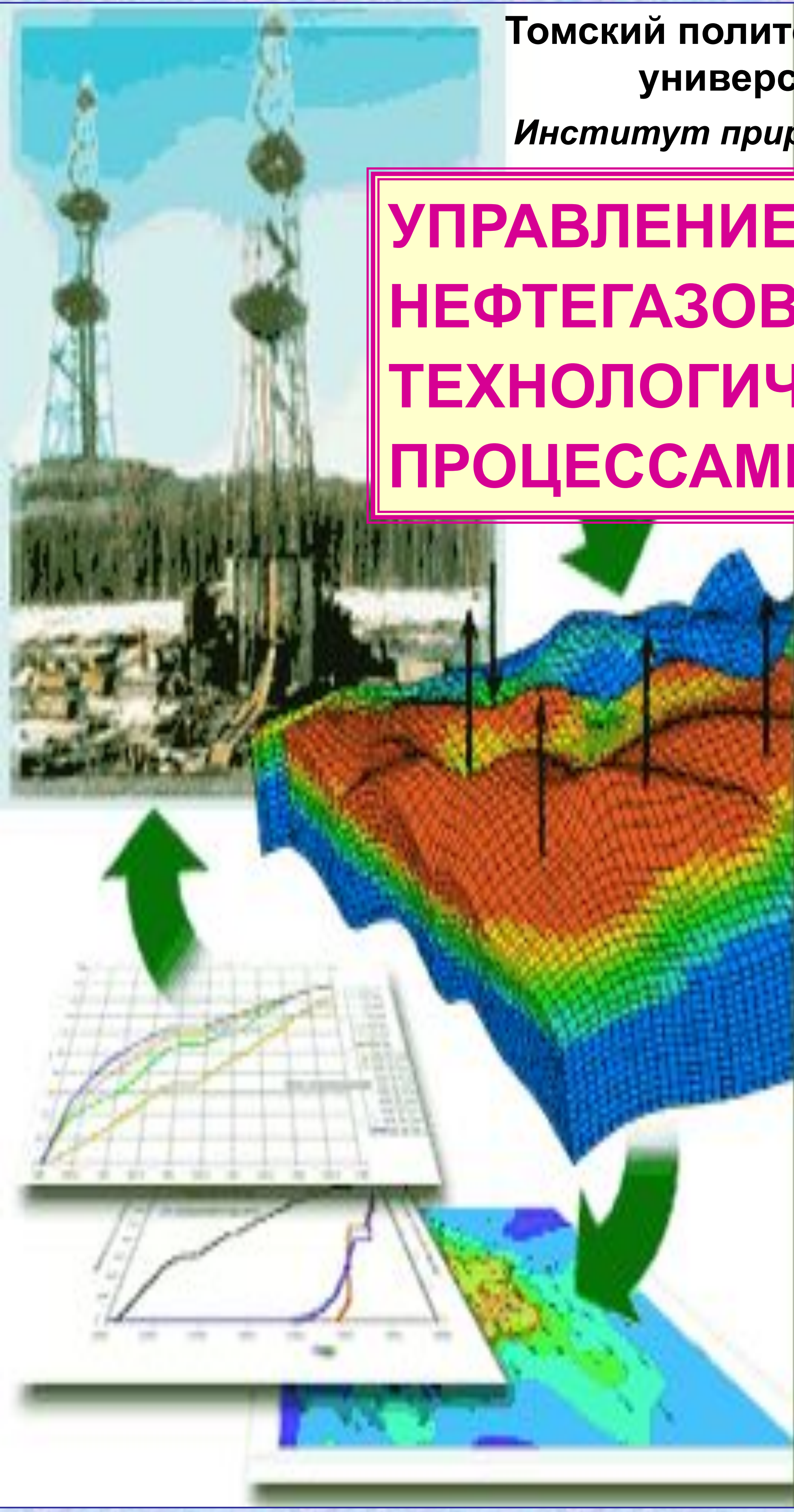
Томский политехнический университет

Институт природных ресурсов

УПРАВЛЕНИЕ НЕФТЕГАЗОВЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ



Презентация учебного курса для студентов направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело» (магистры)

КАФЕДРА геологии и разработки нефтяных месторождений

Подготовил проф. каф. ГРНМ Зятиков Павел Николаевич

Гидравлика - это наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей. Гидравлику подразделяют на гидростатику и гидродинамику. Гидростатика изучает законы равновесия жидкостей, а гидродинамика - законы движения жидкости.

Гидравлика **(техническая механика жидкости) - прикладная часть гидромеханики, которая использует те или иные допущения для решения практических задач. Она обладает сравнительно простыми методиками расчета по сравнению с теоретической механикой жидкости, где применяется сложный математический аппарат. Однако гидравлика дает достаточную для технических приложений характеристику рассматриваемых явлений.**

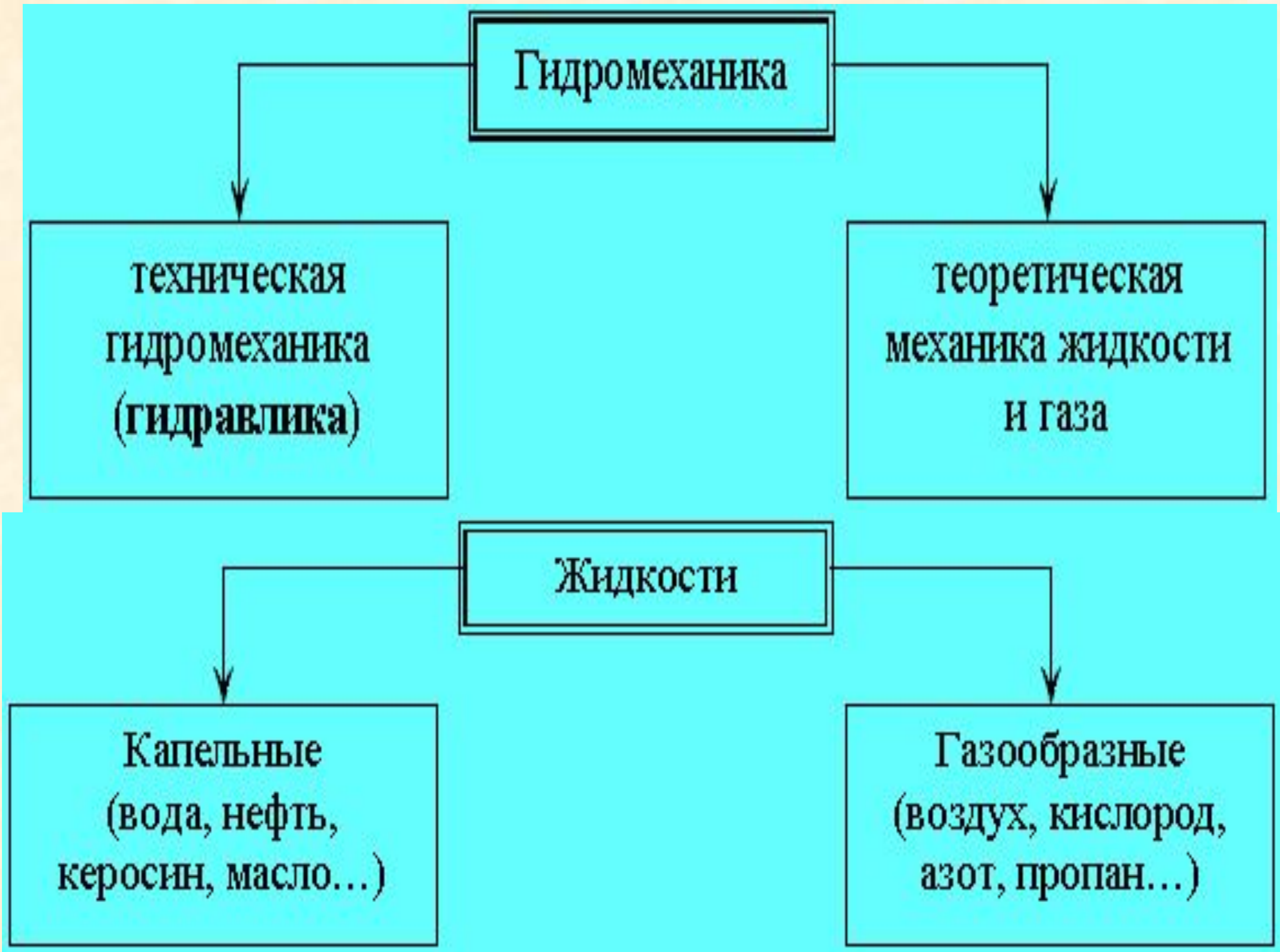


Рис. 1.2. Виды жидкостей

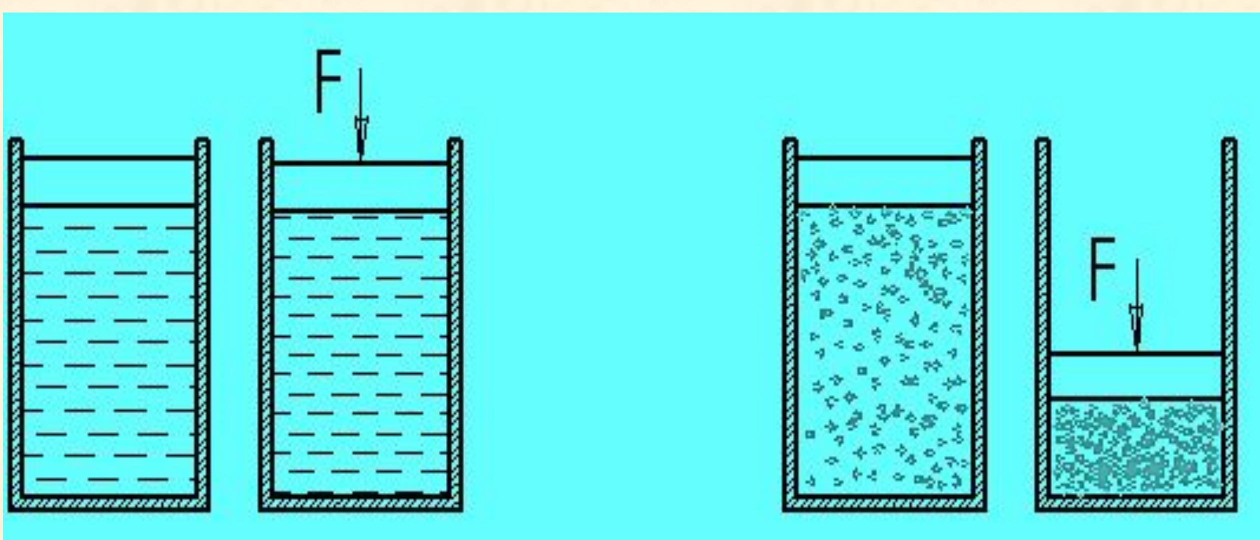


Рис. 1.3. Сжатие жидкостей и газов

ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ –

основаны на условиях равновесия жидкости и твердого тела в жидкости

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ –

основаны на законах сохранения массы и энергии

ОСНОВЫ ГИДРОСТАТИКИ

СИЛЫ

Сила - ***количественная мера взаимодействия двух тел***.

Две категории сил:

Массовые - **пропорциональны массе тела**
В механике это сила тяжести

$$G=m\cdot g$$

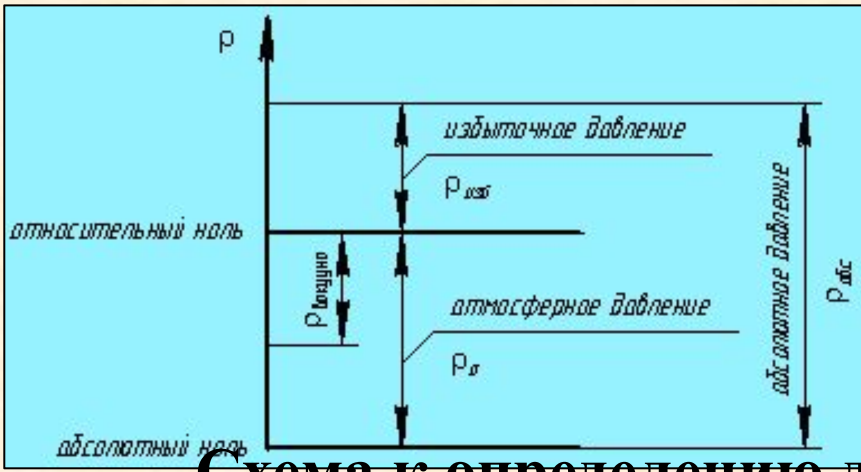
2-я - сила инерции

$$Fu=m\cdot a.$$

Поверхностные силы.
Они появляются на контакте двух тел и имеют электромагнитное происхождение.

$$P = \frac{F}{S},$$ (*Н/м²*) или (Па),

где *F* - сила, действующая на жидкость, *Н* (ньютоны); *S* - площадь, на которую действует эта сила, м² (кв.метры). Если давление отсчитывают от атмосферного, то оно называется *избыточным* $P_{изб}$. Атмосферное давление постоянно P_a = 103 кПа



$$P_{абс} = P_{изб} + P_a;$$

$$1\,\text{Па} = \frac{1\,\text{Н}}{1\,\text{м}^2}.$$

Схема к определению давлений

За единицу давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль - давление вызываемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м²: 1 Па = 1 Н/м² = 10^{-3} кПа = 10^{-6} МПа.

1 Па = 0,102 кгс/м² или 1 кгс/м² = 9,81 Па.

