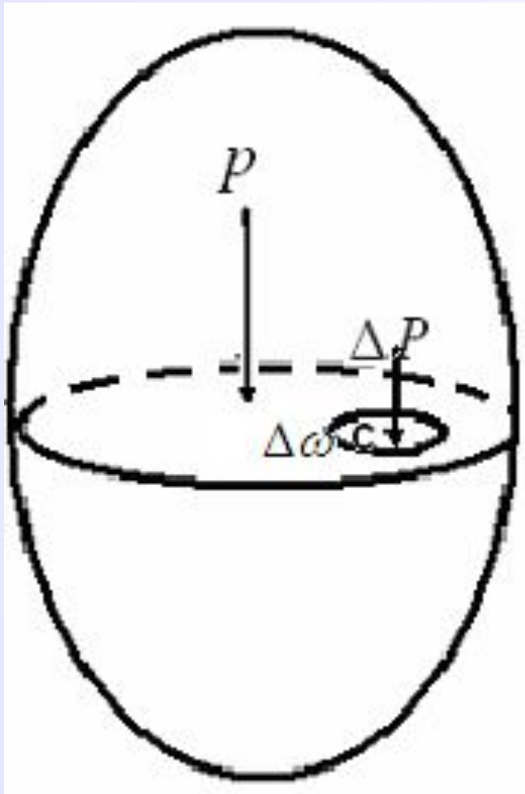
ГИДРОСТАТИКА

- **Гидростатика** - раздел гидравлики, в котором изучаются равновесие жидкости и воздействие покоящейся жидкости на погруженные в неё тела. Одна из основных задач гидростатики – изучение распределения давления в жидкости.

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

Гидростатическое давление и его свойства



$$\eth_{\tilde{n}\eth} = \frac{Ð}{\omega}$$

- Выделим на плоскости А–В элементарную площадку , на которую будет приходиться некоторая сила *P*. Если будем уменьшать площадку таким образом, чтобы ее площадь стремилась к нулю, то предел отношения силы к площади будет называться гидростатическим давлением в данной точке *C:*

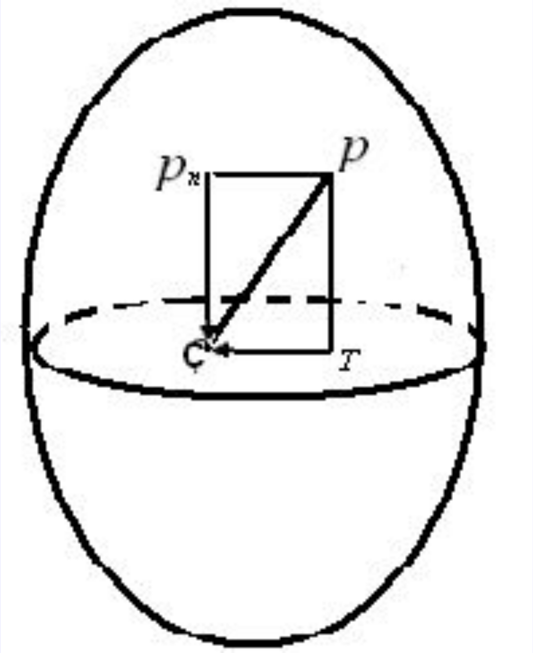
$$p = \lim_{\Delta\omega \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$$

Давление в системе СИ измеряется в паскалях: ***Па = Н / м²*** .

Связь единиц давления в различных системах измерения такая:

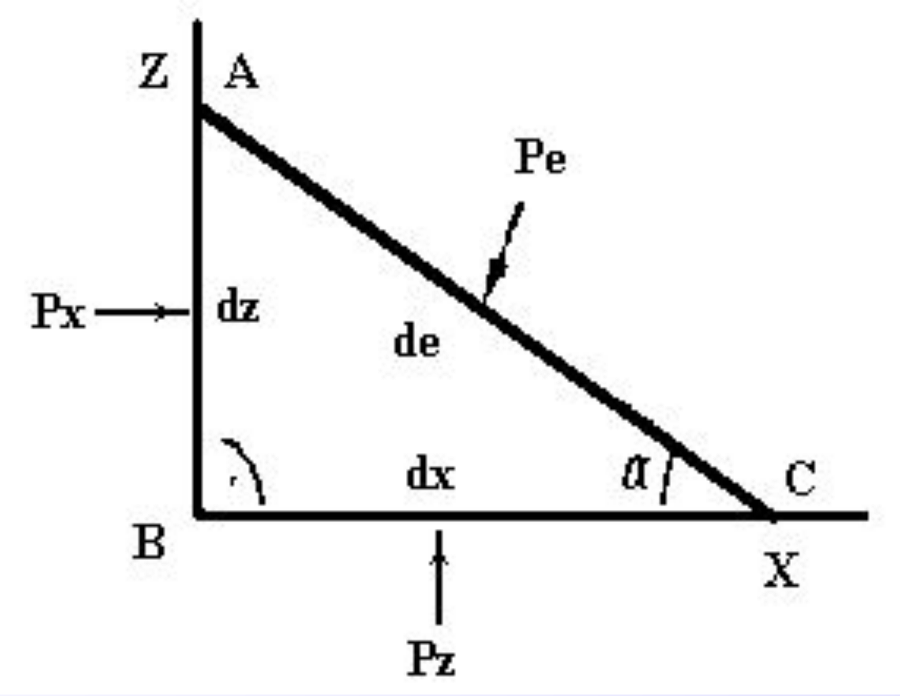
100000 Па = 0,1 МПа = 1 кгс/см² = 1 ат = 10 м

- Гидростатическое давление характеризуется тремя основными свойствами.
- **Первое свойство.** ***Гидростатическое давление направлено всегда по внутренней нормали к поверхности на которую оно действует.***



- Силу можно разложить на две составляющие: нормальную Pn и касательную T к поверхности АВ. ***Касательная составляющая*** – это равнодействующая сил трения, приходящихся на выделенную поверхность вокруг точки C.
- Так как жидкость находится в покое, то силы трения отсутствуют, т. е. $T=0$.
- *Следовательно,* сила гидростатического давления P в точке C действует лишь в направлении силы Pn, т. е. нормально к поверхности А–В. Причем направлена она только по <u>внутренней нормали</u>.

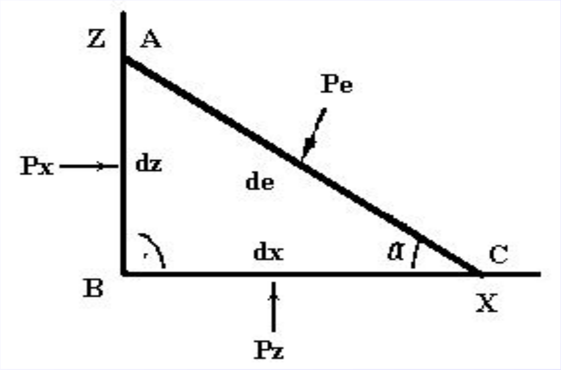
- **Второе свойство.** ***Гидростатическое давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям***.
- *Выделим* в жидкости, находящейся в равновесии, частицу в форме треугольной призмы с основанием в виде прямоугольного треугольника ABC.
- *Заменим* действие жидкости вне призмы на ее боковые грани гидростатическим давлением соответственно *Px, Pz, Pe,* кроме этих сил на призму действует сила тяжести *dG,* равная *γdzdx/2* (с целью упрощения грань *dy* не рассматриваем).



- Так как частица жидкости находится в равновесии, в покое, то сумма проекций всех сил, приложенных к ней, на любое направление равна нулю, т.е.:

- $$\Sigma x=0; \quad p_x dz - p_e de \sin\alpha=0,$$
- $$\Sigma z=0; \quad p_z dx - p_e de \cos\alpha - \gamma dzdx/2=0.$$

