

Лекция 20. Механика жидкостей и газов

Содержание

1. Силы взаимодействия между частицами в твердых телах, жидкостях и газах
2. Давление в жидкостях и газах. Закон Паскаля
3. Гидростатическое давление
4. Сила Архимеда. Условия плавания тел

Силы взаимодействия между частицами в твердых телах, жидкостях и газах

Раздел механики, в котором изучаются состояния равновесия и движения жидкостей и газов под действием внешних сил, называется **гидроаэромеханикой**.

Кристаллические твердые тела обычно сохраняют свой объем и форму, поскольку частицы этих тел совершают лишь небольшие **колебания** около узлов кристаллической решетки.

Для изменения объема и формы **твердого тела** на конечную величину необходимы конечные **силы**, тем большие по величине, чем больше деформация тела.

Жидкость представляет собой вещество в конденсированном состоянии, промежуточном между твердым и газообразным.

Область существования жидкости ограничена со стороны низких температур фазовым переходом в твердое состояние (кристаллизация), а со стороны высоких температур — в газообразное (испарение).

В жидкости силы, действующие между молекулами, значительно меньше, чем в твердых телах, и быстрее убывают с расстоянием.

Экспериментальные исследования показали, что жидкости обладают определенной структурой.

Ближайшие соседи каждой молекулы жидкости только в течение небольших отрезков времени в среднем располагаются в каком-либо порядке, так что число ближайших соседей и их взаимное расположение в среднем для всех молекул одинаково.

Это означает, что в жидкостях существует так называемый «ближний порядок».

Этот «ближний порядок» в расположении молекул жидкости через небольшие промежутки времени нарушается вследствие хаотических смещений молекул из одних положений в другие.

Следует отметить, что **в жидкостях силы** молекулярного взаимодействия еще достаточны для того, чтобы **расстояния** между молекулами в среднем оставались **неизменными**, следствием чего является **постоянство объема** данного количества жидкости.

Всякий **объем жидкости** всегда ограничен определенной **поверхностью**, которая отделяет его от твердого тела или газа.

Во втором случае поверхность жидкости называют **свободной**.

В газах при обычных условиях **силы** молекулярного взаимодействия настолько **малы**, что молекулы свободно и беспорядочно перемещаются, время от времени соударяясь друг с другом по законам, близким к законам **упругого удара**.

Молекулы газа в процессе столкновений воздействуют одна на другую со значительными **силами**, изменяющими **состояния** их движения.

В результате столкновений молекулы газов беспорядочно разлетаются по всем направлениям, заполняя **весь** предоставленный газу **объем**.

Жидкости и газы в отличие от твердых тел обладают упругими свойствами только по отношению к **изменению объема**.

Жидкости имеют определенный объем, **газам** не свойственны ни форма, ни объем.

Жидкости и газы могут испытывать только всестороннее **сжатие** или **растяжение**. **Сжимаемость** характеризует способность вещества изменять свой объем под действием всестороннего давления. **Сжимаемостью** обладают все вещества.

Сжимаемость газов значительно больше, чем **жидкостей**, которые с определенной степенью точности можно считать практически **несжимаемыми**.

В механике **жидкости и газы** рассматриваются как **сплошные однородные среды**.

Степень сжатия жидкости или газа определяет величину тех **сил**, с которыми отдельные части жидкости или газа действуют друг на друга или на соприкасающиеся с ними тела.

Вследствие **общности ряда свойств** жидкостей и газов во многих механических явлениях они ведут себя **качественно одинаково**, что позволяет многие вопросы механики жидкостей и газов рассматривать с **одной точки зрения**.

Давление в жидкостях и газах. Закон Паскаля

Физическая величина, равная силе, действующей на единицу площади поверхности выделенного объема по нормали к поверхности, называется **давлением**

$$p = \frac{\Delta F}{\Delta S} .$$

Если сила распределена по площади неравномерно, приведенное выражение определяет **среднее давление**.