Основные физические свойства жидкостей

Плотностью **называется физическая величина, численно равная отношению массы тела к его объему:**

$$\rho = \frac{m}{V},$$

где *m* - масса жидкости, кг; *V*- объем сосуда, который занимает жидкость, *м*^{3}

Сжимаемостью **называется свойство жидкости изменять свой объем при изменении давления и температуры.**

Сжимаемость характеризуется *коэффициентом объемного сжатия в* которое определяет относительное уменьшение объема жидкости при увеличении давления:

$$\beta_V = \frac{dV}{V_0 dp},$$

где *Vo* - начальный объем, *м*^{3} ; *dV* - элементарное изменение объема, *м* ; *dp* - элементарное изменение давления, *Па.*

Температурное расширение жидкостей характеризуется *коэффициентом температурного расширения β,* представляющим увеличение объема жидкости при повышении температуры:

$$\beta_T = \frac{dV}{V_0 dT},$$

где *dT* - элементарное изменение температуры, *К.*

μ

Силы внутреннего трения (силы вязкости)

При движении реальных жидкостей возникают касательные силы трения. В плоском потоке с поперечным сдвигом касательное напряжение трения выражается

$$\tau = \mu \frac{\partial w_x}{\partial y},$$

где μ - динамический коэффициент вязкости, *Па • с*. Для реальных жидкостей и газов μ зависит от температуры и давления.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Кинематический коэффициент вязкости также зависит от температуры и более существенно зависит от давления, в отличие от

Законы Ньютона

Первый закон: *Если равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю, то тело находится в состоянии покоя или движется с постоянной скоростью.*

Второй закон: ***При наличии неуравновешенной силы F тело движется с ускорением а. При этом*** $F=ma$.

Третий закон: *При взаимодействии всегда есть две силы. Они равны по величине, противоположны по направлению и приложены к разным телам.*

СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ

Закон всемирного тяготения

Сила взаимного притяжения любых двух тел, размеры которых гораздо меньше расстояния между ними, пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между этими телами.

Так, сила притяжения *G* между телом массой *m* и Землей равна

$$G = g \cdot m \cdot M / r^2$$

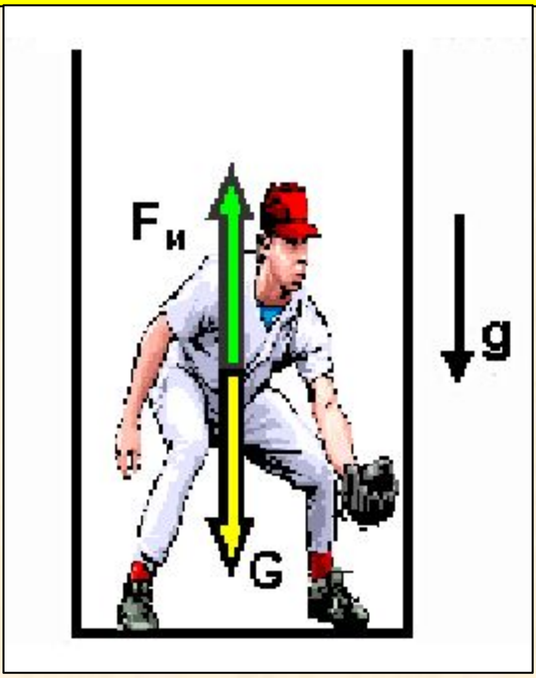
где *M* - масса Земли, g - гравитационная постоянная, *r* - расстояние от поверхности Земли до ее центра (*r* - радиус Земли).

Введем обозначение: $g \cdot M / r^2 = g$ **- ускорение свободного падения.**

$$G = m \cdot g.$$

Это уравнение подтверждает необыкновенное свойство гравитационных сил, установленное экспериментально: *гравитационные силы сообщают всем телам одинаковое ускорение, которое не зависит ни от состава, ни от строения, ни от массы самих тел.*

Принцип эквивалентности Эйнштейна заключается в следующем: *Тяготение в каждой точке пространства эквивалентно соответствующим образом подобранному ускорению системы отсчета*



Этот принцип с неизбежностью приводит к установлению теснейшей связи между гравитацией и геометрией.

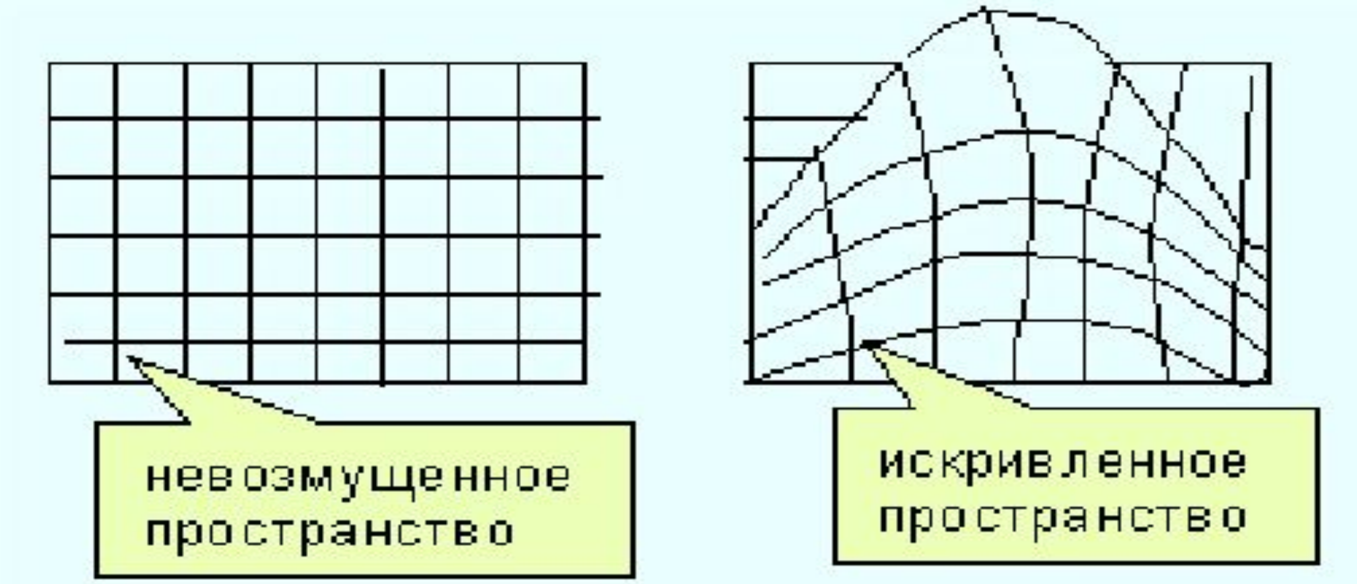
Искривление световых лучей

Вывод: ***Ускорение системы отсчета меняет геометрию пространства***

Связь тяготения с геометрией пространства

Астрономические наблюдения подтверждают, что световые лучи отклоняются под влиянием тяготения в сторону солнца.

В повседневной жизни мы пользуемся привычной нам геометрией Евклида, которая базируется на ряде постулатов, таких, как: сумма углов треугольника равна *180° ;* отношение длины окружности к ее диаметру равно числу π ; через две точки можно провести только одну прямую линию; через точку, лежащую вне прямой, можно провести только одну прямую, параллельную данной прямой. Геометрическую модель нашего пространства, обладающего евклидовыми свойствами, можно легко вообразить, если представить себе резиновую пленку с нанесенной на нее сеткой (невозмущенное пространство).



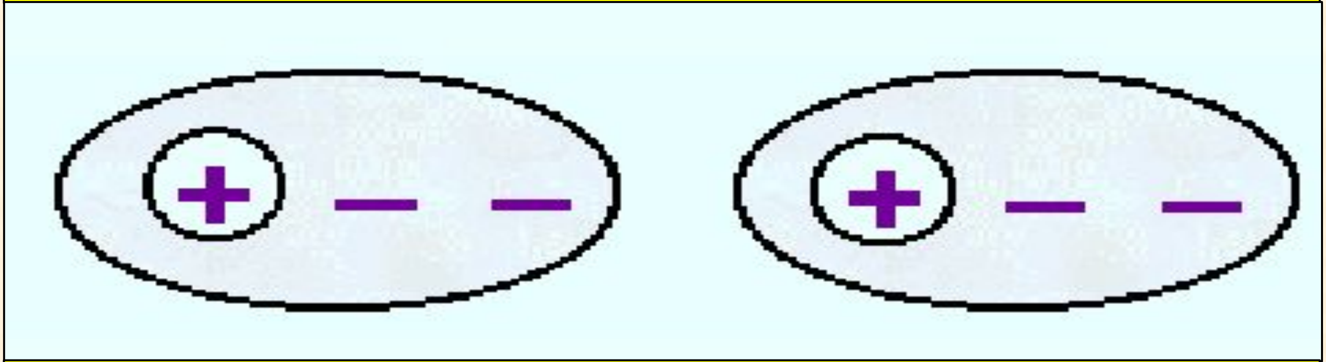
Но вот мы надавили пальцем на какой-то участок пленки Этот участок растянулся, изменились углы между линиями, сумма углов треугольника сделалась отличной от р , произошло нарушение Евклидовой геометрии.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ

В природе по современным данным имеется не более четырех типов взаимодействий: всемирное тяготение и электромагнитные взаимодействия имеют место в ньютоновской механике, а ядерные и слабые взаимодействия - в атомных ядрах при взаимном превращении элементарных частиц.

Силы упругости, которые позволяют твердым телам сохранять свою форму, препятствуют изменению объема жидкостей и сжатию газов; силы трения, тормозящие движение твердых тел, жидкостей и газов - все это электромагнитные силы.

Электрическое поле системы электрон-ядро не имеет полной шаровой симметрии. При сближении с другим атомом это поле возмущает движение электрона соседнего атома таким образом, что “центр тяжести” отрицательного заряда оказывается смещенным относительно ядра.



Каждый атом (или молекула) поляризуют своего соседа, и он превращается в диполь, в котором заряды противоположных знаков пространственно разделены.

УПРУГИЕ СИЛЫ

В реальных газах и жидкостях из сил притяжения действуют только силы Ван-дер-Ваальса, а в твердых телах еще и обменные (химические) силы. Силы Ван-дер-Ваальса удерживают молекулы жидкости друг возле друга на близких расстояниях порядка размера самих молекул.

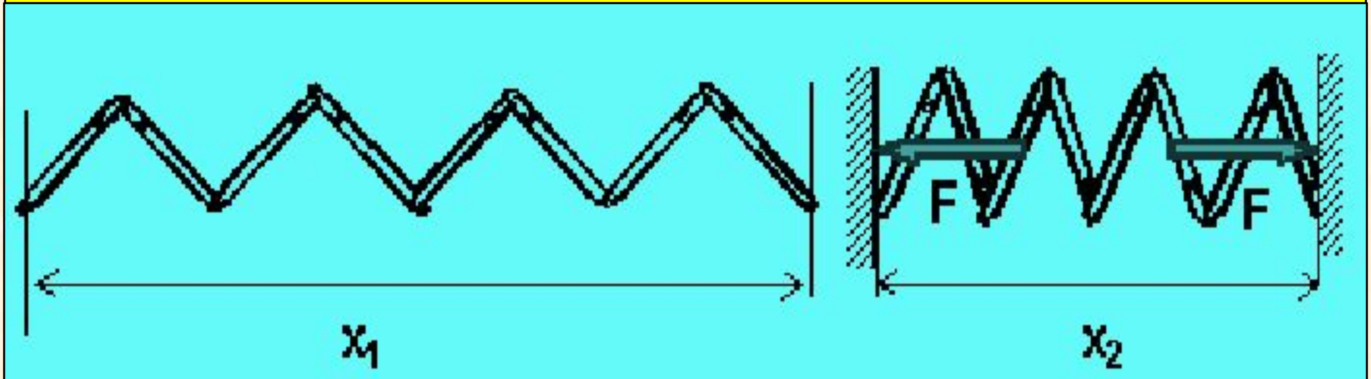
Для упругих тел напряжения (силы, действующие на единичную площадь) прямо пропорциональны деформациям.

Это закон Гука, который для жидкостей имеет вид

$$p=-E\cdot \Delta V/V,$$

где p - сжимающее напряжение (гидростатическое давление), ΔV - изменение объёма, а V - первоначальный объём.

Величину сил отталкивания и характеризует **модуль объемной упругости E**, который, например, для воды равен $2\cdot 10^9$ ***Па***. Нетрудно понять, что при сжатии твердых тел силы отталкивания еще больше (модуль объемной упругости для стали равен $2\cdot 10^{11}$ ***Па***).



$F = k \cdot x$, где x - предварительное поджатие пружины , $x=x_1-x_2$, а k - коэффициент жесткости, зависящий от материала пружины, ее размера и способа изготовления.

СИЛА ДАВЛЕНИЯ СТОЛБА ЖИДКОСТИ

***Сила давления - мера взаимодействия между жидкостью и стенкой*.**

Итак: в открытом резервуаре соприкасающиеся с жидкостью поверхности находятся под воздействием только весового давления (давления столба жидкости).

Сила давления столба жидкости - это вектор. Сила давления характеризуется величиной (модулем), направлением и точкой приложения.

Направление силы всегда перпендикулярно площади стенки.