- *Подставляя* $dz=de \sin\alpha$ *и* $dx=de \cos\alpha$, *получим*



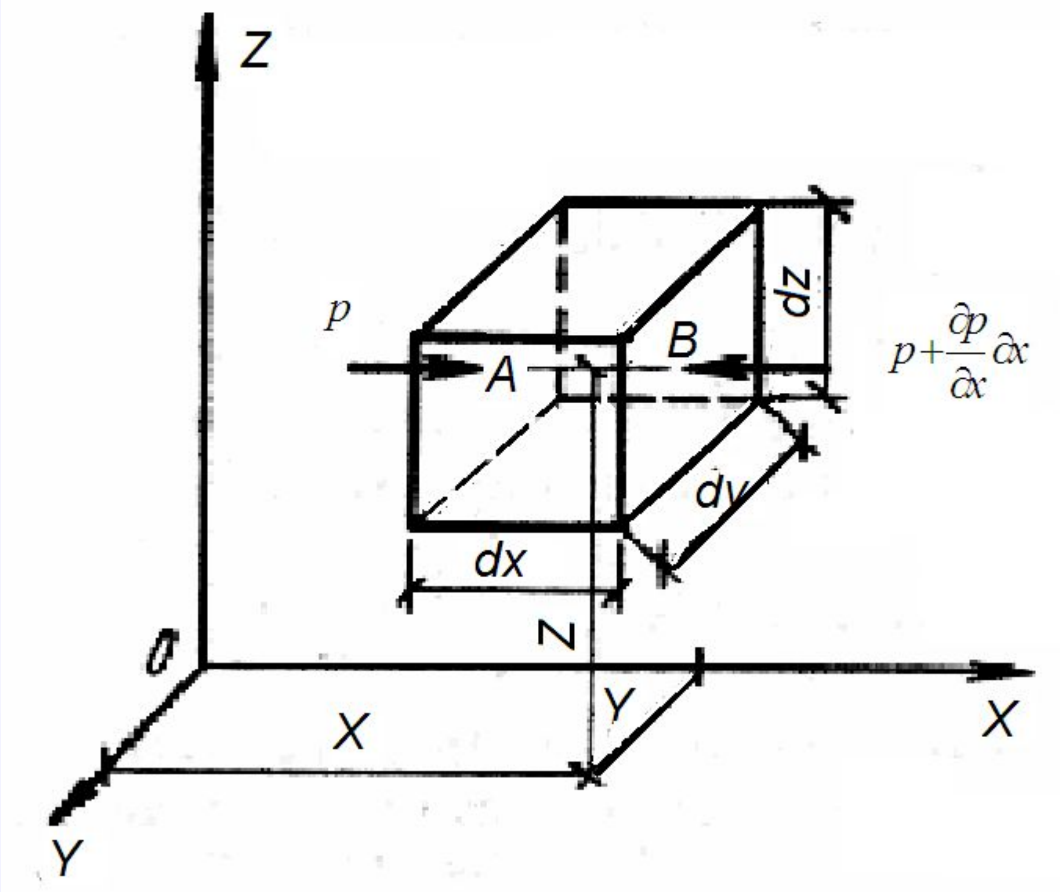
- $$p_x=p_e$$
- $$p_z=p_e+\gamma dzdx/2.$$
- $$p_x=p_z=p_e$$

- **<u>Следовательно,</u>** гидростатическое давление на наклонную грань p_e **одинаково** по величине с гидростатическим давлением на вертикальную и горизонтальную грани. Так как угол наклона грани *(α)* взят произвольно, то можно утверждать, что **гидростатическое давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям.**

- **Третье свойство.** *Гидростатическое давление в точке зависит только от ее координат в пространстве, т.е.*

- $p=f(x, y, z)$.

Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера)



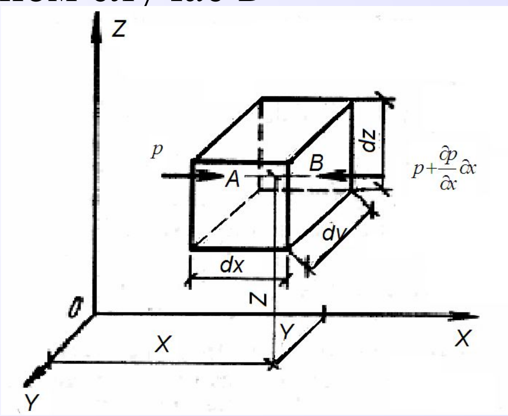
- Предположим, что гидростатическое давление в точке *A* с координатами *x, y, z* будет *p*. Тогда гидростатическое давление (p_1) в точке В, лежащей на линии А–В на расстоянии *dx* вправо от точки *A,* изменится на *dp* и будет равно:

$$p_1 = f(x+dx, y, z) = f(x, y, z) + \frac{df(x, y, z)}{\partial x}dx = p + \frac{\partial p}{\partial x}dx$$

- Тогда поверхностная сила давления на левую грань параллелепипеда равна гидростатическому давлению в одной из точек этой грани (в данном случае в точке А), умноженному на площадь грани:

$$P = pdydz,$$

- и на правую грань



- $$P_1 = -\left(p + \frac{\partial p}{\partial x}dx\right) dydz.$$

- Объемной или массовой силой называется сила, приложенная к массе жидкости в объеме параллелепипеда т.е. сила тяжести
  - $$G = mg.$$
- При постоянной плотности масса жидкости выделенного объема равна
  - $$m = \rho dxdydz.$$
- Проекцией объемных сил на ось OX будет величина – $\rho dxdydzX.$

- Суммируя проекции всех действующих на параллелепипед сил на ось *X* и приравнивая эту сумму к 0, получим:

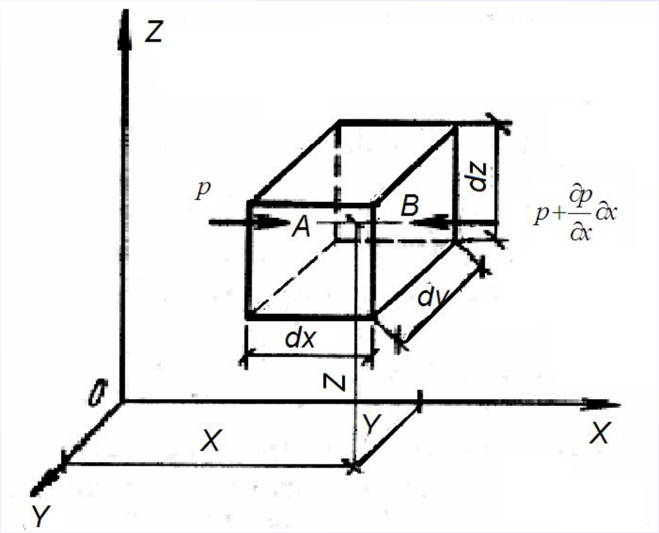
- $$pdydz\left(-\eth+\frac{\partial\eth}{\partial\tilde{o}}d\tilde{o}\right) \qquad dydz+\rho dxdydzX=0,$$

- откуда $$X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=0.$$
-

- По аналогии с этим можно получить подобные уравнения для осей *У* и *Z*:

$$У-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=0$$

$$Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}=0.$$



Поверхности равного давления

- Поверхности равного давления, представляют собой семейство горизонтальных плоскостей, во всех точках которой давление одинаково.
- Свободная поверхность жидкости для ограниченного объема, т.е. поверхность на границе жидкой и газообразной сред, в данном случае – одна из плоскостей равного давления, на которую приложено постоянное давление равное атмосферному.

- Для нахождения величины давления *p* по его трем частным производным по координатам умножим уравнения Эйлера соответственно на *dx, dy, dz* и сложим:

$$\overbrace{\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz}^{dp}=\rho\left(Xdx+Ydy+Zdz\right)$$

- Левая часть полученного уравнения представляет собой полный дифференциал *dp,* так как гидростатическое давление – это лишь функция координат *x, y, z,* т. е.

- $dp=\rho(Xdx+Ydy+Zdz).$

- ***- основное уравнение гидростатического давления в дифференциальной форме.***
- В правой части уравнения выражение в скобках также полный дифференциал некоторой потенциальной функции *П=П(x, y, z),* частные производные которой по координатам *x, y, z* соответственно равны проекциям единичных массовых сил *X, Y, Z.*

- Уравнение можно переписать в следующем виде:
-
- **d**

$$dp = \rho\left(\frac{\partial \Pi}{\partial x}dx + \frac{\partial \Pi}{\partial y}dy + \frac{\partial \Pi}{\partial z}dz\right)\boldsymbol{\Pi},$$

- или

$$dp = \rho d\Pi$$

- Интегрируя уравнение получим:

$$p = \rho\Pi + C$$

- где C – произвольная постоянная интегрирования.

- Для поверхности равного давления из уравнения ***dp=ρ(Xdx+Ydy+Zdz),*** при $p=const$,
- $\rho \neq 0$ принимая $dp = 0$ и тогда
  - ***Xdx+Ydy+Zdz= 0.***
- Это уравнение называется ***уравнением поверхности жидкости равного или постоянного давления***.
- При неравномерном или непрямолинейном движении на частицы жидкости кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется ***относительным покоем***.