Давление в данной точке жидкости при этом определится

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS} .$$

Давление — скалярная величина, которая характеризует напряженное состояние сплошной среды. В **данной точке** жидкости или газа величина его **одинакова** при любой ориентации площадки выделенного элемента.

Для доказательства этого положения воспользуемся **принципом отвердения** по отношению к жидкости, которая находится в равновесном состоянии.

В соответствии с **этим принципом** любой **объем жидкости** можно, не нарушая условий равновесия, рассматривать **как твердое тело**, плотность которого равна плотности жидкости.

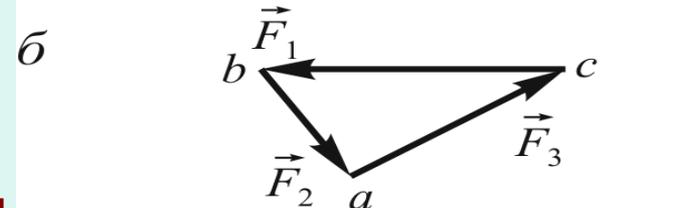
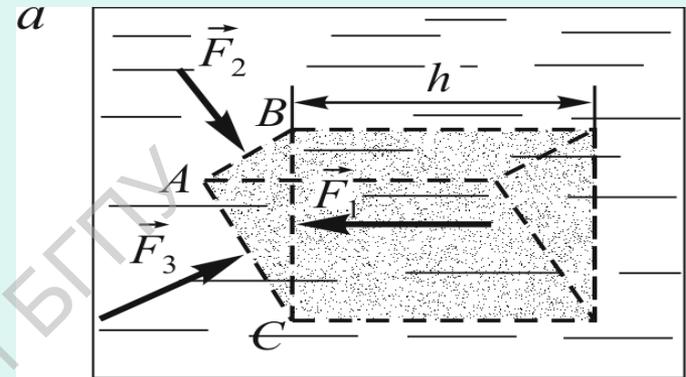
Выделим внутри жидкости произвольную трехгранную призму (рис. **a**) сравнительно небольших размеров.

На каждую грань призмы по нормали к ней действуют силы давления \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , \vec{F}_3 .

Силы давления, действующие на противоположные основания призмы (на рисунке они не обозначены), равны по величине и противоположны по направлению.

В условиях равновесия векторная сумма всех сил должна быть равной нулю

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0 .$$



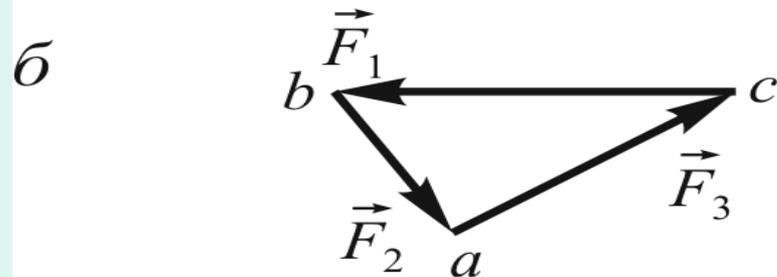
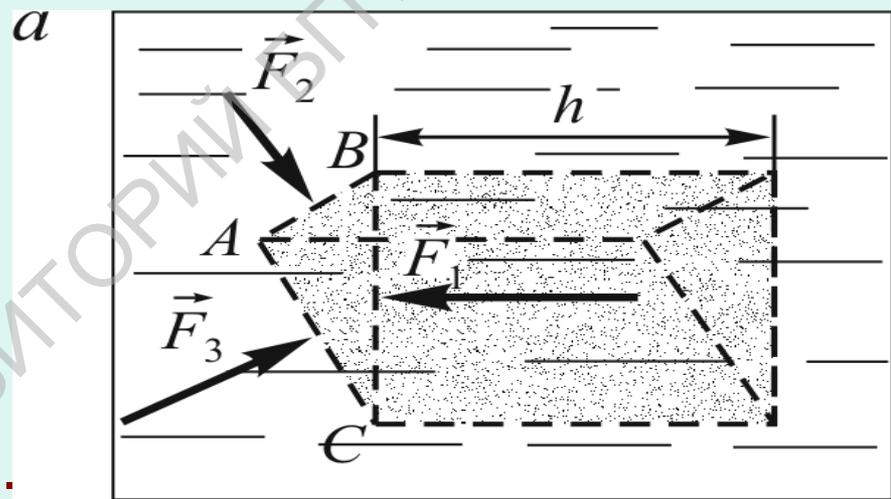
Построим на этих силах треугольник abc.