Величина силы равна произведению площади стенки на давление в центре тяжести этой площади.

$$F = p_C \cdot s = \rho \cdot g \cdot h_C \cdot s ,$$

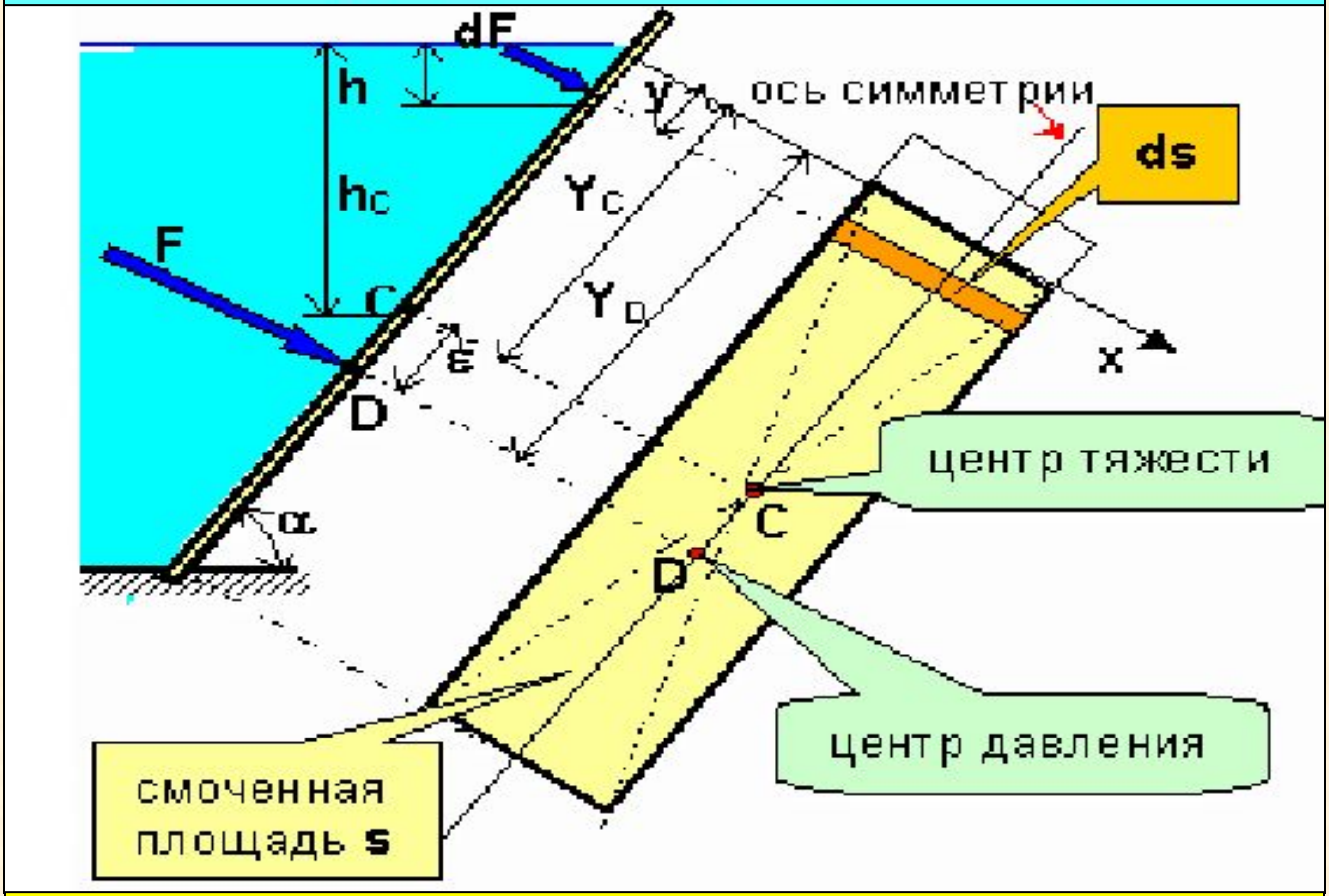
где h_c – глубина погружения в жидкость центра тяжести площади стенки s.

На площадку ds действует со стороны жидкости сила $dF = p \cdot s = \rho \cdot g \cdot h \cdot ds$.

На всю площадь s будет действовать множество параллельных сил dF (увеличивающихся с глубиной из-за роста h).

Результирующая сила F представляет собой алгебраическую сумму составляющих сил *dF*, то есть интеграл:

$$F = \int dF = \int \rho \cdot g \cdot h \cdot ds = \rho \cdot g \cdot Sin\alpha \cdot \int y \cdot ds.$$



где *y* - расстояние от любой площадки до поверхности жидкости, отсчитываемое в плоскости стенки. Произведение *yds* есть статический момент площади *ds* относительно оси *x* (ось x - линия пересечения поверхности жидкости с плоскостью стенки - линия уреза жидкости). Сумма таких произведений (интеграл) для всех площадок равна статическому моменту всей площади относительно оси *x*:

$$\int y \cdot ds = y_C \cdot s.$$

где y_c - расстояние до центра тяжести площади s, отсчитываемое в плоскости стенки.

Окончательно получим:

$$F = \rho \cdot g \, Sin\alpha \cdot y_C \cdot s = \rho \cdot g \cdot h_C \cdot s.$$

Замечая, что $\rho \cdot g \cdot h_c$ есть давление в центре тяжести стенки (в точке С), окончательно получим: $F = p_c \cdot s$.

Определение точки приложения силы давления (центра давления)

Сила *F* пересекает площадь стенки в точке D, которая называется центр давления. Положение точки на плоскости определяется двумя координатами. Для симметричных стенок точка D должна лежать на оси симметрии.

Теорема Вариньона ***Момент равнодействующей силы относительно произвольной точки (оси) равен сумме моментов составляющих сил относительно этой точки (оси).***

применим теорему Вариньона относительно оси *x*.

Здесь *F* - результирующая сила, её плечо равно y_D, *dF* - составляющие силы, плечо равно *y*.

$$F \cdot y_D = \int dF \cdot y = \int \rho g h \cdot y \cdot ds = \rho \cdot g \cdot Sin\alpha \int y^2 ds = \rho \cdot g \cdot Sin\alpha \cdot I_x.$$

$$I_X = \int y^2 ds$$

момент инерции площади s относительно оси х.

Подставляя выражение для силы *F* и представляя момент инерции относительно оси *x* как сумму момента инерции относительно центральной оси и произведения площади на квадрат расстояния между осями

$$I_x = I_c + y_{C^2} \cdot s$$

получим:

$$y_D = \frac{\rho \cdot g \cdot Sin\alpha \cdot I_x}{F} = \frac{\rho \cdot g \cdot Sin\alpha \cdot (I_C + s \cdot l_C^2)}{\rho \cdot g \cdot h_C \cdot s} = l_C + \frac{I_C}{s \cdot y_C}$$

Расстояние от центра тяжести до точки приложения силы

$$\varepsilon = y_D - y_C$$

определяется так.

$$\varepsilon = \frac{I_C}{s \cdot y_C}.$$

где I_c - момент инерции площади стенки относительно горизонтальной центральной оси. Это справочная величина, например для круга

$$I_C = \pi d^4/64.$$

Очень важно!

При определении величины силы в формулу подставляется давление в центре тяжести (в точке C), а сама сила приложена в центре давления (в точке D).

$$F \neq p_D \cdot s!$$

Здесь должно быть давление p_C в центре тяжести (в точке C)

$$F = p_C \cdot s.$$

Распространенная студенческая ошибка: $F = p_D \cdot s$ **.**
Кажется, с точки зрения "здравого смысла", что нужно подставлять в эту формулу давление в той же точке, где приложена сила. Это неверно.

Правильно!

$$F = p_C \cdot s.$$

Гидравлика делится на два раздела: гидростатика и гидродинамика. Гидродинамика является более обширным разделом и будет рассмотрена в последующих лекциях. В этой лекции будет рассмотрена гидростатика.

Гидростатикой **называется раздел гидравлики, в котором рассматриваются законы равновесия жидкости и их практическое применение.**

В покоящейся жидкости всегда присутствует сила давления, которая называется *гидростатическим давлением*. Жидкость оказывает силовое воздействие на дно и стенки сосуда. Частицы жидкости, расположенные в верхних слоях водоема, испытывают меньшие силы сжатия, чем частицы жидкости, находящиеся у дна.

Рассмотрим резервуар с плоскими вертикальными стенками, наполненный жидкостью (рис.2.1, а). На дно резервуара действует сила P равная весу налитой жидкости $G = \gamma V$, т.е. $P = G$.

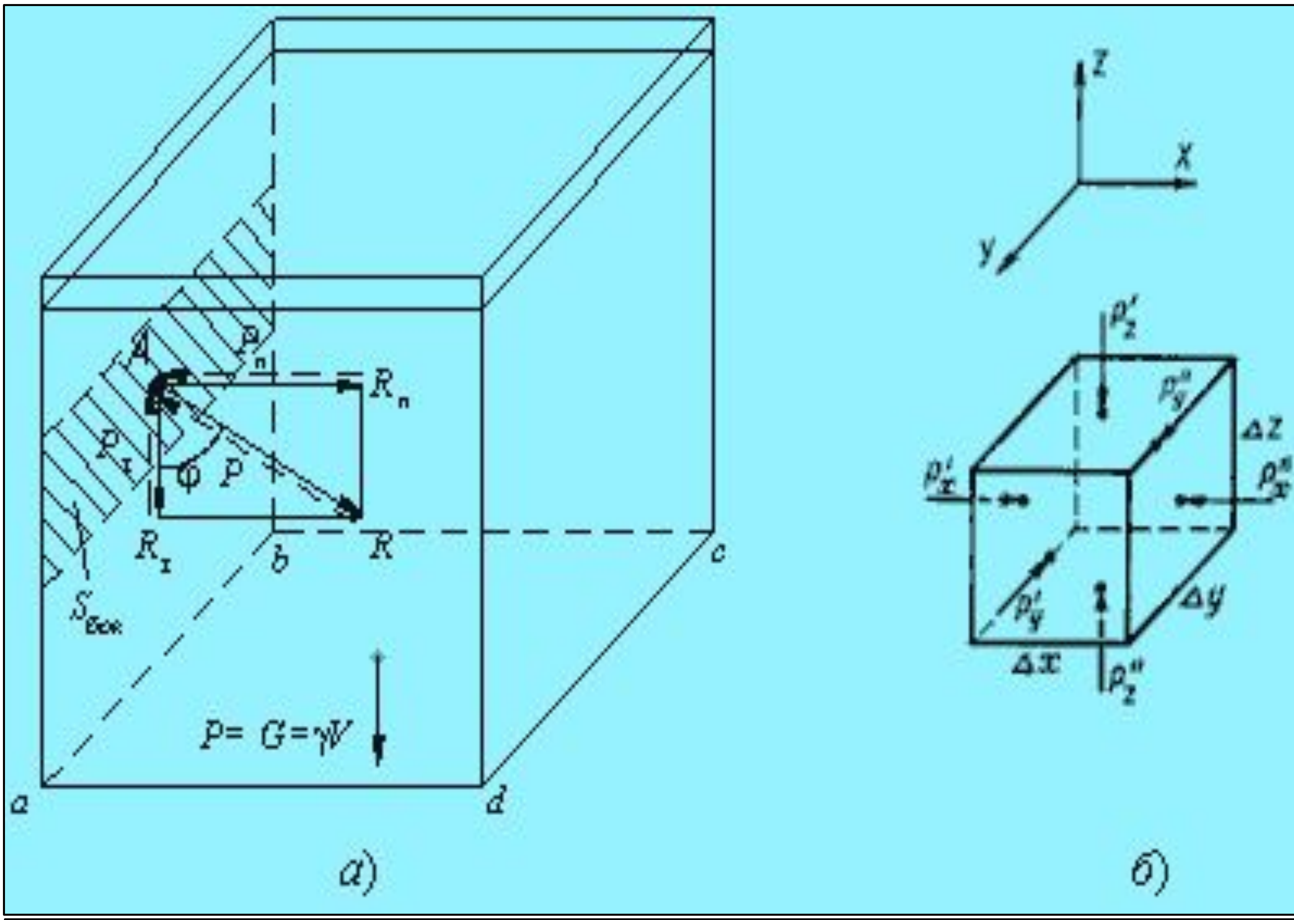


Рис. 2.1. Схема, иллюстрирующая свойства гидростатического давления
а - первое свойство; б - второе свойство

Если эту силу *P* разделить на площадь дна S_{abcd}, то мы получим *среднее гидростатическое давление*, действующее на дно резервуара.

$$P_{ср} = \frac{P}{S_{abcd}}$$

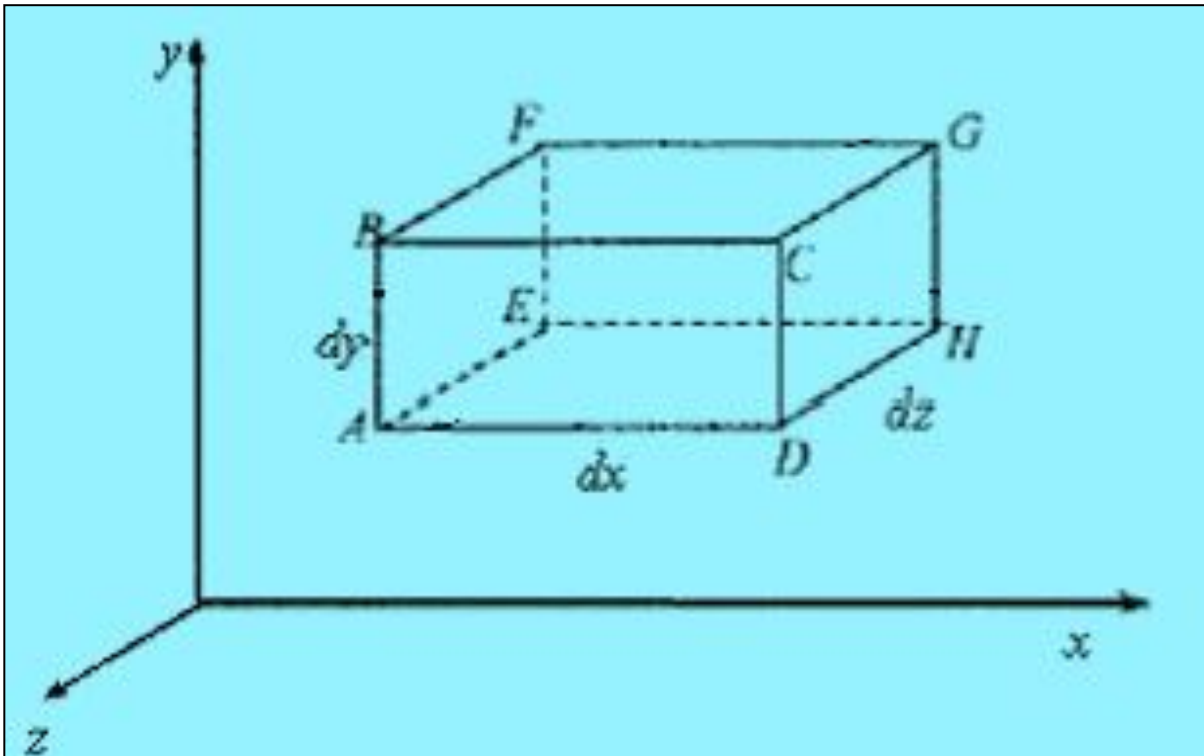


Рис. 2.2. Выделение элементарного объема

В покоящейся жидкости выделим элементарный объем в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 2.1). На выделенный объем, в общем случае, действуют внешние массовые (гравитационные или инерционные) и поверхностные силы.

$$\vec{P}_x(x) = \vec{p}_x dydz\,;\ \vec{P}_x(x+dx) = \left(\vec{p}_x + \frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x}dx\right)dydz\,. \qquad (2.1)$$

$$\vec{P}_x = \frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} dxdydz .$$

$$\vec{P}_y = \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} dxdydz ;$$

$$\vec{P}_z = \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} dxdydz .$$

$$\vec{R} = \vec{i} R_x + \vec{j} R_y + \vec{k} R_z$$

Чтобы жидкость находилась в покое необходимо, чтобы все действующие на выделенный объем жидкости силы компенсировали друг друга:

$$R_x = \frac{\partial p_x}{\partial x} dxdydz;$$

$$R_y = \frac{\partial p_y}{\partial y} dxdydz;$$

$$R_z = \frac{\partial p_z}{\partial z} dxdydz.$$

Если проекции массовой силы записать в виде

$$R_x = Xdxdydz$$

$$R_y = Ydxdydz$$

$$R_z = Zdxdydz$$

Тогда уравнения (2.1) будут иметь вид

$$X = \frac{\partial p_x}{\partial x}; \; Y = \frac{\partial p_y}{\partial y}; \; Z = \frac{\partial p_z}{\partial z}$$

Уравнения представляют собой *уравнения равновесия* сплошной среды. При отсутствии массовых сил ($X = 0$; $Y = 0$; $Z = 0$) выражения примут вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0; \ \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \ \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

Выражения представляют собой математическую запись *закона Паскаля*, который гласит, что *при отсутствии массовых сил давление жидкости или газа остается постоянным во всех точках анализируемой области*.