- Если на покоящуюся жидкость действует внешняя сила, сила тяжести, тогда $X = 0$, $Y = 0$, $Z = -g$. В этом случае ***уравнение поверхности жидкости равного давления*** имеет вид
- $-gdz = 0$ или $Z = C = const$,
- т.е. получаем поверхности равного давления, представляющие собой семейство горизонтальных плоскостей, во всех точках которой давление одинаково.
- Основное уравнение гидростатического давления в дифференциальной форме для жидкости, находящейся под действием силы тяжести, запишется таким образом:
- $dp = -\rho g dz$, т.е.

$$\frac{dp}{\rho g} + dz = 0$$

- интегрируя которое получим
- .

$$\frac{\partial}{\rho g} + z = C = const$$

- Для двух точек одного и того же объема покоящейся жидкости уравнение можно представить в виде:

$$\boxed{z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}}$$

Геометрическая интерпретация основного уравнения гидростатики

- Рассмотрим уравнение основное уравнение гидростатики для точек А и В :
- $z + \dfrac{p}{\gamma} = z_0 + \dfrac{p_0}{\gamma}$, или $p=p_0+\gamma\,(z_0-z)$.
- где p – полное или абсолютное давление, иногда обозначаемое как $p_{абс}$,
- z и z_0 – геометрические высоты расположения точек А и В относительно произвольной плоскости 0–0, называемой плоскостью сравнения, γh – давление, равное весу столба жидкости при единичной площади и высоте
- $h=z_0-z$,
- $\dfrac{p}{\gamma}$ и $\dfrac{p_0}{\gamma}$
- – высоты соответствующие гидростатическому давлению p и p_0 в точках А и В.
- С учетом глубины погружения точки А под уровень свободной поверхности h, получим наиболее часто встречающуюся запись основного уравнения гидростатики:
- $p=p_0+\gamma h$

Высоту H называют ***гидростатическим напором.***

Для данного объема жидкости гидростатический напор относительно выбранной плоскости сравнения – величина постоянная:

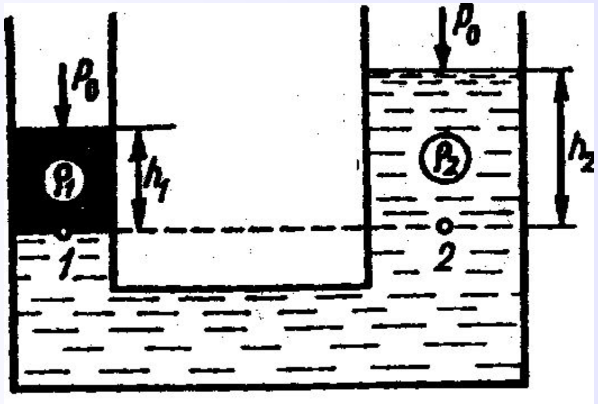
$$H = z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma} = const.$$

- **С энергетической точки зрения** уравнение представляет собой постоянную величину суммы удельной потенциальной энергии положения z и z_0 и удельной потенциальной энергии давления $\frac{p}{\gamma}$ и $\frac{p_0}{\gamma}$ во всех точках покоящейся жидкости относительно плоскости сравнения.
- Из уравнения следует, что гидростатическое давление p в любой точке жидкости и на любой глубине h зависит от внешнего давления p_0 на свободной поверхности.
- Т. е. *всякое внешнее давление, действующее на свободную поверхность жидкости, находящейся в равновесии, передается внутрь во все точки жидкости без изменения.*

закон Паскаля

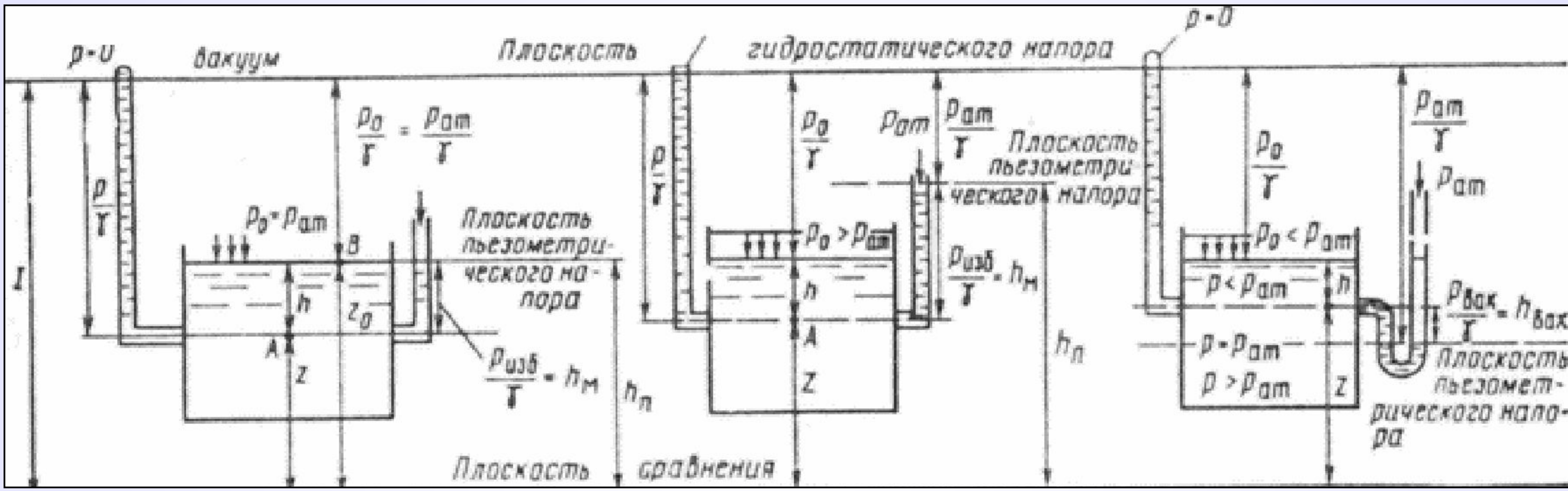
Равновесие двух неоднородных жидкостей в сообщающихся сосудах

- Рассмотрим равновесие двух неоднородных жидкостей покоящихся в сообщающихся сосудах (рис):
- $p_1+\gamma_1 h_1= p_2+\gamma_2 h_2$,
- если $p_1= p_2=p_0$, т. о. $\gamma_1 h_1= \gamma_2 h_2$
- или $h_1/h_2=\gamma_2/\gamma_1$.



- При неоднородных жидкостях и одинаковом внешнем давлении в сообщающихся сосудах уровень жидкостей обратно пропорционален удельному весу этих жидкостей.
- Для однородных жидкостей $(\gamma_1=\gamma_2)$ свободная поверхность в сообщающихся сосудах устанавливается на одном уровне $(h_1=h_2)$.

Избыточное и вакуумметрическое давление

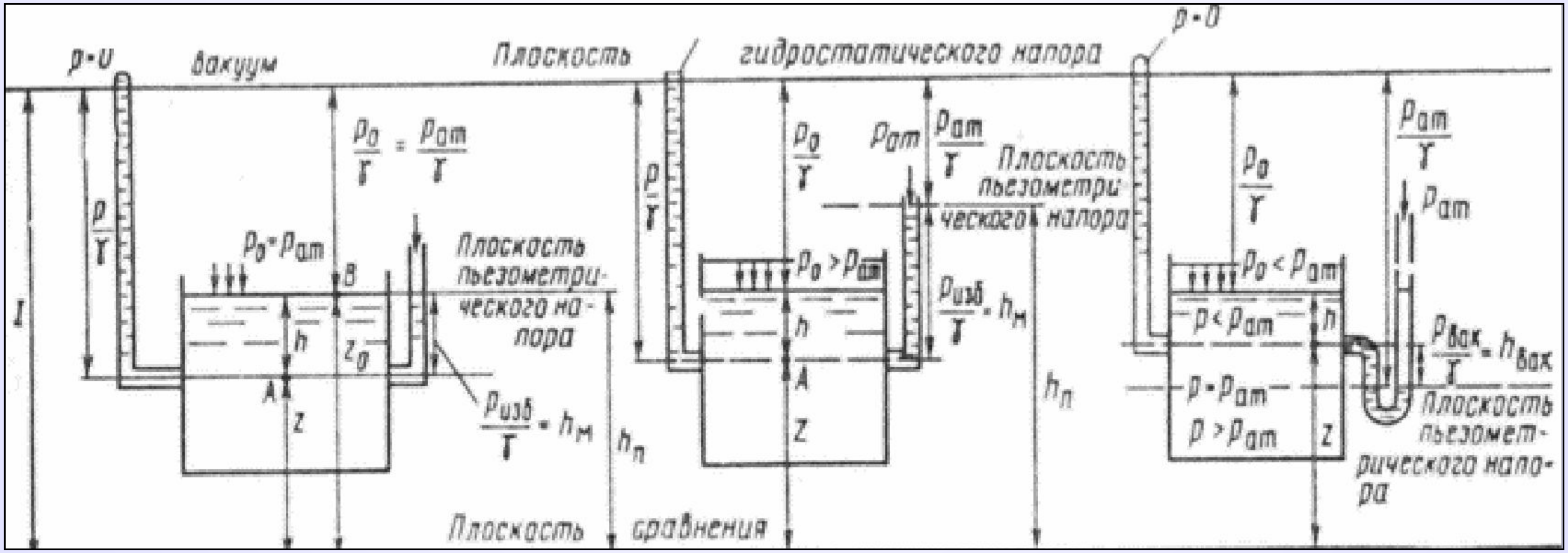


- Возможны три случая (рис.):
- а) $p_0 = p_{am}$;
- б) $p_0 > p_{am}$;
- в) $p_0 < p_{am}$.

