (см. рисунок). На рисунке $b = 10 \text{ см}$, $H = 30 \text{ см}$. Расстояние h равно ____ см.



Решение:



Выделим красной линией уровень, проходящий по границе этих жидкостей. Согласно закону сообщающихся сосудов, давление на этом уровне одинаковое. Следовательно:

$$\rho_1 \cdot g \cdot (H - b) = \rho_2 \cdot g \cdot (h - b)$$

$$(h - b) = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot (H - b)}{\rho_2 \cdot g} = \frac{\rho_1 \cdot (H - b)}{\rho_2}$$

$$h = \frac{\rho_1 \cdot (H - b)}{\rho_2} + b = \frac{0,8 \cdot 10^3 \cdot (0,3 - 0,1)}{10^3} + 0,1 = 0,26 (\text{м}) = 26 (\text{см}).$$

Ответ: $h = 26 \text{ см}$.

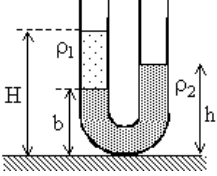
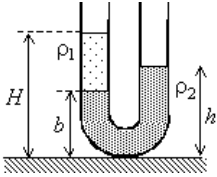
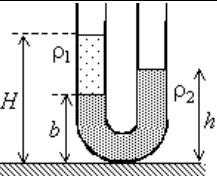
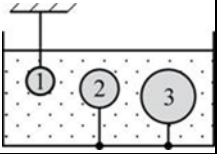
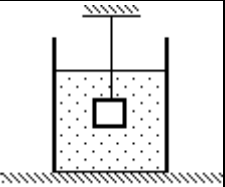
Пример 3.

Сосновый брус объёмом $0,06 \text{ м}^3$ плавает в воде, погружившись на $0,4$ своего объёма. На брус действует выталкивающая (архимедова) сила, равная ____ Н.

Решение:

$$F_{\text{Арх}} = \rho \cdot g \cdot V_{\text{пог}} = \rho \cdot g \cdot 0,4V = 1000 \cdot 10 \cdot 0,4 \cdot 0,06 = 240 (\text{Н}).$$

Ответ: $F_{\text{Арх}} = 240 \text{ Н}$.

1	Книга лежит на столе. Масса книги 0,6 кг. Площадь ее соприкосновения со столом 0,08 м ² . Давление книги на стол равно ___ Па.	75 Па
2	С какой силой давит воздух на поверхность письменного стола, длина которого 120 см, а ширина – 60 см, если атмосферное давление равно 10 ⁵ Па? Ответ дать в кН	72
3	На какую максимальную высоту может поднимать воду насос, если создаваемый им перепад давления равен 200 кПа?	20 м
4	В широкую U-образную трубку с вертикальными прямыми коленами налиты неизвестная жидкость плотностью ρ_1 и вода плотностью $\rho_2 = 1,0 \times 10^3$ кг/м ³ (см. рисунок). На рисунке $b = 10$ см, $h = 24$ см, $H = 30$ см. Плотность жидкости ρ_1 равна ___ кг/м ³	 700 кг/м ³
5	В широкую U-образную трубку, расположенную вертикально, налиты жидкости плотностью ρ_1 и ρ_2 (см. рисунок). На рисунке $b = 5$ см, $h = 19$ см, $H = 25$ см. Отношение плотностей ρ_1/ρ_2 равно	 0,7
6	В широкую U-образную трубку с вертикальными прямыми коленами, схематично изображенную на рисунке, налиты керосин плотностью $\rho_1 = 0,8 \times 10^3$ кг/м ³ и вода плотностью $\rho_2 = 1,0 \times 10^3$ кг/м ³ . На рисунке $b = 8$ см, $h = 24$ см. Расстояние H равно ___ см.	 28 см
7	Чему примерно равно давление, созданное водой, на глубине 2 м?	20000 Па
8	В воде находятся три шарика одинаковой массы, удерживаемые нитями (см. рисунок). На какой шарик действует наибольшая архимедова сила?	 3
9	Кубик имеет объём 100 см ³ . При его полном погружении в воду на него действует выталкивающая (архимедова) сила, равная ___ Н.	1 Н
10	Подвешенный на нити алюминиевый кубик целиком погружён в воду и не касается дна сосуда. Длина ребра кубика равна 10 см. На кубик действует выталкивающая (архимедова) сила, равная ___ Н.	10 Н
11	Сосновый брус объёмом 0,06 м ³ плавает в воде, погрузившись на 0,4 своего объёма. На брус действует выталкивающая (архимедова) сила, равная ___ Н.	240 Н
12	Однородный еловый брус плотностью $\rho = 400$ кг/м ³ длиной 6 м и сечением 10×10 см ² плавает в воде. На брус действует выталкивающая сила, равная ___ Н.	240 Н
13	Груз массой $m = 2,0$ кг, подвешенный на тонкой нити, целиком погружён в воду и не касается дна сосуда (см. рисунок). Модуль силы натяжения нити $T = 13$ Н. Найдите объём груза ___ л.	 0,7 л
14	Пластиковый пакет с песком объёмом 1 л полностью погружён в воду, но не касается дна. На пакет действует выталкивающая (архимедова) сила, равная ___ Н.	10 Н
15	Пластиковый пакет с водой объёмом 1 л полностью погрузили в воду. На него действует выталкивающая сила, равная ___ Н.	10 Н
16	Груз массой 0,1 кг подвешен к нити и опущен в воду. На груз действует выталкивающая (архимедова) сила 0,3 Н. Сила натяжения нити равна ___ Н.	0,7 Н