Гидростатический закон. Гидростатическое давление

Рассмотрим случай массовой силы представляющей собой силу тяжести и направим ось *x* по нормали к поверхности Земли, противоположно этой силе, тогда

$$X = -\rho g; \ Y = 0; \ Z = 0$$

Тогда уравнение равновесия будет иметь вид

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho g \, .$$

Интегрируя это выражение, получаем

$$p - p_0 = -\rho g\left(x - x_0\right)$$

где p_0 – давление жидкости в сечении $x = x_0$.

Если за исходное сечение принять поверхность уровня жидкости ($x_0 = 0$), а за $h = x - x_0$ – высоту столба жидкости, то получим выражение, представляющее собой *гидростатический закон*:

$$p = p_0 + \rho g h$$

Гидростатическим давлением называют давление, которое оказывает жидкость на некоторую опору или поверхность, выделенную в толще жидкости.

Выделяют следующие свойства гидростатического давления:

1. ***Гидростатическое давление направлено всегда по внутренней нормали к площадке, на которую давление действует*****;**

2. ***Гидростатическое давление в любой точке жидкости*** **(*****на одной высоте*****)** ***по всем направлениям одинаково*****.**

Следует отметить, что выражение имеет место не только в поле силы тяжести, но и любой другой внешней массовой силы, имеющей потенциал *U*. Таким образом, все рассмотренные выражения преобразуются в выражения вида

$$X = \frac{\partial U}{\partial x};\ Y = \frac{\partial U}{\partial y};\ Z = \frac{\partial U}{\partial z}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x};\ \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y};\ \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z}$$

После интегрирования получаем

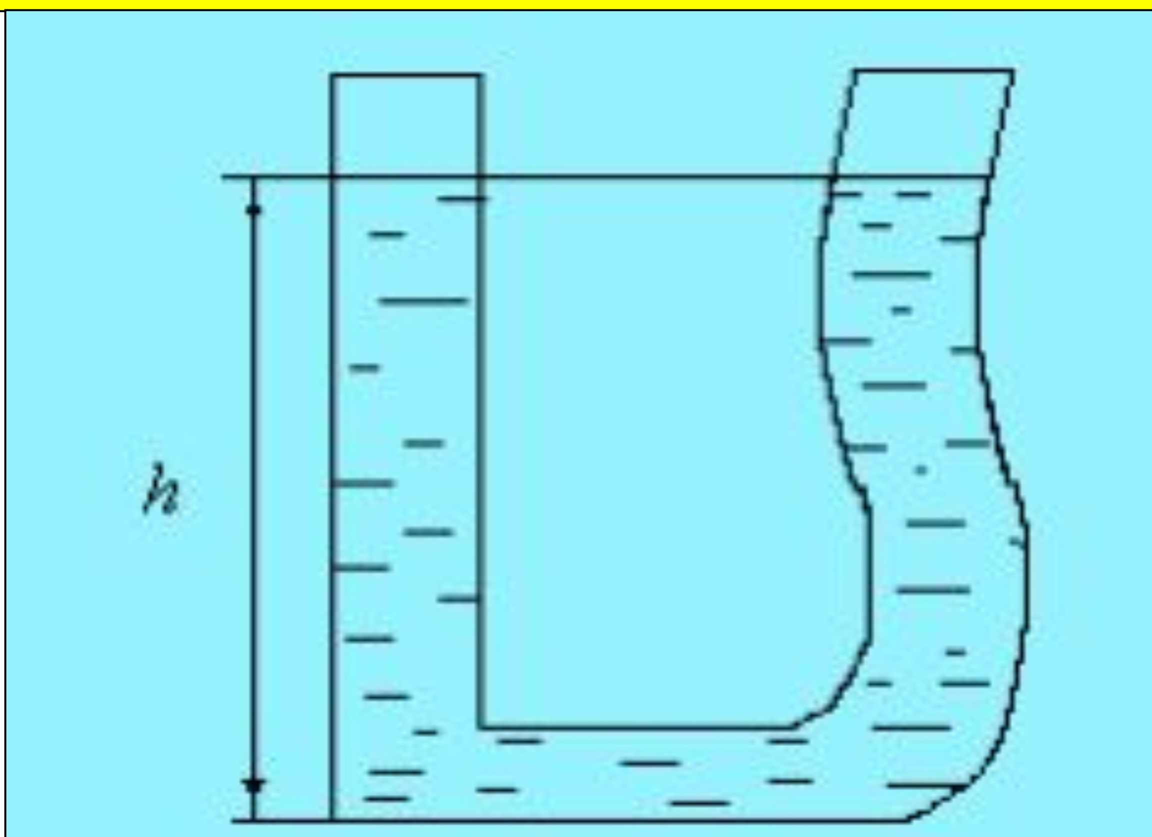
$$U - U_0 = p - p_0$$

$$p - U = const$$

Условия равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах

Сообщающимися сосудами **называют сосуды, соединенные друг с другом таким образом, чтобы жидкость свободно перетекала из одного сосуда в другой.**

Закон сообщающихся сосудов **гласит:** ***в открытых сообщающихся сосудах при равновесии жидкости давление на любом горизонтальной уровне одинаково.***



Сообщающиеся сосуды с одинаковой жидкостью

Если заполнить открытые сообщающиеся сосуды двумя несмешивающимися жидкостями, имеющими плотности ρ_1 и ρ_2, например, ртутью и водой (рис. 2.3), то жидкость также распределится таким образом, чтобы давления этих жидкостей на любом горизонтальной уровне в обоих сосудах было одинаково. Выберем горизонтальный уровень жидкости *AB*, ниже которого жидкость однородна (рис. 2.3). Тогда $p_1 = p_2$.

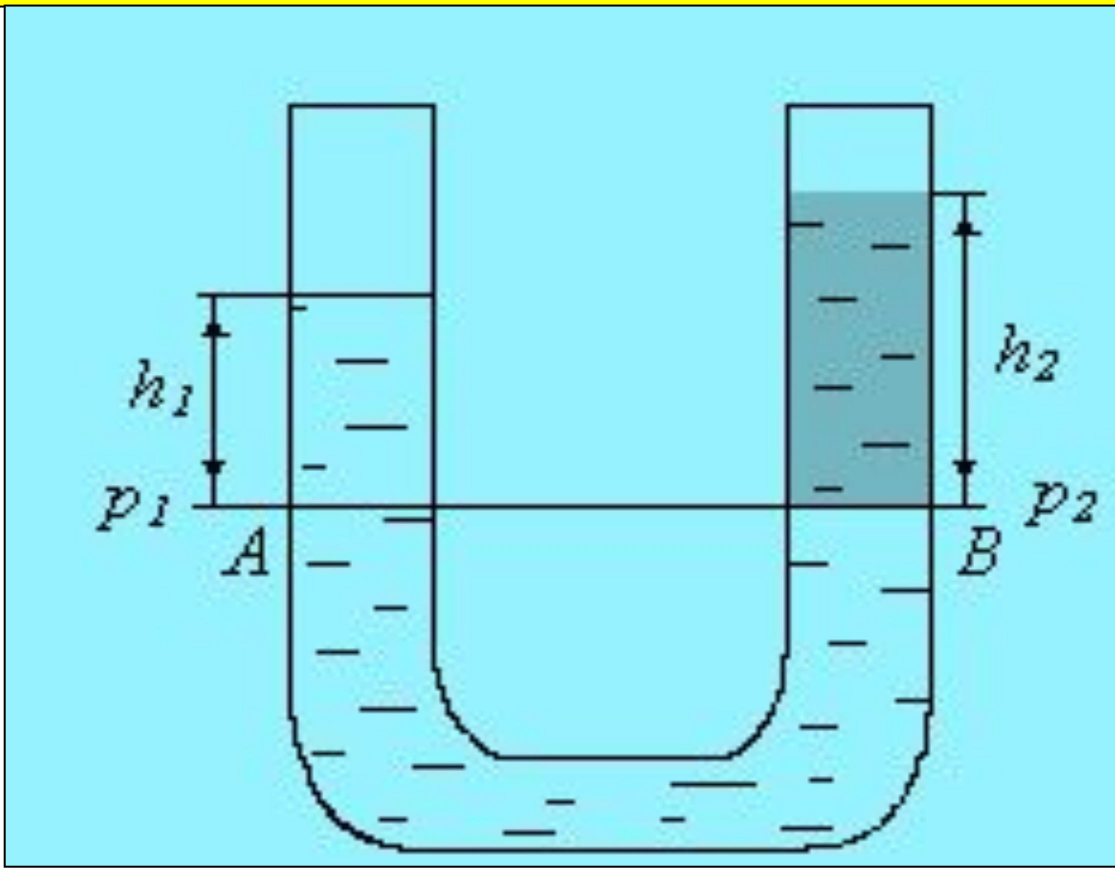


Рис. 2.3. Сообщающиеся сосуды с двумя несмешивающимися жидкостями

$$p_1 = p_{атм} + \rho_1 g h_1$$

$$p_2 = p_{атм} + \rho_2 g h_2$$

Откуда следует, что

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

Уравнение представляет собой *условие равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах*.
На законе сообщающихся сосудов основано действие шлюзов, фонтанов и других устройств.