Этот треугольник подобен треугольнику сечения призмы, параллельного основанию

(рис. б), поскольку \vec{F}_1 , \vec{F}_2 и \vec{F}_3 перпендикулярны соответствующим граням призмы.

Исходя из пропорциональности сторон, получим

$$\frac{F_1}{BC} = \frac{F_2}{AB} = \frac{F_3}{AC}$$



$$\frac{F_1}{BC} = \frac{F_2}{AB} = \frac{F_3}{AC}.$$

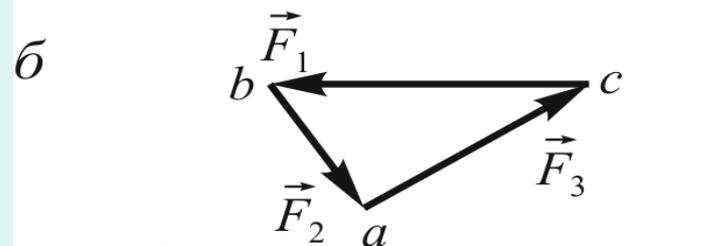
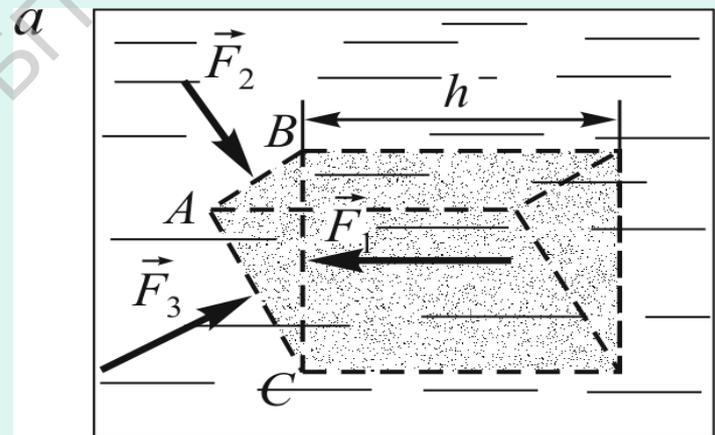
Разделив это соотношение на высоту призмы h , знаменатель каждого члена равенства будет представлять площадь соответствующей грани.

В результате получим

$$p_1 = p_2 = p_3.$$

Таким образом, давление покоящейся жидкости одинаково для любой ориентации площадки.

Уменьшая размеры призмы, приходим к бесконечно малым площадкам, различным ориентированным относительно некоторой точки.



Давление в жидкостях, находящихся в состоянии покоя, подчиняется закону Паскаля.

Давление, создаваемое внешними силами, которые действуют на поверхность жидкости, передается без изменения во все точки жидкости.

В равной степени этот закон справедлив и для газов.

На использовании закона Паскаля основано действие гидравлических прессов, пневматических и гидравлических тормозов и других технических сооружений.

В СИ **давление** измеряется в паскалях ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$).

Приведем соотношения между **единицей давления** в СИ и наиболее часто встречаемыми **внесистемными единицами**.

- $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,033 \text{ кгс/см}^2$
- $1 \text{ ат} = 1,0 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$.
- $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.
- $1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ тор} = 133,3 \text{ Па}$.
- $1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ Па}$.