- Рассмотрим случай, когда $p_0 > p_{am}$.
- Для точки А давление, действующее слева и справа:
- $p_0 + \gamma h = p_{am} + \gamma h_м$
- затем найдем $h_м$

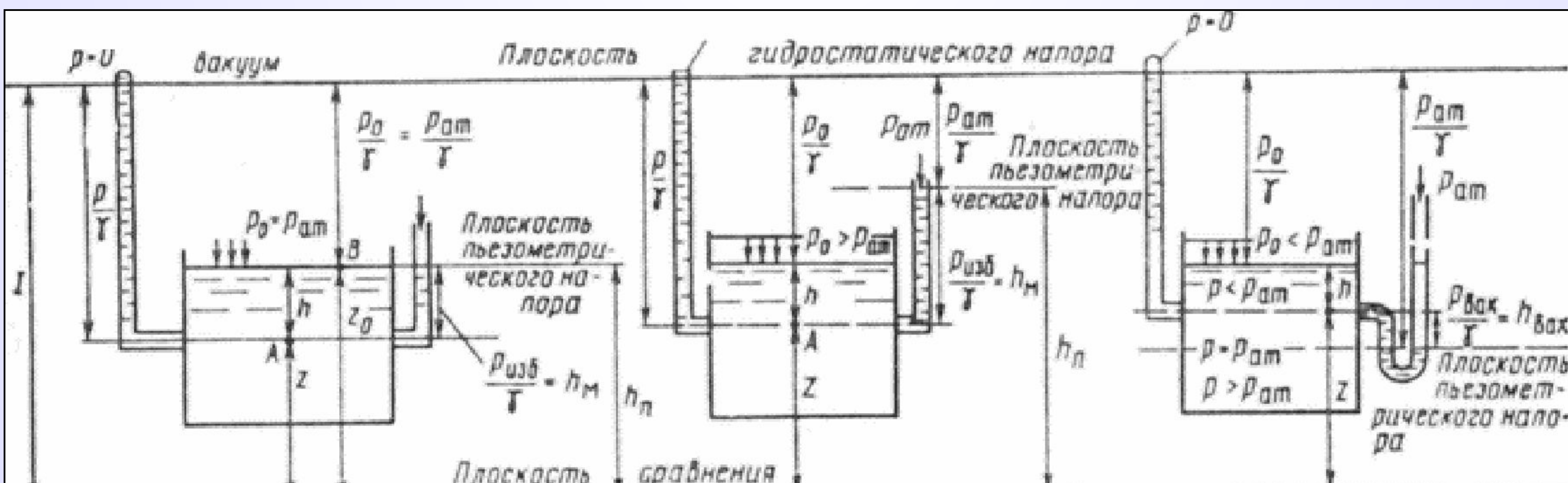
$$h_м = \frac{p_0 - p_{am}}{\gamma} + h = \frac{p_0 - p_{am} + \gamma h}{\gamma}$$

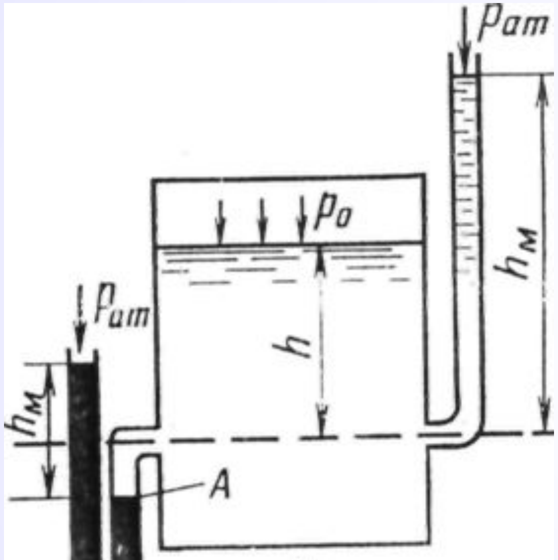
$$\gamma h_м = p_0 + \gamma h - p_{am} = p - p_{am} = p_м.$$



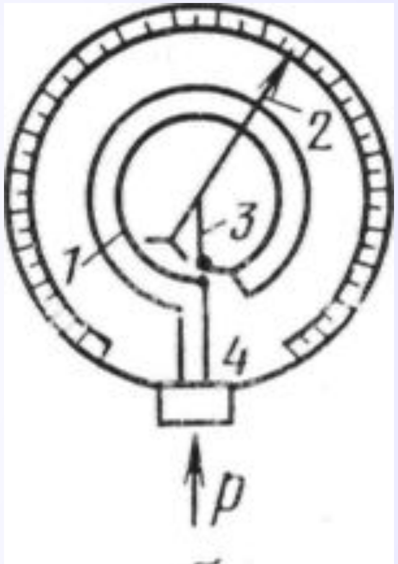
- В инженерной практике часто давление и жидкости бывает меньше атмосферного, т.е. $p_0 < p_{атм}$. В этом случае манометрическое давление будет отрицательным и называется вакуумом, а высота столба жидкости, измеряющая вакуум, называется вакуумметрической высотой $h_{вак}$. Запишем равенство давления для точки А, действующего слева и справа:
- $$p_0 + \gamma h + \gamma h_{âàê.} = p_{àò}.,$$
- тогда

$$h_{âàê} = \frac{ð_{àò} - ð_0 - \gamma h}{\gamma} = \frac{p_{àò} - ð}{\gamma}$$



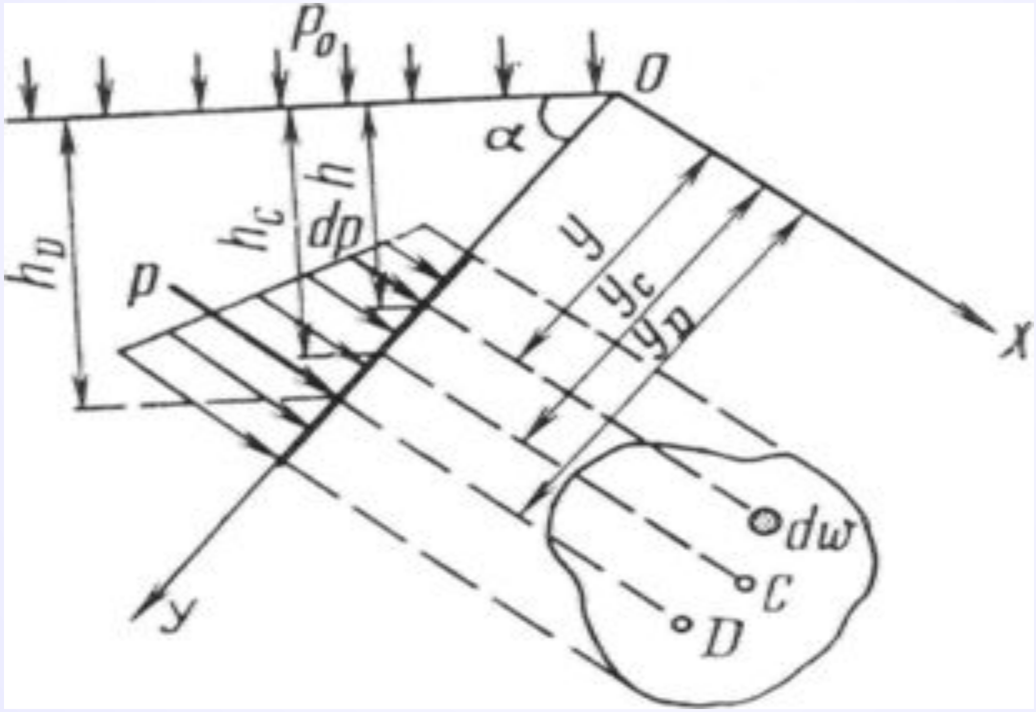


а



б

Давление жидкости на плоские и криволинейные поверхности



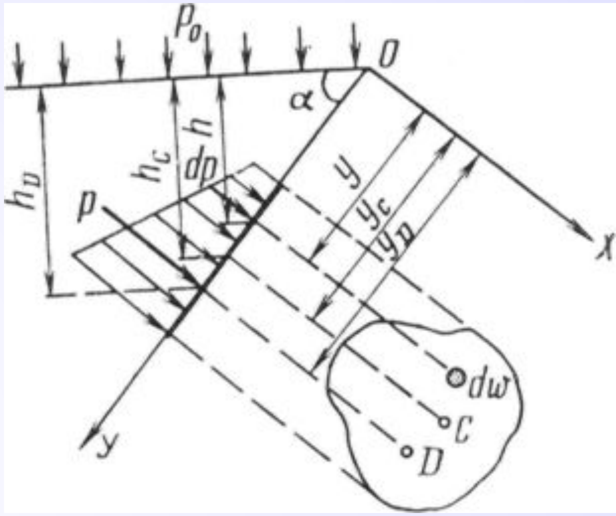
Определим бесконечно малую силу гидростатического давления на элементарную площадку *dw*:

$$dp = pdw = (p_0 + \gamma h)\, dw = p_0 dw + \gamma h dw$$

Для определения силы гидростатического давления необходимо проинтегрировать полученное выражение по всей площади *w*:

$$\text{Đ} = \text{ð}_0 \int_w dw + \gamma \int_w h dw = p_0 w + \gamma \sin\alpha \int_w y dw$$

где *y* – координата площадки *dw*.



Интеграл $\int_w y dw$ представляет собой статический момент смоченной поверхности фигуры относительно уреза воды - оси *O–X* и равен произведению площади этой фигуры на координату ***центра тяжести*** y_c,

т. е.

$$\int_w y dw = y_c w$$

Следовательно,

$$\boxed{P = p_0 w + \gamma \sin\alpha\, y_c w = p_0 w + \gamma h_c w}$$

где h_c – глубина погружения центра тяжести площади *w* в жидкость.