Простейшие гидравлические машины

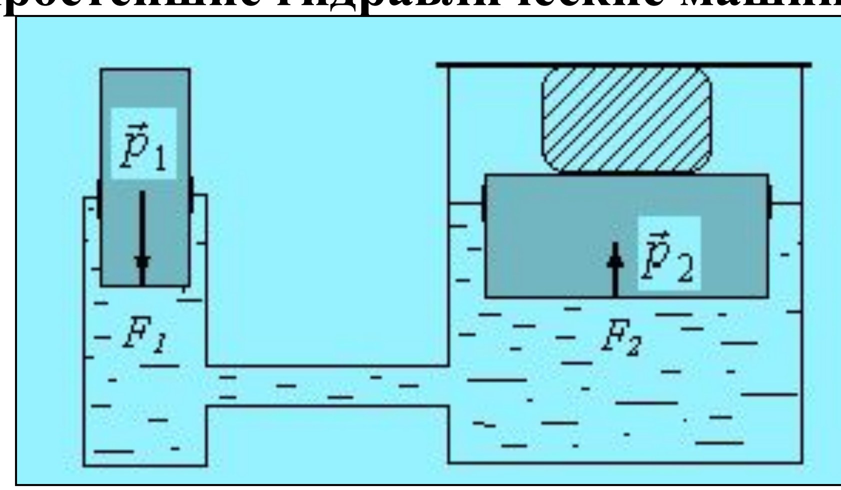


Рис. 2.4. Схема гидравлического пресса

$$p_1 F_1 = p_2 F_2$$

$$p_2 = p_1 \frac{F_1}{F_2}$$

Основные методы и приборы измерения давления

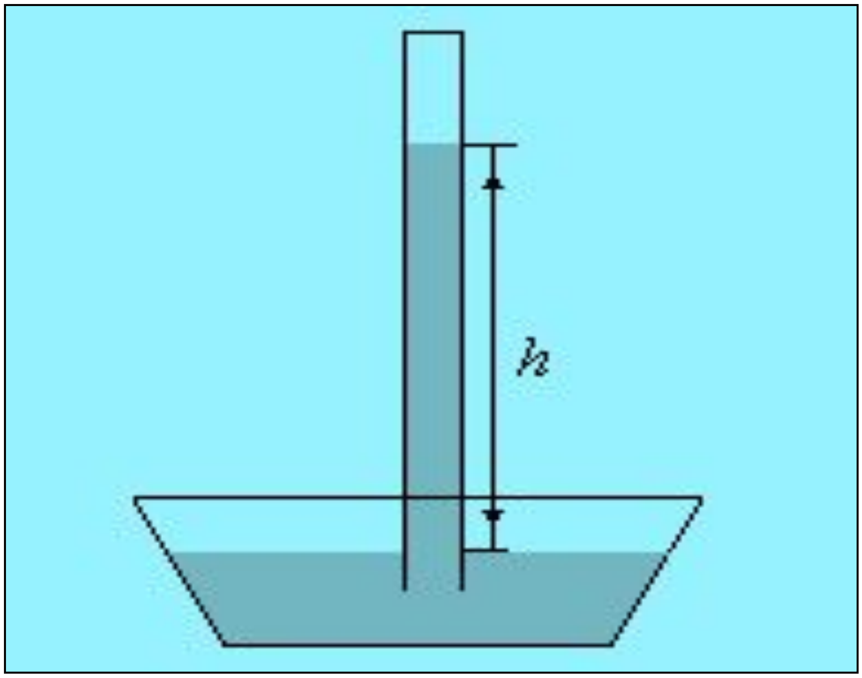


Рис. 2.5. Принцип действия жидкостного барометра

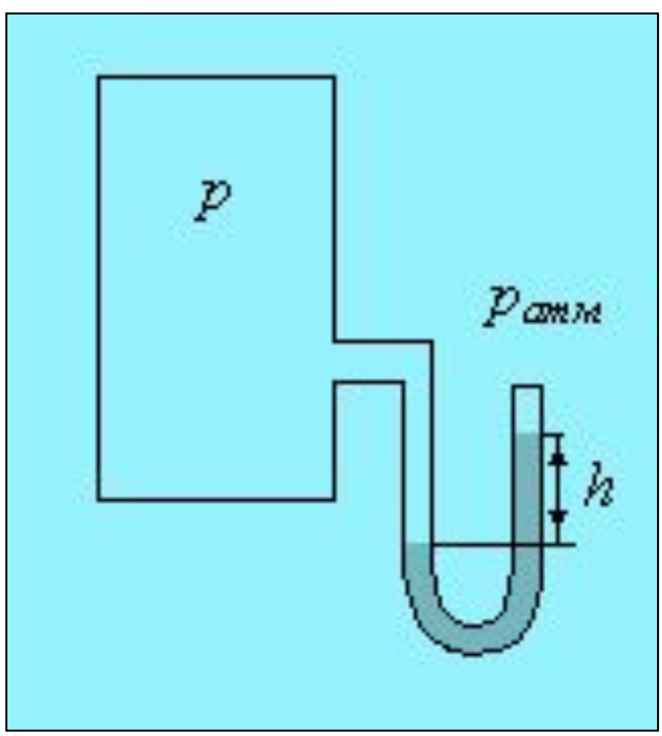


Рис. 2.6. Принцип действия жидкостного манометра

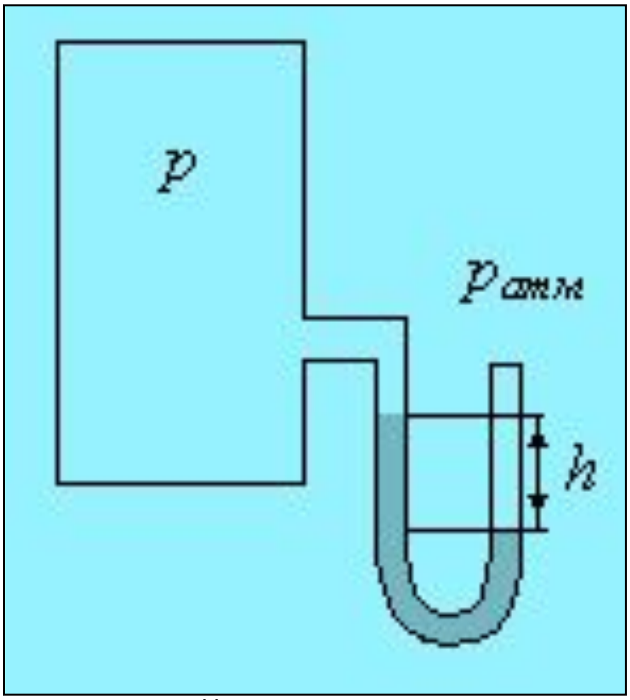


Рис. 2.7. Принцип действия жидкостного вакуумметра

$$p = p_{атм} + p_{м};$$

$$p_{м} = \rho g h,$$

$$p = p_{атм} - p_{в};$$

$$p_{в} = \rho g h,$$

Закон Архимеда

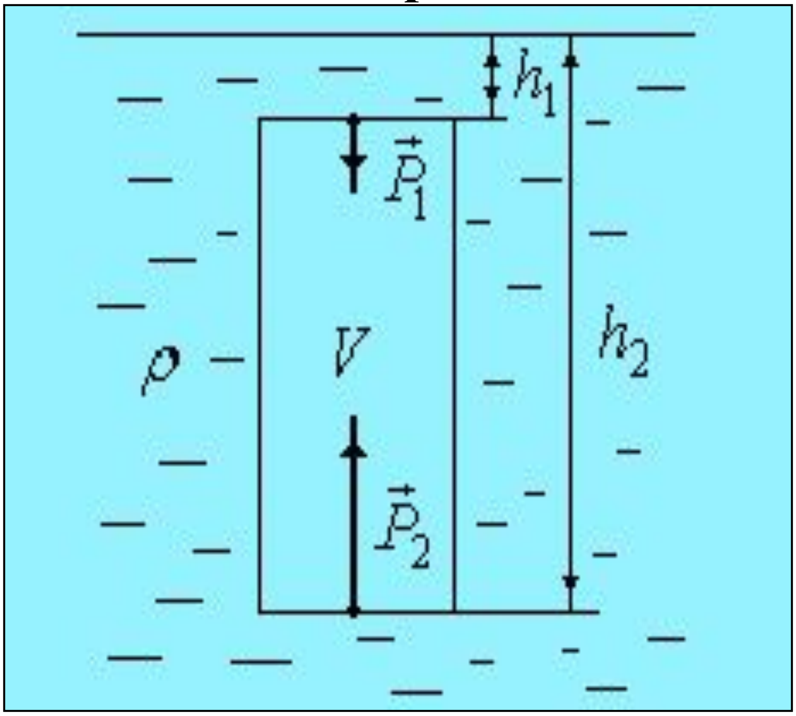


Рис. 2.8. Тело, погруженное в жидкость

$$P = P_2 - P_1;$$
$$P_1 = p_1 F;\ P_2 = p_2 F,$$

Силы давления можно представить в виде

$$P_1 = \rho g h_1 F;\ P_2 = \rho g h_2 F$$

Таким образом, результирующая сила

$$P = \rho g F(h_2 - h_1) = \rho g V.$$

Закон Архимеда **гласит:** ***на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила Р, направленная вертикально вверх и численно равная весу вытесненной жидкости.***

Равновесие и устойчивость тел, погруженных в жидкость.

Равновесие тела, плавающего на поверхности жидкости

Точка, к которой приложена сила Архимеда называется *центром давления*.
Внешняя массовая сила приложена к *центру масс* рассматриваемого тела.

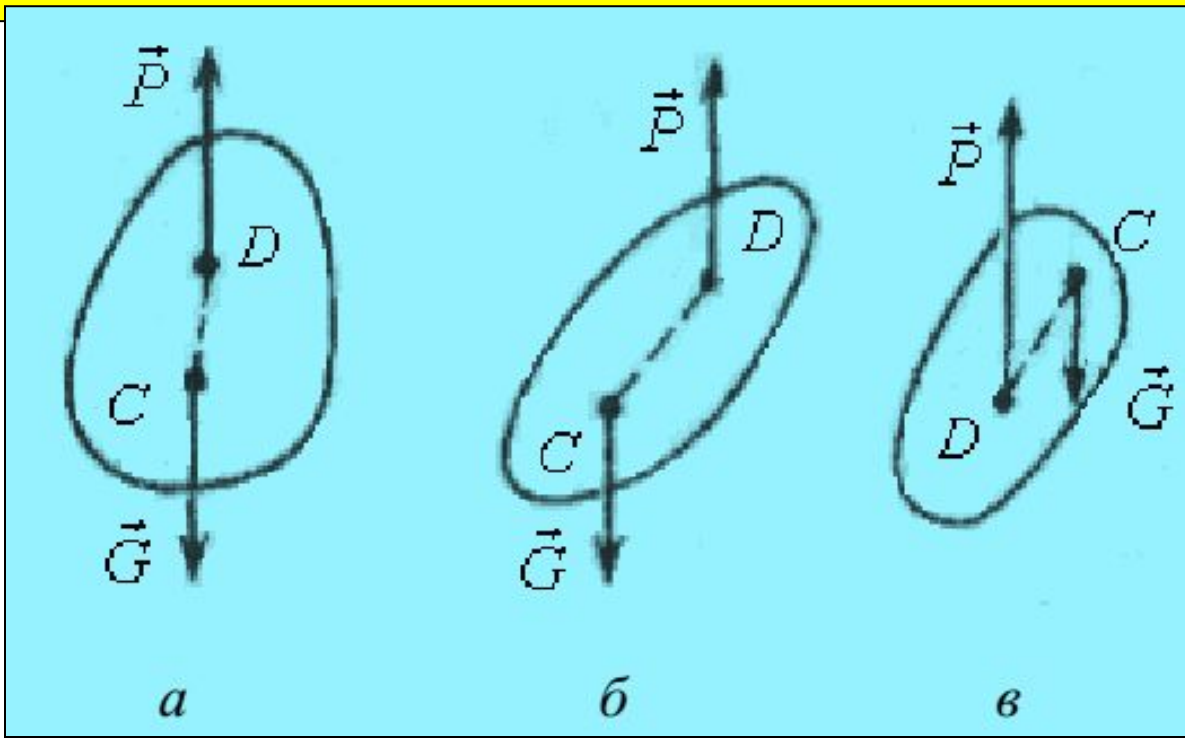


Рис. 2.9. Равновесие тела, погруженного в жидкость

Силы *P* и *G* , направленные вдоль одной прямой, но в разные стороны (рис. 2.9, а).

Если *G* > *P* , очевидно, что тело будет двигаться вниз и опуститься на дно.
Если *G* < *P* , то тело будет двигаться вверх и всплывет на поверхность.
Если *G* = *P* , то тело находится в равновесии в толще жидкости.

При условии, что центр давления *D* полностью погруженного в жидкость и находящегося в равновесии тела располагается выше центра масс *C*, то равновесие является *устойчивым* (рис. 2.9, б). В этом случае, если вывести тело
из равновесия, то пара сил *P* и *G* создадут момент, возвращающее тело в исходное положение.

Если центр давления располагается ниже центра масс (рис. 2.9, в), то равновесие является *неустойчивым* и при небольшом отклонении тела от положения равновесия, возникающая пара сил создает *опрокидывающий момент*, способствующий большему отклонению тела от положения равновесия.

Рассмотрим равновесие тела, плавающего на поверхности жидкости (рис. 2.10).

Линия пересечения поверхности тела плоскостью уровня жидкости называется *ватерлинией*, а плоскость, в которой расположена ватерлиния –
***плоскостью плавания*.**
Нормаль к плоскости плавания, проходящая через центр масс *C* и центр давления *D* называется *осью плавания*.

Необходимым условием равновесия плавающего на поверхности жидкости тела является равенство веса тела архимедовой силе (*G = P*).