Примечания: 1 атм — сокращенное обозначение физической атмосферы; 1 ат — сокращенное обозначение технической атмосферы; 1 кгс — единица силы (килограмм-сила) — в существовавшей прежде технической системе единиц измерения (МКГСС);

$$1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н}.$$

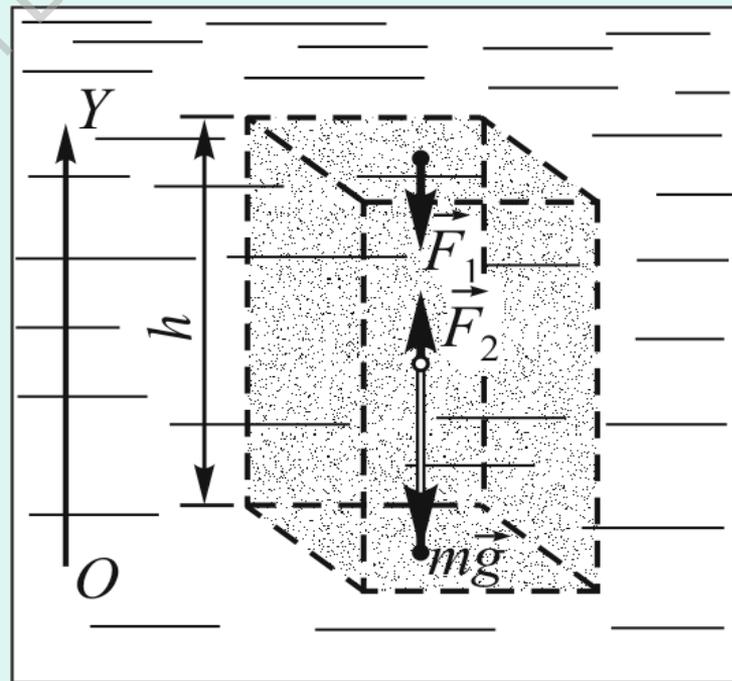
Гидростатическое давление

Применив принцип отвердения, выделим в жидкости, которая находится в состоянии покоя, объем в виде прямоугольного параллелепипеда.

На основания параллелепипеда действуют силы давления \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

Поскольку выделенный объем жидкости находится в состоянии

покоя, то силы давления, действующие на боковую поверхность выделенного объема, уравниваются, на этот объем действует также сила тяжести $m\vec{g}$.



В результате **условие равновесия** выделенного параллелепипеда в жидкости будет **иметь вид**:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + m\vec{g} = 0.$$

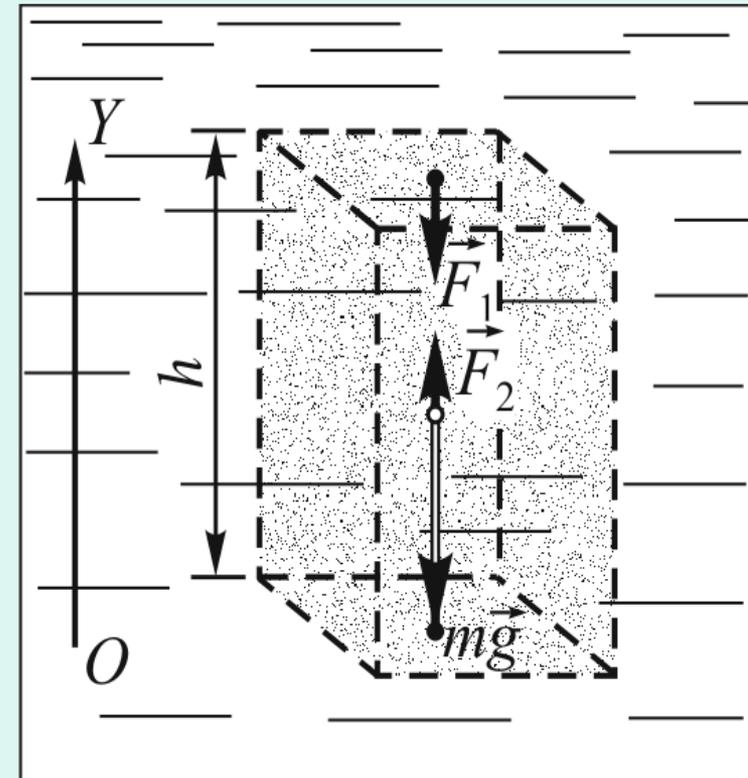
Спроецировав последнее равенство на вертикальную ось Y , получим

$$-p_1\Delta S + p_2\Delta S - \rho gh\Delta S = 0,$$

где ρ — плотность жидкости.