- Установим точку приложения *силы избыточного гидростатического давления* – y_D. Сила гидростатического давления жидкости P – это равнодействующая множества параллельных ей сил dp, действующих на элементарные площадки dw. Используем теорему Вариньона, согласно которой ***момент равнодействующей силы относительно какой-либо оси равен сумме моментов ее составляющих относительно той же оси:***
- $$\text{Đ}y_D = \int_w y\,dp \quad ,$$
- откуда

$$y_D = \frac{\int_\omega y\,d\eth}{P}.$$

- С учетом того, что $dp = \gamma h\,dw = \gamma y \sin\alpha\,dw$ и $\text{Đ} = \gamma h_c w = \gamma y_c \sin\alpha w$
- $$y_D = \frac{\int_w y^2 dw}{y_c w} = \frac{I_x}{y_c w}$$
- получим
- ,
- где $I_x = \int_w y^2 dw$ - осевой момент инерции смоченной площадки (w)

относительно оси 0–X.

- В расчетах удобнее использовать **осевой момент инерции плоской фигуры** I_{xo} относительно центральной оси, для этого воспользуемся известной формулой перехода
  - $I_x = I_{xo} + y_c{}^2 w,$
- Подставляя это выражение в формулу получим

$$\boxed{y_D = y_c + \frac{I_{x\hat{\imath}}}{y_c w} = y_c + \frac{I_{x\hat{\imath}}}{S}}$$

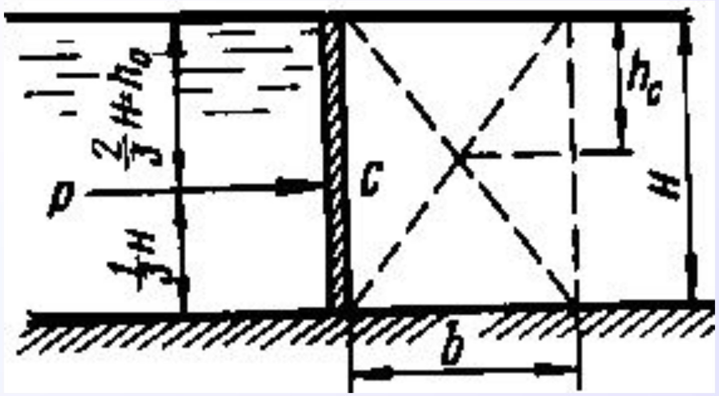
- где $S = y_c w$□ – статический момент смоченной площади относительно оси $0 - X$.

- Для вертикальной плоской стены, когда *sina=1:*
- $$h_D = h_c + \frac{I_{x_0}}{h_c w}$$, так как $y_D = \dfrac{h_D}{\sin\alpha}$ и $y_c = \dfrac{h_c}{\sin\alpha}$

.

- Т.о. для **плоской прямоугольной стенки (рис.)** сила гидростатического давления будет равна:

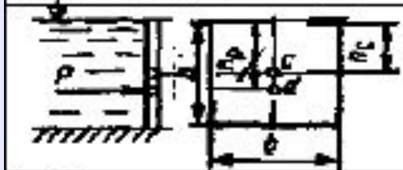
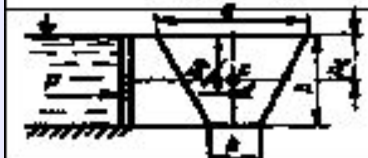
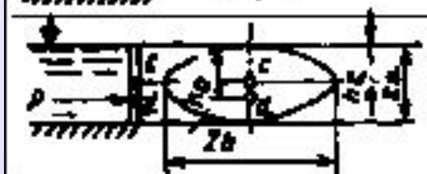
$$P = \gamma h_c w = \gamma \frac{H}{2} bH = \frac{1}{2}\gamma bH^2$$



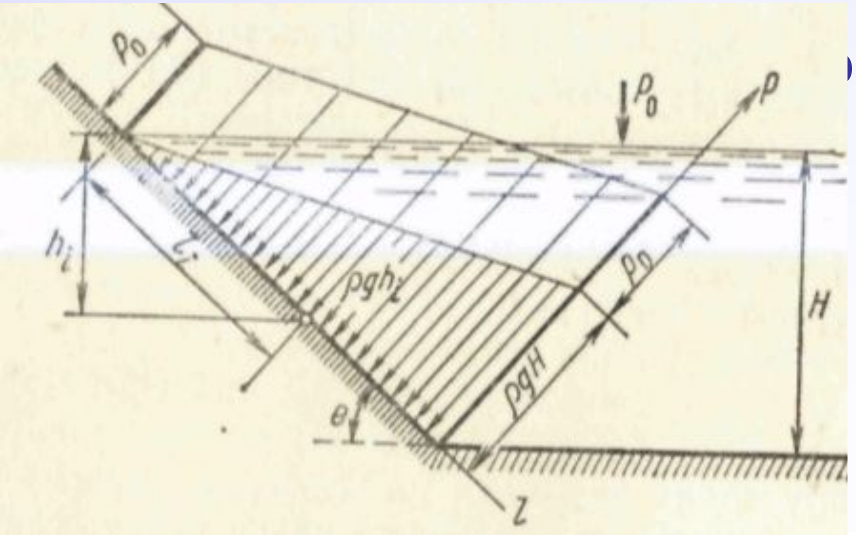
- Центр давления находится по формуле

$$\boxed{y_D = \frac{H}{2} + \frac{bH^3/12}{H/2bH} = \frac{2}{3}H}$$

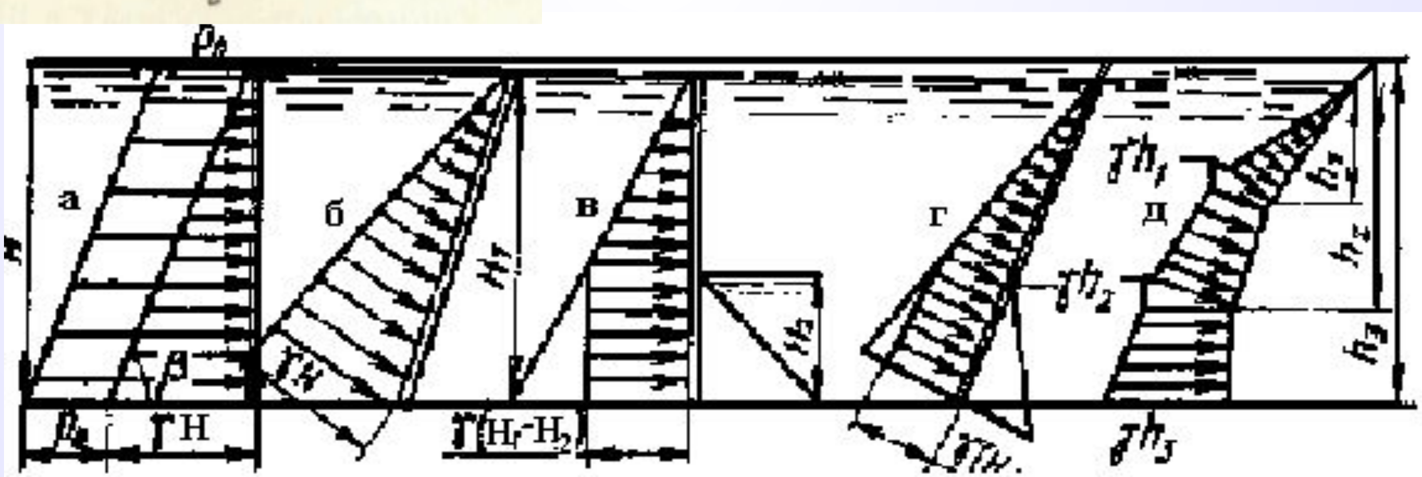
В табл. приведены формулы для расчета момента инерции *Ixo* координат центра тяжести h_c и центра давления h_D, площади и силы *P*.