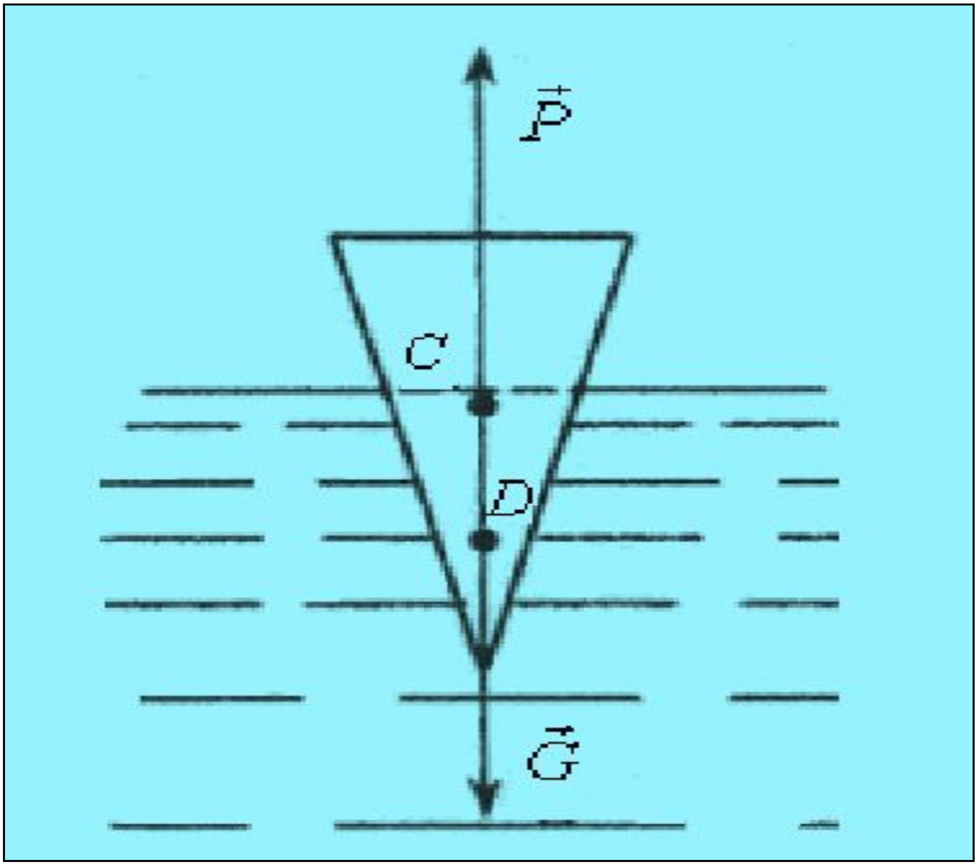


Рис. 2.10. Равновесие тела, плавающего на поверхности жидкости

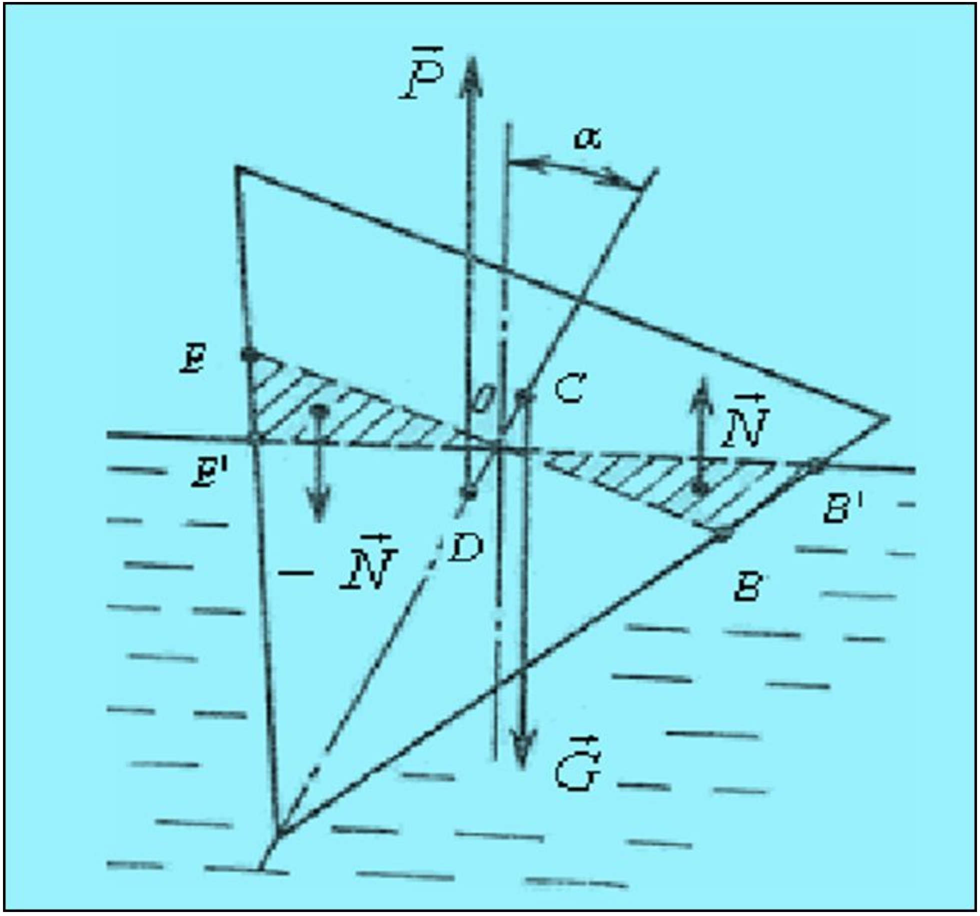


Рис. 2.11. Равновесие наклоненного плавающего на поверхности жидкости тела

Для определения условий устойчивого равновесия рассмотрим тело (рис. 2.11), отклонившееся от положения равновесия на угол α. В этом случае на затопленную часть тела *BOB* действует дополнительная архимедова сила *N* , а на осушенную часть – равная по величине силе *N*, но противоположно направленная ей сила веса этой части.

В результате на выведенное из положения равновесия тело будут действовать две пары сил (*P* , *G*), создающая *опрокидывающий момент*, и пара сил (*N*, *N*−), создающая *восстанавливающий момент*.

Точка *M* называется *метацентром*, а отрезок *CM* – *метацентрической высотой*.

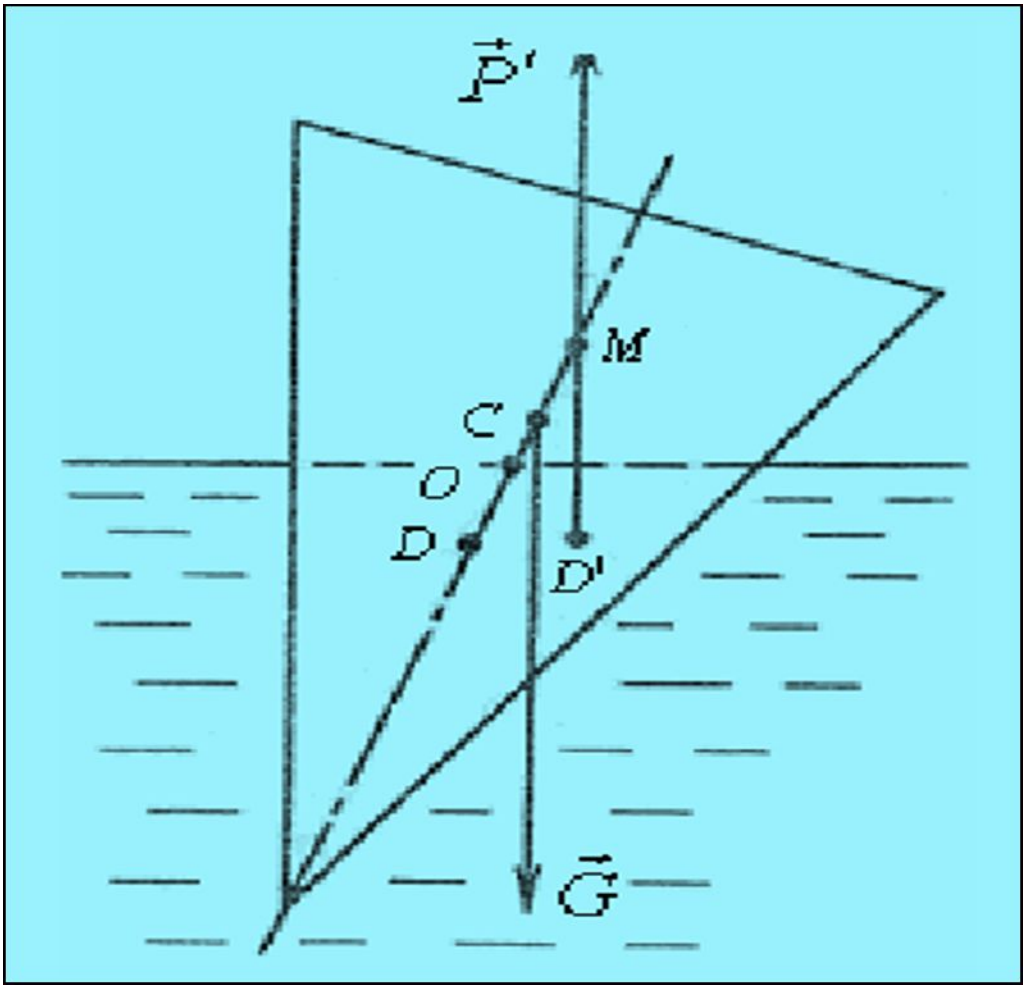


Рис. 2.12. Метацентр и метацентрическая высота плавающего тела

Равновесие земной атмосферы

Считая воздух идеальным газом и воспользовавшись уравнением состояния идеального газа в виде

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R}\frac{dx}{T}$$

уравнение равновесия можно представить как

$$ln\frac{p}{p_0} = -\frac{g}{RT}\left(h - h_0\right)$$

$$p = p_0\, exp\left[-\frac{g}{RT}\left(h - h_0\right)\right]$$

$$\frac{dp}{p^{\frac{1}{k}}} = -gdx$$

$$p = \left[p_0^{\frac{k-1}{k}} - g\frac{k-1}{k}\left(h - h_0\right)\right]^{\frac{k}{k-1}}$$

Живым сечением ω (м²) называют площадь поперечного сечения потока, перпендикулярную к направлению течения. Например, живое сечение трубы - круг (рис.3.1, а); живое сечение клапана - кольцо с изменяющимся внутренним диаметром (рис.3.1, б).

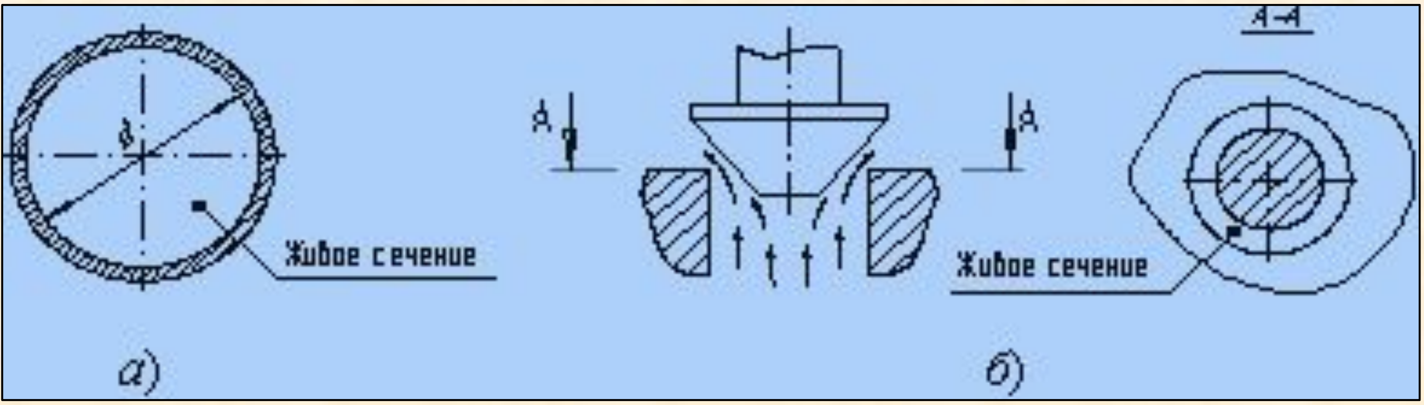


Рис. 3.1. Живые сечения: а - трубы, б - клапана

Смоченный периметр **χ ("хи") - часть периметра живого сечения, ограниченное твердыми стенками (рис.3.2, выделен утолщенной линией).**

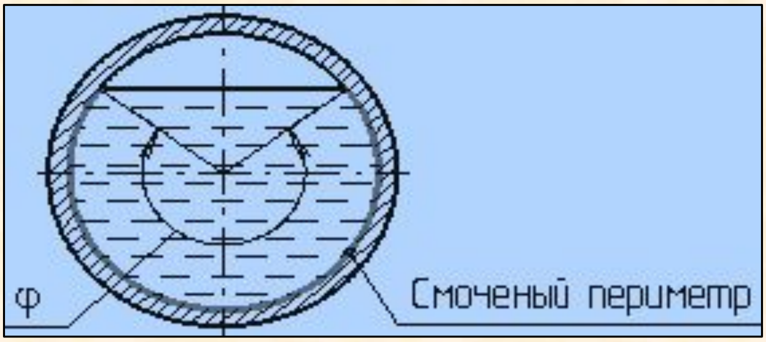


Рис. 3.2. Смоченный периметр

Для круглой трубы

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{D\varphi}{2}$$

$$\chi = \pi D \frac{\varphi}{360^\circ}, \text{ если угол } \varphi \text{ в градусах.}$$

Расход потока *Q* - объем жидкости *V*, протекающей за единицу времени *t* через живое сечение ω.

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (\text{м}^3/\text{с}, \text{ литр/мин})$$

Средняя скорость потока υ - скорость движения жидкости, определяющаяся отношением расхода жидкости $Q_к$ площади живого сечения ω

$$\upsilon_{ср} = \frac{Q}{\omega},\ (м/с)$$

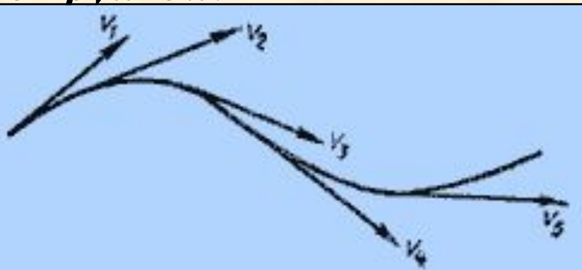
Гидравлический радиус потока ***R*** - отношение живого сечения к смоченному периметру

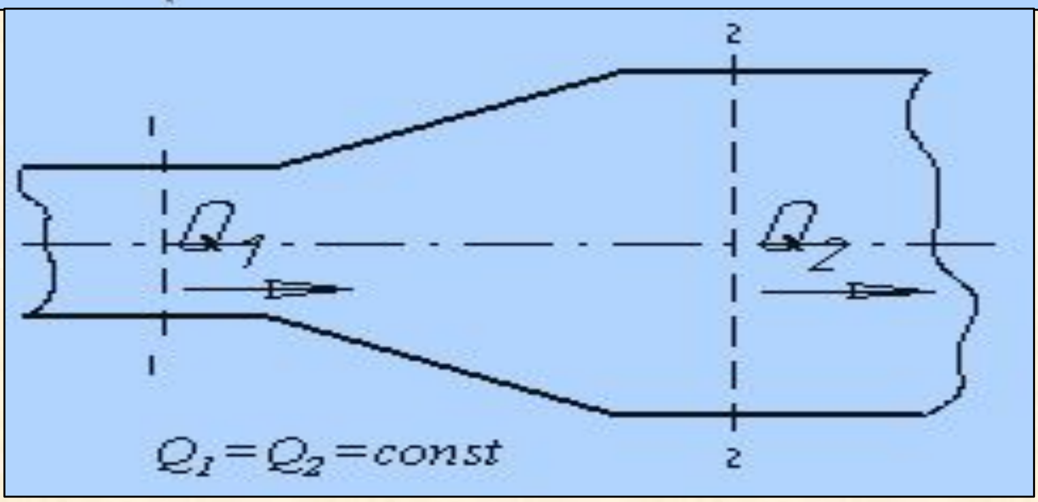
$$R = \frac{\omega}{\chi},\ (м)$$

$\upsilon = f(x, y, z)$ $\qquad$ $\upsilon = f_1(x, y, z, t)$

$P = \varphi\, f(x, y, z)$ $\qquad$ $P = \varphi\, f_1(x, y, z, t)$

Трубка тока - трубчатая поверхность, образуемая линиями тока с бесконечно малым поперечным сечением. Часть потока, заключенная внутри трубки тока называется ***элементарной струйкой***.





Энергия - запас работы, которую может совершить тело, изменяя свое состояние.

Работа - скалярное произведение силы на перемещение под действием этой силы. На практике величина работы используется для характеристики механизма или технического устройства.