Откуда $p_2 = p_1 + \rho gh$,

где $p = \rho gh$ — гидростатическое давление.



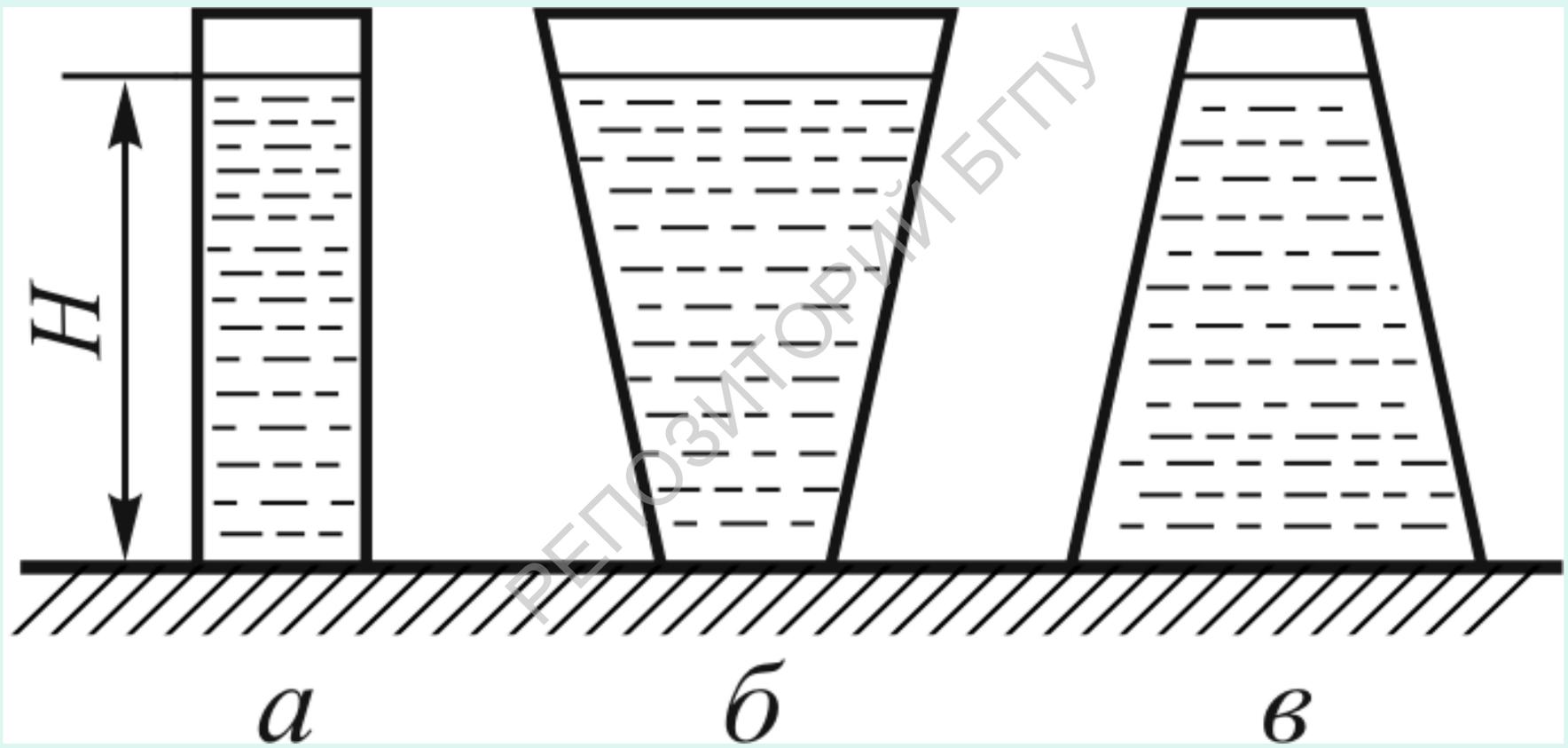
Если **давление** на свободную поверхность жидкости обозначить p_0 , тогда **гидростатическое давление** в произвольной точке жидкости, находящейся на глубине h , будет

$$p = p_0 + \rho gh$$

Полученное уравнение называют **гидростатическим уравнением**.