Форма фигуры	I_{xo}	h_c	ω	h_D	P
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{h}{2}$	bh	$\frac{2}{3}h$	$\rho g\frac{bh^2}{2}$
	$\frac{bh}{36}$	$\frac{2}{3}h$	bh	$\frac{3}{4}h$	$\rho g\frac{bh^2}{3}$
	$\frac{1}{36}h^3\frac{a^2+4ab+b^2}{a+b}$	$\frac{1}{3}h\frac{a+2b}{a+b}$	$\frac{1}{2}h(a+b)$	$\frac{h}{2}\frac{a+3b}{a+2b}$	$\rho g\frac{h^2}{6}(a+2b)$
	$\frac{1}{4}\pi R^2$	R	πR^2	$\frac{5}{4}R$	$\rho g\pi R^3$
	$\frac{1}{4}\pi(R^4-r^4)$	**R**	$\pi(R^2-r^2)$	$R+\frac{R^2+r^2}{4R}$	$\rho g\pi R(R^2-r^2)$
	$\frac{1}{4}\pi a^3 b$	**a**	πab	$\frac{5}{4}a$	$\rho g\pi a^2 b$

ры давления



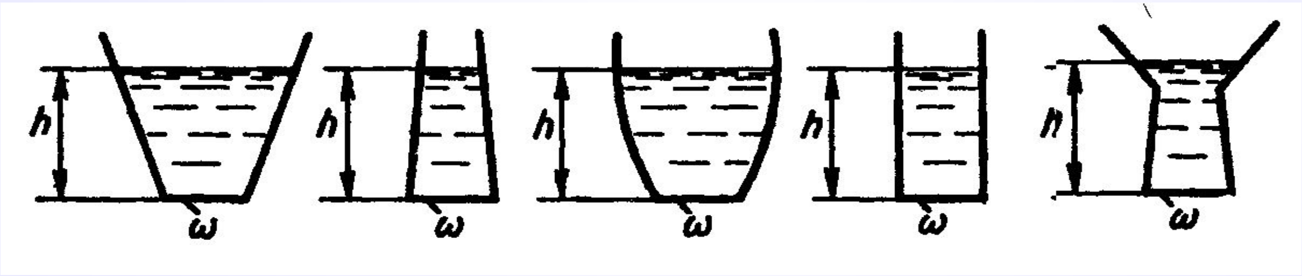
- если $p_0 = p_{ат}$, то
- $P = \gamma\ h_i$
- если $h_i = 0$, то $p = 0$, если $h_i = H$, то $p = \gamma H$.



Давление в системе СИ измеряется в паскалях: ***Па = Н / м²*** .

100000 Па = 0,1 МПа = 1 кгс/см² = 1 ат = 10 м

- Для горизонтально расположенной стенки, в виде горизонтального дна сосуда, сила давления жидкости на все дно площадью *w* может быть определена по формуле
  - $P=\gamma\ wH.$

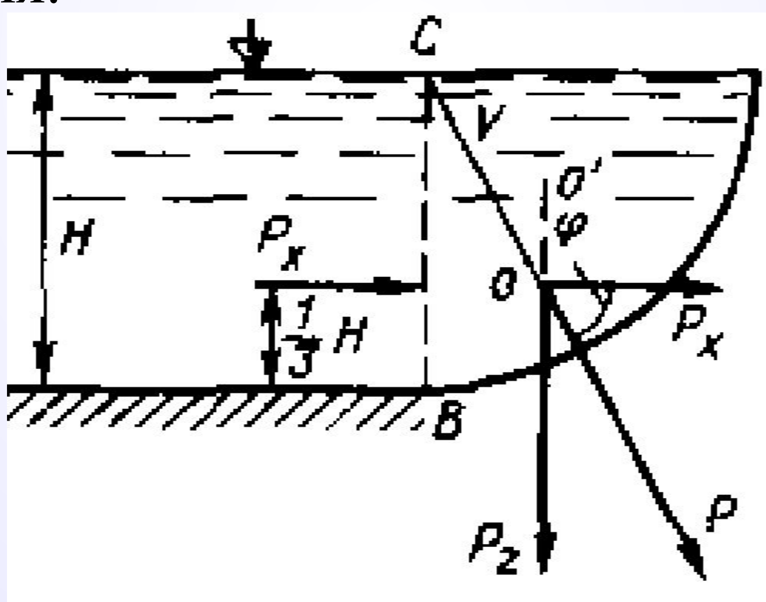


Давление на криволинейные поверхности

- *Значение силы давления на цилиндрическую поверхность определяется по формуле:*

Давление на криволинейные поверхности

- $P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$,
- *где P_x и P_z* – горизонтальная и вертикальная составляющие силы давления.



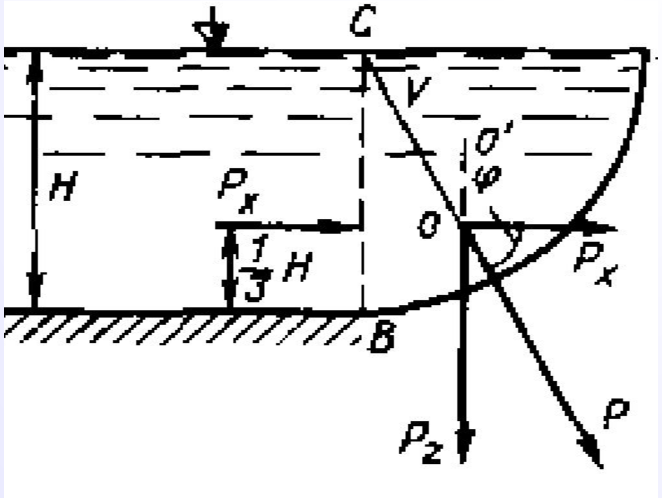
- ***После интегрирования для горизонтальной составляющей силы*** **получим**

$$P_x = \gamma h_c w_x$$

- где w_x – проекция всей цилиндрической поверхности на плоскость, нормальную к оси 0–X, h_c – глубина центра тяжести проекции w_x под пьезометрической плоскостью.
- ***Вертикальная составляющая численно равна весу жидкости в объеме <u>тела давления</u>***

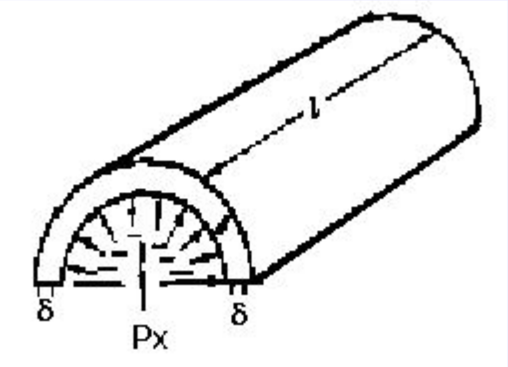
- $$\boldsymbol{P_z = \gamma\, W.}$$

- Горизонтальная составляющая P_x проходит **через центр давления проекции w_x**, а вертикальная составляющая P_z проходит через центр тяжести тела давления.



Давление жидкости на криволинейную внутреннюю стенку трубы

- Рассмотрим давление жидкости на криволинейную внутреннюю стенку трубы (рис.), где
  - H – напор, под которым в трубе находится жидкость с заданной величиной ρg,
  - d – диаметр,
  - δ - толщина стенки,
  - L – длина труб,
  - P_x – горизонтальная составляющая силы давления жидкости внутри трубы.
- Величина P_x рассчитывается по формуле

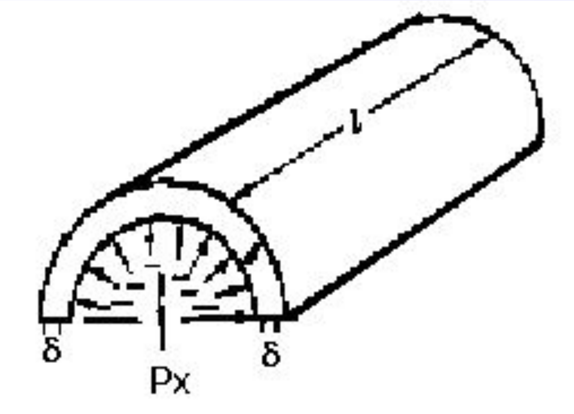


- $P_x = \rho g H\, L d.$

- Обозначим гидростатическое давление
- $P=\rho g H$, тогда P_x рассчитывается по формуле

- $P_x = P\, L d.$

- Разрывающей силе давления жидкости противодействует сила сопротивления материала стенки *M*:
    - $M=2\sigma_p\delta L,$
        - где σ_p – напряжение материала на разрыв,
        - δ – толщина стенки,
        - L – длина трубы,
        - 2 – сила сопротивления действует с двух сторон.
- При условии, что система находится в равновесии, приравняем силы давления жидкости и сопротивления материала стенки $P_x=M$ получим:



$$P\,Ld=2\sigma_p\,\delta L$$

$$Pd=2\sigma_p\,\delta,$$

$$P=2\sigma_p\,\delta/d.$$

- Уравнение позволяет рассчитать толщину стенку трубопровода и напряжение на разрыв, по которому можно подобрать материал трубопровода.

- Если жидкость находится в закрытом сосуде, передвигающемся по вертикали с ускорением *a,* то проекции ускорений массовых сил в этом случае будут равны: $X=0$, $Y=0$, $Z=a-g$, а **уравнение** ***поверхности жидкости равного давления*** будет иметь вид

- $$dp=\rho\,(a-g)dz,$$

- интегрируя его получим:

- $$p=\rho\,(a-g)Z+C,$$

- из условия $Z=0$, $p=p_0=C$, с учетом погружения точки на глубину
- $h=-z$ получим:

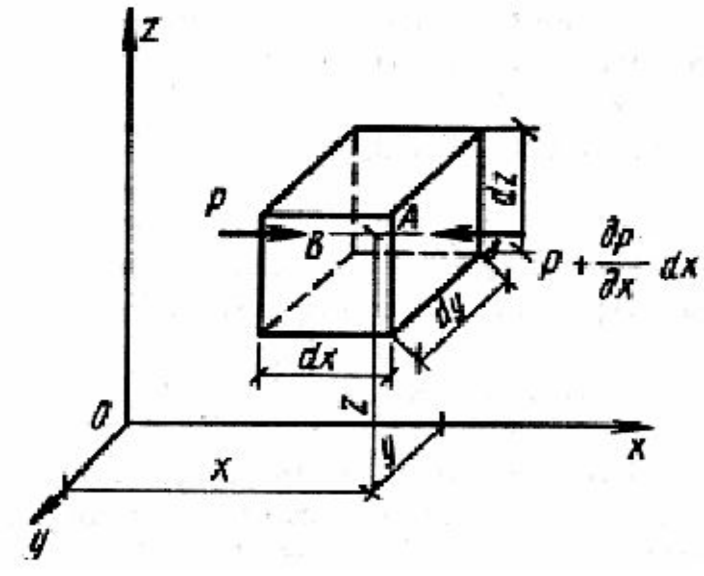
- $$p=p_0+\rho\,(g-a)h.$$

- При движении сосуда с жидкостью вниз с ускорением или вверх с замедлением ускорения силы инерции будет уменьшать действие ускорения свободного падения *g* и давление в жидкости будет меньше, чем в сосуде с жидкостью находящемся в состоянии покоя.
- При $a=g$ жидкость станет невесомой, т.е. во всех точках жидкости $p=p_0$.

Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера)

- Предположим, что гидростатическое давление в точке *A* с координатами *x, y, z* будет *p*. Тогда гидростатическое давление (p_1) в точке В, лежащей на линии А–В на расстоянии *dx* вправо от точки *A,* изменится на *dp* и будет равно:

$$p_1 = f(x+dx, y, z) = f(x, y, z) + \frac{df(x, y, z)}{\partial x}dx = p + \frac{\partial p}{\partial x}dx$$



- Тогда поверхностная сила давления на левую грань параллелепипеда равна гидростатическому давлению в одной из точек этой грани (в данном случае в точке А), умноженному на площадь грани:

$$P = pdydz,$$

- и на правую грань
  - $$P_1 = -\left(p + \frac{\partial p}{\partial x}dx\right) dydz.$$
- Объемной или массовой силой называется сила, приложенная к массе жидкости в объеме параллелепипеда т.е. сила тяжести
  - $G = mg.$
- При постоянной плотности масса жидкости выделенного объема равна $m = \rho dxdydz.$
- Проекцией объемных сил на ось ОХ будет величина – $\rho dxdydzX.$
- Суммируя проекции всех действующих на параллелепипед сил на ось *X* и приравнивая эту сумму к 0, получим:
  - $$pdydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x}dx\right) dydz + \rho dxdydzX = 0,$$

- откуда
- $$X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 0.$$
- По аналогии с этим можно получить подобные уравнения для осей *У* и *Z*:

$$У - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$Z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = 0.$$

Поверхности равного давления

- Для нахождения величины давления *p* по его трем частным производным по координатам умножим уравнения Эйлера соответственно на *dx, dy, dz* и сложим:

$$\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz=\rho\left(Xdx+Ydy+Zdz\right)$$

- Левая часть полученного уравнения представляет собой полный дифференциал *dp,* так как гидростатическое давление – это лишь функция координат *x, y, z,* т. е.
  - ***dp=ρ(Xdx+Ydy+Zdz).***
- ***- основное уравнение гидростатического давления в дифференциальной форме.***
- В правой части уравнения выражение в скобках также полный дифференциал некоторой потенциальной функции *П=П(x, y, z),* частные производные которой по координатам *x, y, z* соответственно равны проекциям единичных массовых сил *X, Y, Z*. Уравнение можно переписать в следующем виде:
- $dp=\rho\left(\frac{\partial \Pi}{\partial x}dx+\frac{\partial \Pi}{\partial y}dy+\frac{\partial \Pi}{\partial z}dz\right)$
- $$dp=\rho d\Pi$$,
- или
- Интегрируя уравнение получим:

$$p=\rho\Pi+C$$

- где *C* – произвольная постоянная интегрирования.
- Для поверхности равного давления из уравнения ***dp=ρ(Xdx+Ydy+Zdz).*** при *p=const*,
- $\rho\neq 0$ найдем $dp=0$ и тогда
  - ***Xdx+Ydy+Zdz= 0.***
- Это уравнение называется ***уравнением поверхности жидкости равного или постоянного давления***.
- При неравномерном или непрямолинейном движении на частицы жидкости кроме силы тяжести действуют еще и силы инерции, причем если они постоянны по времени, то жидкость принимает новое положение равновесия. Такое равновесие жидкости называется *относительным покоем*.

- **Первый случай**, когда на покоящуюся жидкость действует внешняя сила, сила тяжести, тогда $X = 0,\ У = 0,\ Z = –g$. В этом случае **уравнение *поверхности жидкости равного давления*** имеет вид
- $– gdz = 0$ или $Z = C=const,$
- т.е. получаем поверхности равного давления, представляющие собой семейство горизонтальных плоскостей, во всех точках которой давление одинаково.
- Основное уравнение гидростатического давления в дифференциальной форме для жидкости, находящейся под действием силы тяжести, запишется таким образом:
- $dp = -\rho gdz,$ т.е.

$$\frac{dp}{\rho g} + dz = 0$$

- интегрируя которое получим

$$\frac{\eth}{\rho g} + z = C = const$$

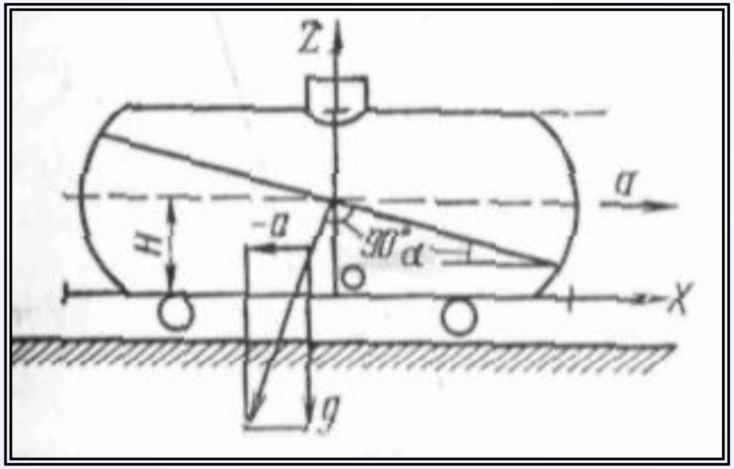
- .
- Для двух точек одного и того же объема покоящейся жидкости уравнение можно представить в виде:

$$\boxed{z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}}$$

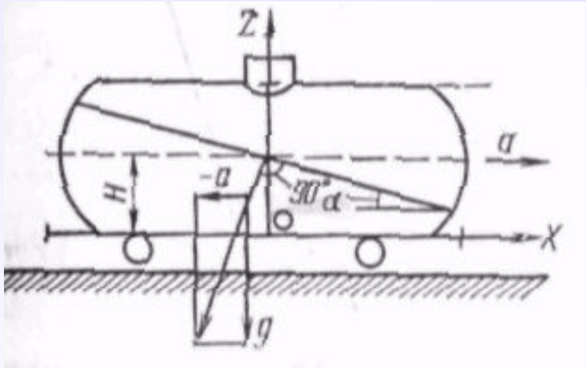
- Это выражение называется ***основным уравнением гидростатики.***

- Если жидкость находится в закрытом сосуде, передвигающемся по вертикали с ускорением *a,* то проекции ускорений массовых сил в этом случае будут равны: $X=0$, $Y=0$, $Z=a-g$, а **уравнение *поверхности жидкости равного давления*** будет иметь вид
  - $dp=\rho\,(a - g)dz,$
- интегрируя его получим:
  - $p=\rho\,(a - g)Z+C,$
- из условия $Z=0$, $p= p_0 =C$, с учетом погружения точки на глубину
- $h = -z$ получим:
  - $p = p_0 + \rho\,(g-a)h.$
- При движении сосуда с жидкостью вниз с ускорением или вверх с замедлением ускорения силы инерции будет уменьшать действие ускорения свободного падения g и давление в жидкости будет меньше, чем в сосуде с жидкостью находящемся в состоянии покоя.
- При $a=g$ жидкость станет невесомой, т.е. во всех точках жидкости $p=p_0$.

- **Второй случай,** когда поверхность равного давления может быть наклонной.
- *Например,* свободная поверхность бензина в железнодорожной цистерне, движущейся горизонтально с ускорением a. К каждой частице жидкости массы m должны быть в этом случае приложены ее вес $G = mg$ и сила инерции, равная по величине ma. Равнодействующая этих сил направлена к вертикали под углом α.
- В этом случае единичная масса жидкости находится под действием силы тяжести $Z=-g$ и горизонтального ускорения силы инерции $X = -1 \cdot a$ (к цистерне приложена сила с ускорением (a), а к жидкости – такая же по величине сила инерции с ускорением ($- a$).