Энергия - это невостребованная работа, **математическая абстракция**, **формула**, по которой **можно вычислить максимальную работу**. В реальных условиях функционирования конкретного механизма часть энергии теряется и переходит в тепло. ***Отношение полученной работы к затраченной энергии есть коэффициент полезного действия механизма.***

Механическая энергия разделяется на ***кинетическую и потенциальную*:**

$$E = E_K + E_{П.}$$

Кинетическая энергия - это форма энергии, связанная с механическим движением.

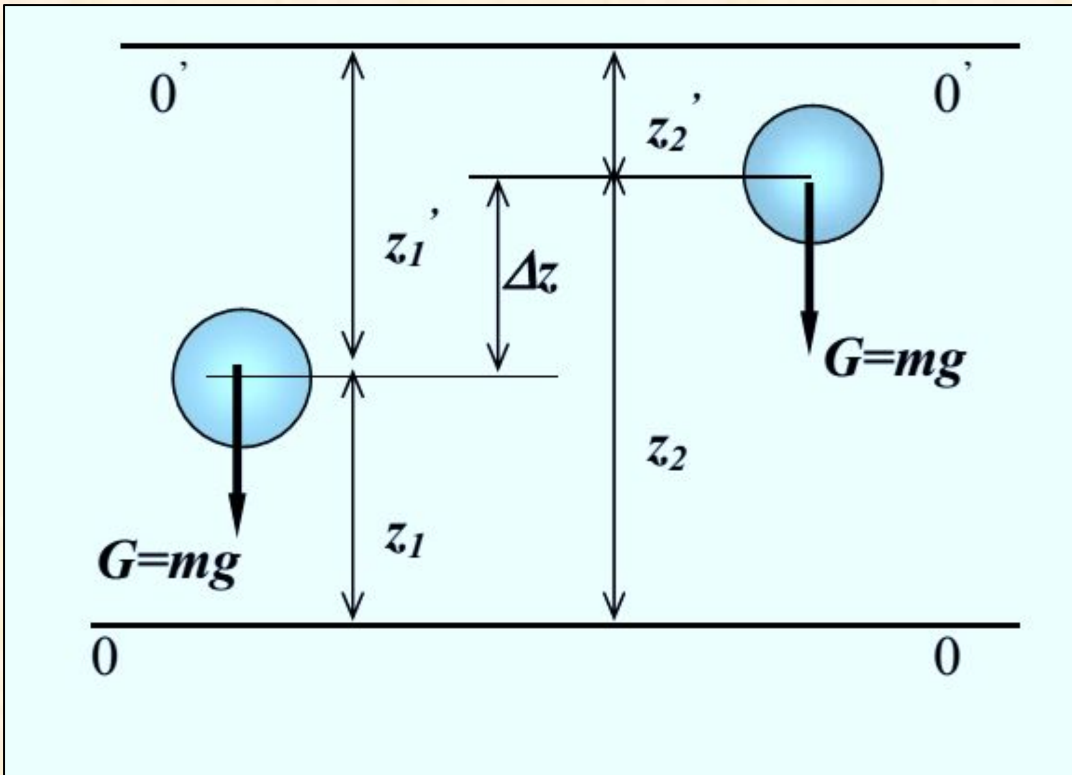
$$E_K = mu^2/2.$$

Потенциальными называют неподвижные формы энергии, которые потенциально можно превратить в энергию движения. К таким формам относят энергию, запасенную в деформированном теле или в результате смещения тел в некотором силовом поле (электрическом, магнитном или гравитационном). Потенциальная энергия жидкости или газа разделяется на два вида:

- **потенциальная энергия положения;**
- **потенциальная энергия давления**.

Потенциальная энергия положения

Твёрдое, жидкое или газообразное тело массой *m* занимают определённое положение в поле силы тяжести (Рис.2).



0-0, 0'-0' - плоскости отсчета $E_{полож.}$

Рис.2 Иллюстрация к выводу формулы потенциальной энергии положения

$$\Delta E_{полож} = m \cdot g \cdot z_2 - m \cdot g \cdot z_1 = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) = m \cdot g \cdot \Delta z \qquad \text{-плоскость отсчета } 0\text{-}0$$

$$\Delta E_{полож} = m \cdot g \cdot (-z_2') - m \cdot g \cdot (-z_1') = m \cdot g \cdot (z_1' - z_2') = m \cdot g \cdot \Delta z \qquad \text{-плоскость отсчета } 0'\text{-}0'$$

$\boldsymbol{A = G \cdot z = m \cdot g \cdot z}$ **-** работа силы тяжести;

$\boldsymbol{E_{полож.} = m \cdot g \cdot z}$ - потенциальная энергия положения, численно равна работе, которую совершает сила тяжести при падении тела с высоты z. Если тело **расположено выше** плоскости отсчета, высота z берется **со знаком (+),** если **ниже - со знаком (-).**

Итак, потенциальная энергия положения жидкости $E_{полож.}$ равна:

$$\boxed{E_{полож} = m \cdot g \cdot z.}$$

Потенциальная энергия давления

Другой вид потенциальной энергии связан с деформацией тел. Для твердого тела такой вид энергии запасается в сжатой пружине, для текучих тел (жидкостей и газов), такой вид энергии называется потенциальной энергией давления.

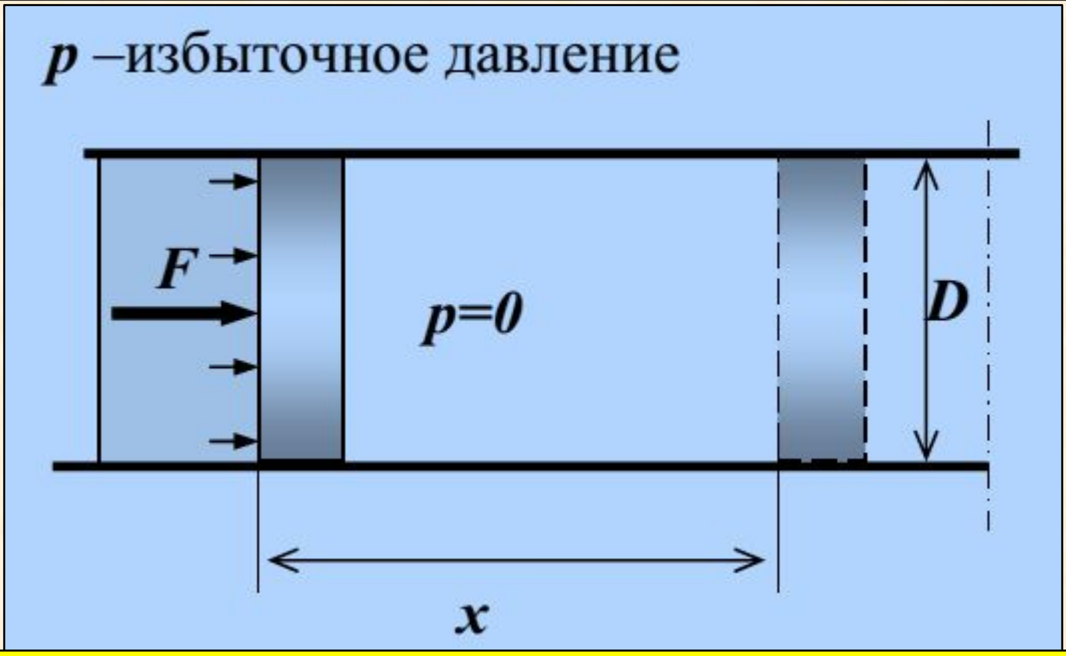


Рис. 3 Иллюстрация к выводу формулы потенциальной энергии давления

$F=p\cdot s$ - сила, действующая на поршень со стороны сжатой жидкости;

$s=\pi\cdot D^2/4$ - площадь сечения поршня; p - давление в жидкости;

$A=F\cdot x=p\cdot s\cdot x=p\cdot V=p\cdot m/\rho$ - работа по перемещению поршня, совершаемая за счет наличия в жидкости давления p.

V - изменение объёма жидкости в результате расширения при движении поршня.

Итак, потенциальная энергия давления жидкости $E_{давл}$ равна:

$$E_{давл}=p\cdot m/\rho$$

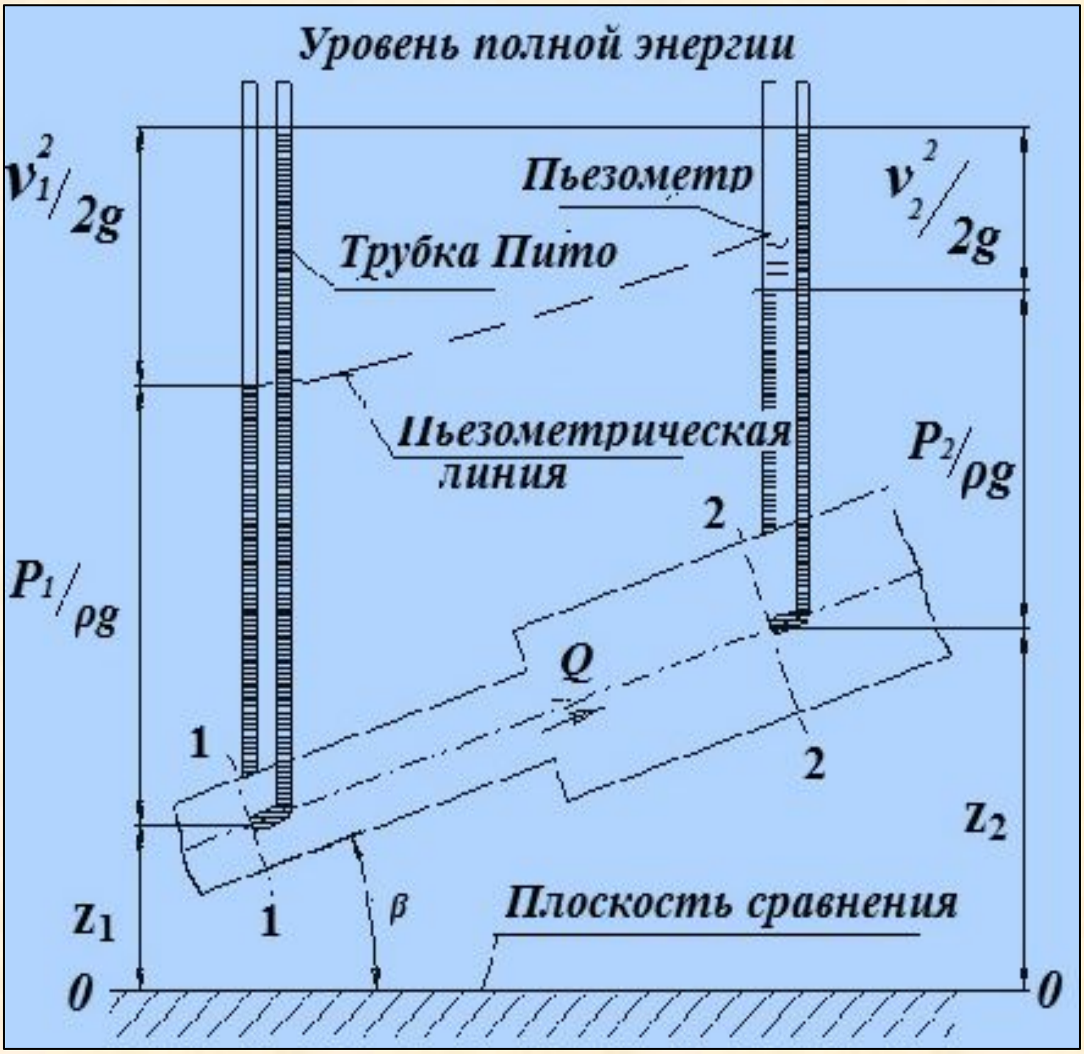


Рис.1. Схема к выводу уравнения Бернулли для идеальной жидкости

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ - фундаментальные физические соотношения, на основании которых выводятся частные законы. В современной науке известно более десяти законов сохранения, большинство из них относится к ядерной физике. При решении гидродинамических задач широко используются следующие:

- Закон сохранения массы.
- Закон сохранения энергии.

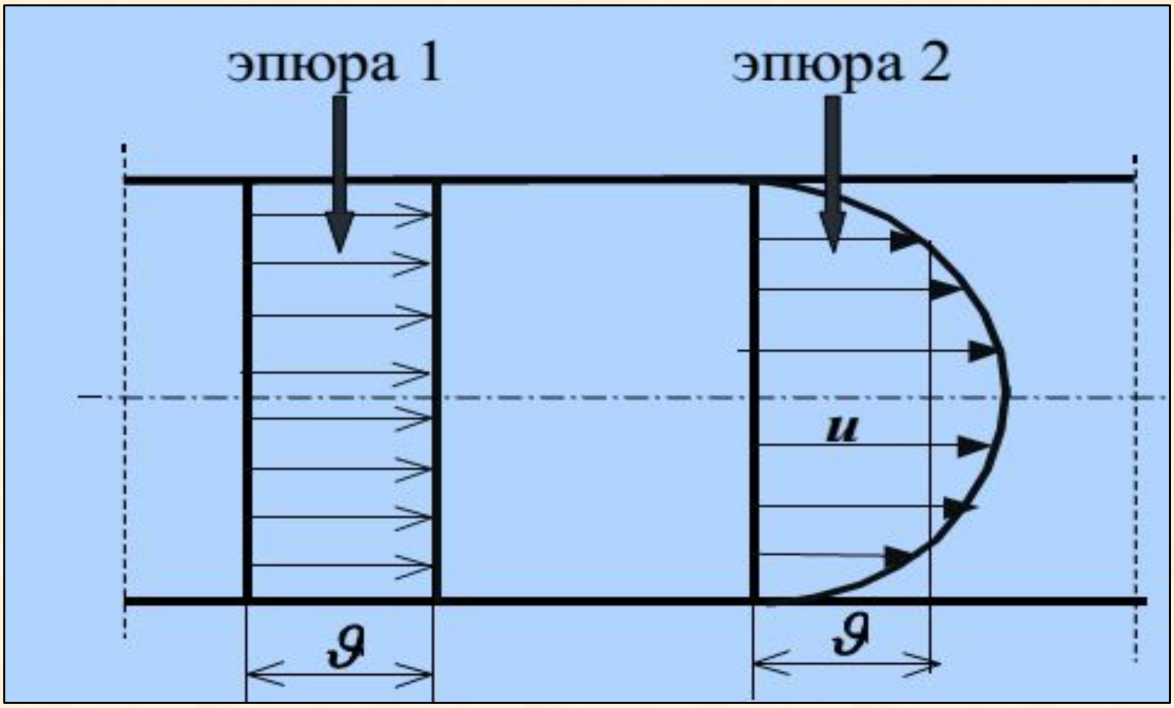
$$z_1+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{\upsilon_1^2}{2g}=z_2+\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\upsilon_2^2}{2g}=H=\text{const}$$

$$z+\frac{P}{\rho g}+\frac{\upsilon^2}{2g}=H=\text{const}$$

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$

$\frac{\upsilon_1^2}{2g}$ и $\frac{\upsilon_2^2}{2g}$

$$z_1+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{\upsilon_1^2}{2g}=z_2+\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\upsilon_2^2}{2g}=H=\text{const}$$



Потерянная энергия или потерянный напор обозначаются

$h_{пот}^{1-2}$ и имеют также линейную размерность.