Как видно, **гидростатическое давление** зависит от плотности жидкости и высоты ее столба в сосуде и не зависит от формы сосуда.

Таким распределением давления в жидкости объясняется гидростатический парадокс: сила давления на дно сосуда не всегда равна весу жидкости в сосуде



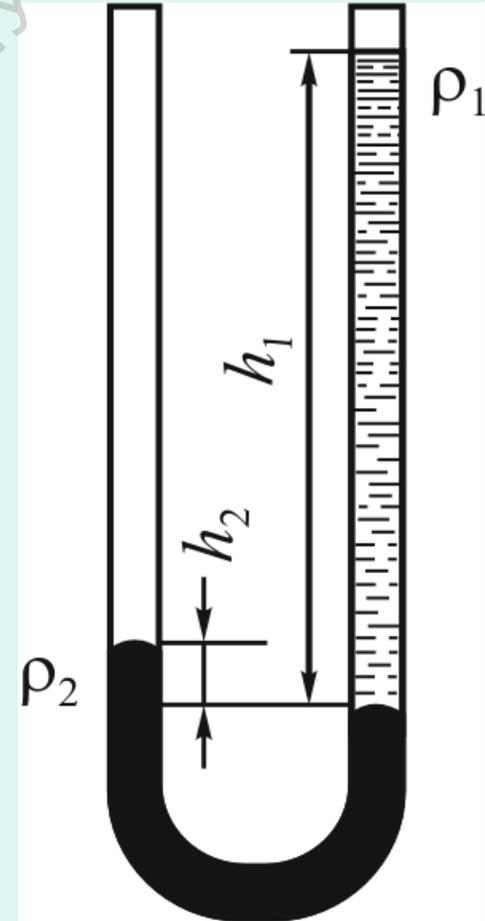
Гидростатическое уравнение позволяет сформулировать условия равновесия однородных и неоднородных жидкостей в сообщающихся сосудах.

Однородные жидкости ($\rho_1 = \rho_2$) устанавливаются в сообщающихся сосудах

на одном уровне;

если жидкости в сообщающихся сосудах неоднородны, то их высоты обратно пропорциональны плотностям жидкостей

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



Сила Архимеда. Условия плавания тел.

В соответствии с законом, установленным древнегреческим ученым Архимедом (ок. 287—212 до н. э.):

На тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх, численно равная весу жидкости или газа в объеме погруженной части тела и приложенная в центре этого объема.

Точку приложения выталкивающей силы называют центром давления.

Выталкивающая сила возникает вследствие упругого взаимодействия погруженного тела с жидкостью, т. е. имеет электромагнитную природу.

Она равна геометрической сумме всех сил давления, действующих со стороны жидкости (газа) на поверхность погруженного тела.

Пусть сосуд с жидкостью находится в состоянии покоя относительно инерциальной системы отсчета.

Рассмотрим цилиндр высотой H и площадью основания S , погруженный в жидкость плотностью ρ .

Пусть **внешнее давление**

равно p_0

а основания цилиндра

находятся

на глубинах h_1 и h_2 .

Сила давления на верхнее основание цилиндра

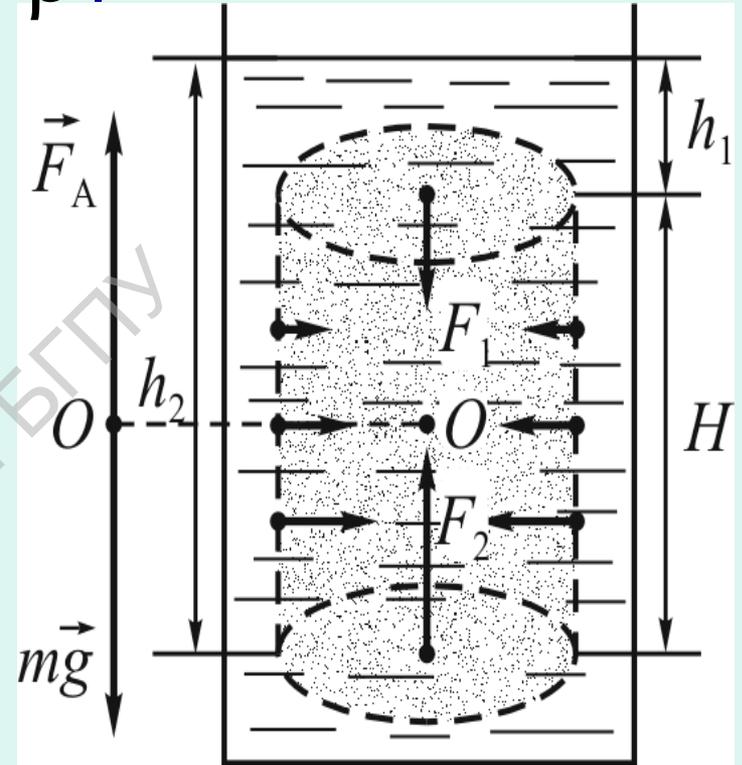
$$F_1 = (p_0 + \rho g h_1) S \text{ и}$$

направлена вертикально **вниз**.

Сила давления на нижнее основание цилиндра

$$F_2 = (p_0 + \rho g h_2) S$$

и направлена вертикально **вверх**.



Силы давления на боковую поверхность цилиндра скомпенсированы, поскольку в противном случае он начал бы двигаться в горизонтальном направлении.

По определению выталкивающая сила (или сила Архимеда)

$$\vec{F}_A = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 \quad .$$

В скалярной форме $F_A = F_2 - F_1$.

Если в последнюю формулу подставить значения сил давления, получим

$$F_A = \rho g S H \quad .$$

Поскольку $SH = V$, где V — объем цилиндра, то

$$F_A = \rho g V$$

С другой стороны, ρV — это **масса** жидкости, которую можно было бы налить в цилиндр, если бы он был пустым.

Поэтому $F_A = mg$.

Так как жидкость находится **в покое** относительно инерциальной системы отсчета, связанной с поверхностью Земли, то **вес** жидкости G равен ее **силе тяжести** mg .

С учетом этого $F_A = G$, где G — **вес жидкости** в объеме цилиндра, погруженного в жидкость.

Подчеркнем, что в законе Архимеда речь идет именно о весе жидкости в объеме тела (части тела), которое погружено в жидкость, а не о силе тяжести самой жидкости.

Это очень существенно, поскольку вес тела равен силе тяжести только при условии, что ускорение тела относительно инерциальной системы отсчета, связанной с поверхностью Земли, равно нулю.

В общем случае, если сосуд с жидкостью движется с ускорением \vec{a} , вес жидкости в объеме погруженной части тела $\vec{G} = m(\vec{g} - \vec{a})$, поэтому

$$\vec{F}_A = m(\vec{g} - \vec{a})$$

Из последнего выражения следует, что если жидкость находится в состоянии полной невесомости (например, в сосуде, который свободно падает, или в космическом корабле, летящем с выключенными двигателями), то на погруженное в нее тело выталкивающая сила не действует.

В земных условиях на тело, которое находится в жидкости, кроме выталкивающей силы действует также сила тяжести $m\vec{g}$

Если $mg > F_A$, т. е. плотность тела ρ_T больше плотности жидкости ρ , тело тонет.

Если $mg = F_A$ ($\rho_T = \rho$), то тело находится внутри жидкости в состоянии безразличного равновесия (так называемое взвешенное состояние).

Если $mg < F_A$ ($\rho_T < \rho$), тело плавает на поверхности жидкости, частично погрузившись в нее.