Уравнение Бернулли для реальной жидкости будет иметь вид:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\upsilon_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\upsilon_2^2}{2g} + h_{пот}^{1-2} = H = \text{const}$$

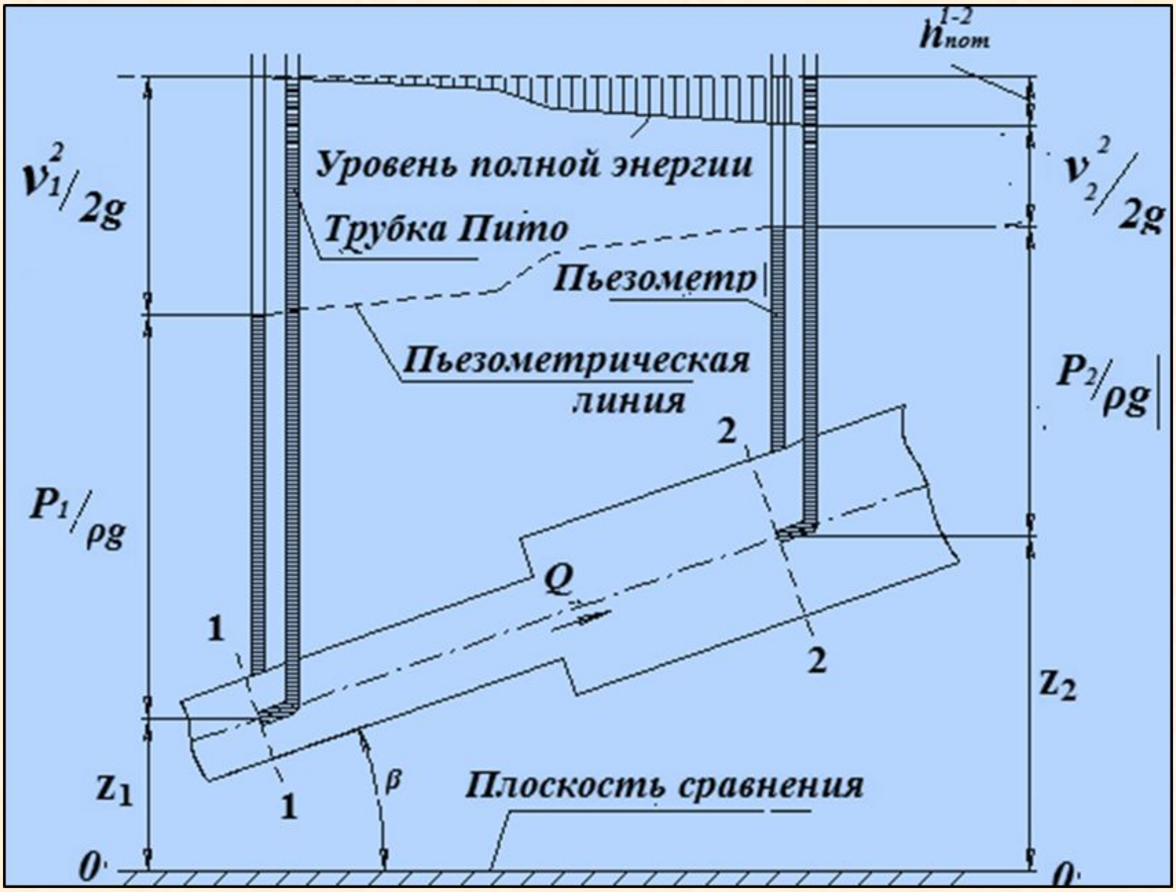


Рис.3.6. Схема к выводу уравнения Бернулли для реальной жидкости

$$\frac{P_{ат} + \gamma h}{\gamma} + \frac{\upsilon^2}{2g} = H + h + \frac{P_{ат}}{\gamma} \quad \text{или} \quad \upsilon = \sqrt{2gH}$$

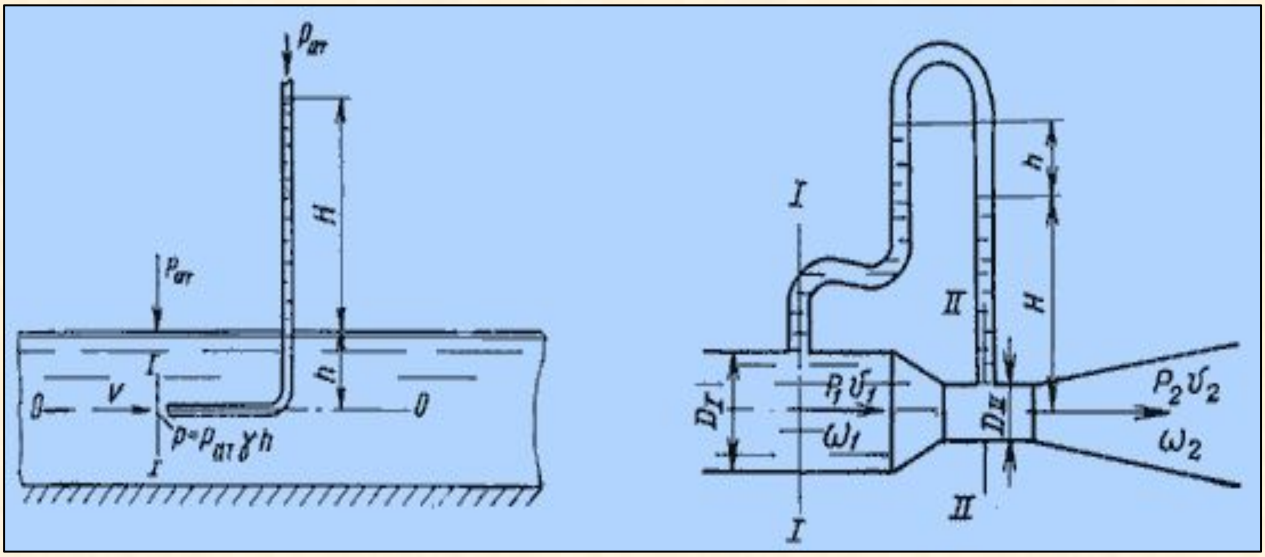
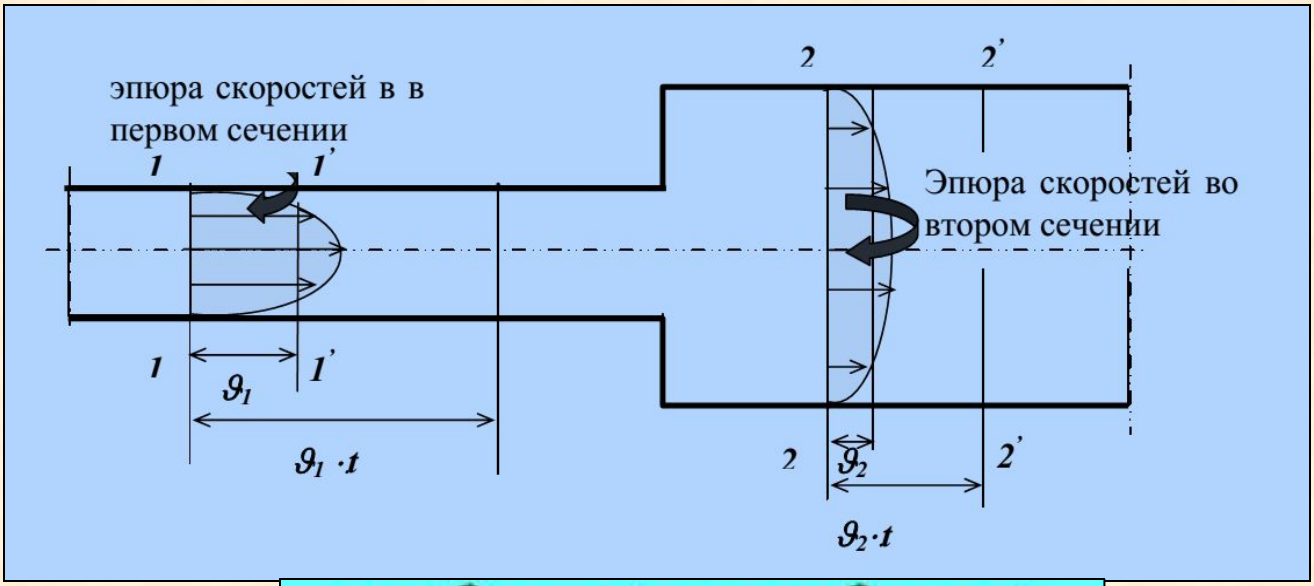


Рис. 3.7. Трубка Пито и расходомер Вентури

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МАССЫ



$$\rho_1 \cdot \vartheta_1 \cdot s_1 \cdot t = \rho_2 \cdot \vartheta_2 \cdot s_2 \cdot t.$$

Количество жидкости, проходящее через сечение за единицу времени, называется *расходом*.

$Q = \vartheta \cdot s$	- объемный расход
$Q_m = \rho \cdot \vartheta \cdot s = \rho \cdot Q = m/t$	- массовый расход
$Q_G = \rho \cdot g \cdot \vartheta \cdot s = \rho \cdot g \cdot Q = G/t$	- весовой расход

$$\Delta p = - E \cdot \varepsilon$$

Закон Гука

$$\vartheta_1 \cdot s_1 = \vartheta_2 \cdot s_2 = \ldots\ldots = Q = const.$$

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ МАССЫ И ЭНЕРГИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗА

При движении газа (расчет газопроводов) нужно учитывать, что плотность газа зависит от давления и температуры:

$$\rho = p/RT.$$

При движении газа в сечениях потока **сохраняется массовый расход**!

$$Q_m = \rho_1 \cdot \vartheta_1 \cdot s_1 = \rho_2 \cdot \vartheta_2 \cdot s_2 = \ldots\ldots = \rho_i \cdot \vartheta_i \cdot s_i = \text{const}$$

Как известно, капельная жидкость в сечении обладает *потенциальной и кинетической энергией.* Газы обладают *потенциальной, кинетической и внутренней энергией.* Внутренняя энергия газа зависит от температуры.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho_1 \cdot g} + \frac{1}{n-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1 \cdot g} + \frac{\alpha_1 \vartheta_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho_2 \cdot g} + \frac{1}{n-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_2 \cdot g} + \frac{\alpha_2 \vartheta_2^2}{2g} + h_{1-2}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИЛИ ДАВЛЕНИЯ

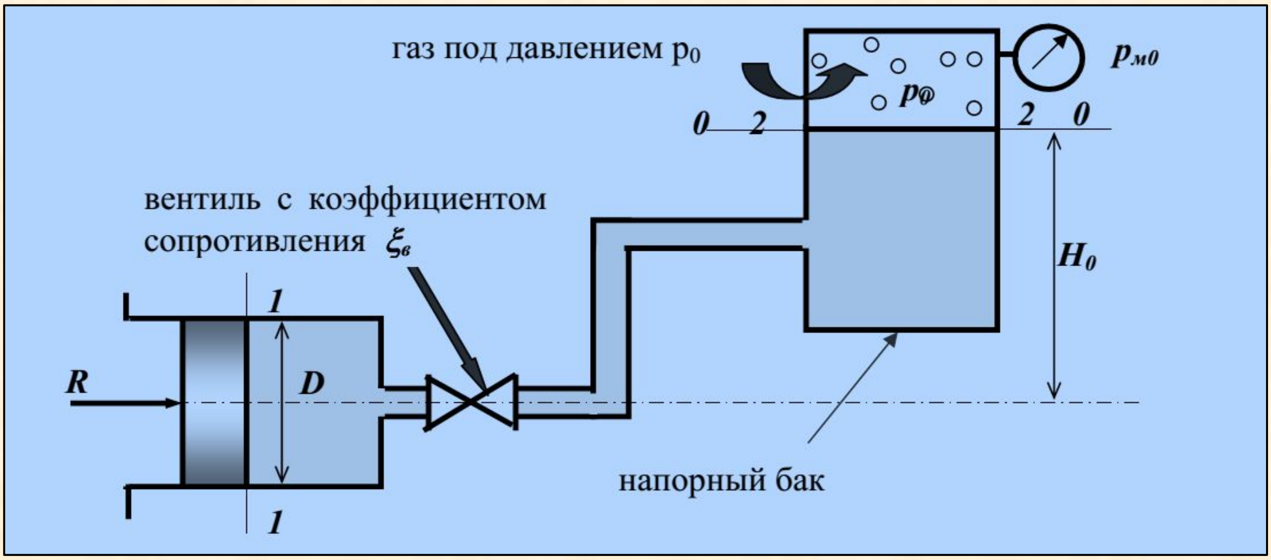


Рис. 16 Схема к задаче

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_1 \vartheta_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\alpha_2 \vartheta_2^2}{2g} + h_{1-2}.$$