- Составляющие массовых сил в уравнении получают значения:
- $X = -a;$
- $Y = 0;$
- $Z = -g,$
- тогда уравнение свободной поверхности примет вид:
- $-adx - gdz = 0$ или
- После интегрирования уравнения получим
- $-ax - gz = C.$
- При $x = 0$; $z = H$; $C = -gH,$ тогда



$$Z = H - \frac{a}{g}x.$$

- Из вышеизложенного следует, что свободная поверхность бензина в цистерне представляет собой плоскость с углом наклона

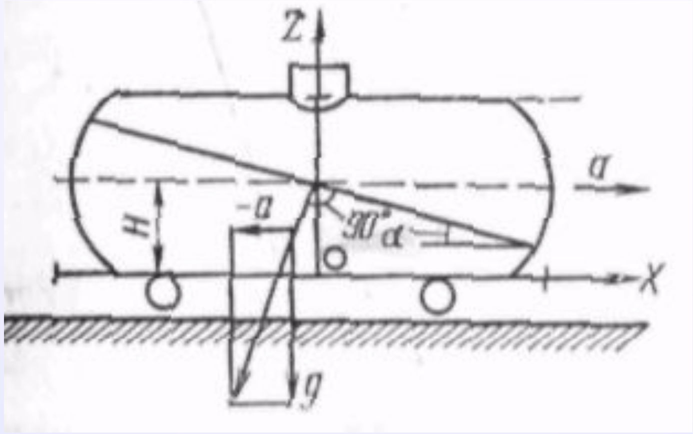
$$\alpha = arctg\left(-\frac{a}{g}\right).$$

- Так как свободная поверхность, как поверхность равного давления, должна быть нормальна к указанной равнодействующей, то она в данном случае представит собой уже не горизонтальную плоскость, а наклонную, составляющую угол α с горизонтом. Учитывая, что величина этого угла зависит только от ускорений, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости. Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом α. Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон свободной поверхности обратился бы в другую сторону.

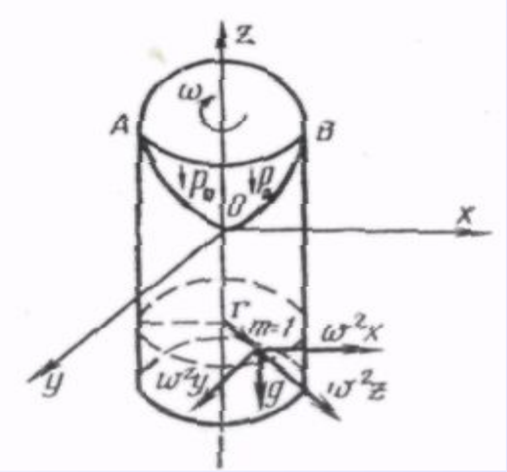
- Основное уравнение гидростатики в этом случае примет вид

  - $dp = -\rho\,(a\,dx + g\,dz)$.

- После интегрирования получим зависимость распределения давления в любой точке цистерны с бензином:
- $p = -\rho a x - \rho g z + C$
- При $x=0;\ z = 0,\ C = p_0 = \rho\, gH$ и тогда
- $p = \rho\, gH - \rho\, ax - \rho gz = \rho[g\,(H - z) - ax]$.
- Из выражения следует, что наибольшее давление будет в точке $z = 0$ и максимальным отрицательным значением x.



- **Третий случай**, когда жидкость находится в открытом цилиндрическом сосуде, вращающемся вокруг его вертикальной оси с постоянной угловой скоростью *ω*. В этом случае на частицу жидкости массой $m=1$ действуют сила тяжести $G=-1g$, параллельная оси Z, и перпендикулярная к оси Z центробежная сила (рис.)
- $F=1\cdot\omega^2/r=\omega^2 r.$
- Определим проекции составляющих равнодействующей массовых сил X, Y, Z на оси x, y, z:
- $X=\omega^2 r\cos(r\hat{}x)=\omega^2 r\, x/r=\omega^2 x;$
- $Y=\omega^2 r\cos(r\hat{}y)=\omega^2 r\, y/r=\omega^2 y;$
- $Z=-g.$
- Подставляем эти величины в ***уравнение поверхности жидкости равного давления***, получим
- $dp=\rho\ (\omega^2 xdx+\omega^2 ydy-gdz)$. Интегрируя это выражение, будем иметь
- $p=\rho\left(\frac{\omega^2 x^2}{2}+\frac{\omega^2 ó^2}{2}-gz\right)+C$ или $p=\rho\ (\ \frac{\omega^2 r^2}{2}-gz)+C$
- так как $r^2=x^2+y^2$.



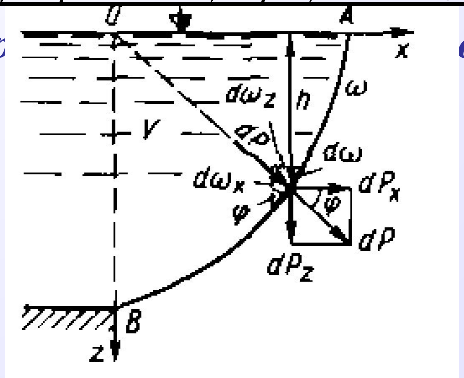
- При *x=y=z=0, p=0 и C=0*
- $p=\rho\ (\ \dfrac{\omega^2 r^2}{2} - gz)$
- Из уравнения видно, что при вращении сосуда наибольшее давление будет в точках у дна и на боковых стенках сосуда.
- Уравнение свободной поверхности можно получить при p=0 из выражения
- $p=\rho\ (\ \dfrac{\omega^2 r^2}{2} - gz)$ *при* $\rho \neq 0$

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g}.$$

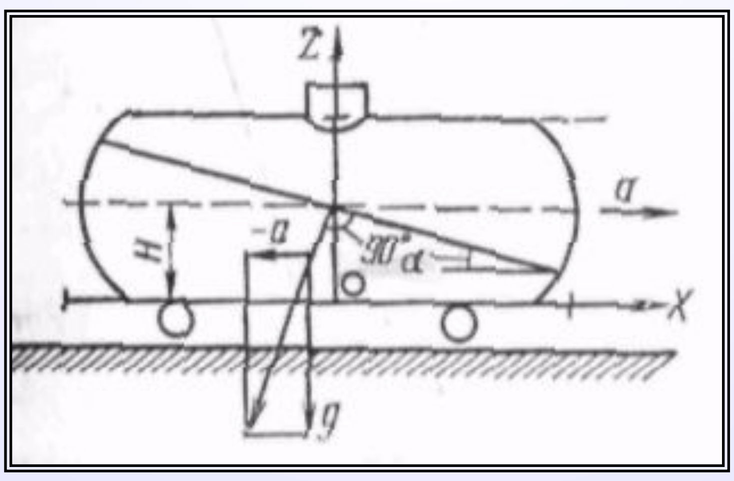
- Разложим силу давления dP на две составляющие: горизонтальную dP_x и вертикальную dP_z. Направим ось OY параллельно образующей (рис.).
- *Значение силы давления на цилиндрическую поверхность в данном случае определяется по формуле:*
- $P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$,
- *где* P_x *и* P_z – горизонтальная и вертикальная составляющие силы давления.

- Выделив на цилиндрической поверхности элементарную площадку dw, на которую действует направленная по нормали элементарная сила
- $dP = \gamma dw$, найдем ***горизонтальную*** $\boldsymbol{dP_x}$ ***и вертикальную*** $\boldsymbol{dP_z}$***, составляющие силы dP;***
  - $dP_x = dP \cos\varphi = \gamma\, hdw \cos\varphi$;
  - $dP_z = dP \sin\varphi = \gamma\, hdw \sin\varphi$.
- *Учитывая, что* $dw\cos\varphi = dw_x$ *и* $dw \sin\varphi = dw_z$ *имеем*
  - $dP_x = \gamma h\, dw_x$
  - $dP_z = \gamma h\, dw_z$,
- *где* dw_x *– проекция элементарной площадки dw* *<u>на плоскость, перпендикулярную оси O-X;</u>*
- dw_z *– проекция элементарной площадки dw* *<u>на плоскость, перпендикулярную оси O - Z.</u>*
- *Проинтегрировав формулу* $\boldsymbol{dP_x = \gamma h\, dw_x}$ *, получим* ***для гор*** ... ***ощей силы***

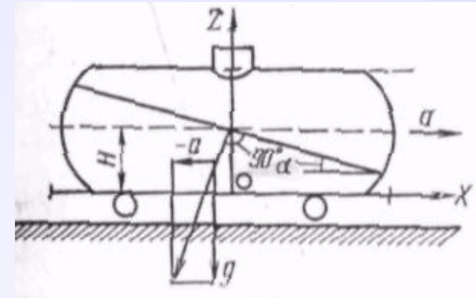
$$\int dP_x = \int_\omega \gamma h dw_x = \gamma \int_\omega h dw_x$$



- **Второй случай,** когда поверхность равного давления может быть наклонной.
- ***Например,*** свободная поверхность бензина в железнодорожной цистерне, движущейся горизонтально с ускорением a. К каждой частице жидкости массы m должны быть в этом случае приложены ее вес $G = mg$ и сила инерции, равная по величине ma. Равнодействующая этих сил направлена к вертикали под углом α.
- В этом случае единичная масса жидкости находится под действием силы тяжести $Z = -g$ и горизонтального ускорения силы инерции $X = -1 \cdot a$ (к цистерне приложена сила с ускорением (a), а к жидкости – такая же по величине сила инерции с ускорением ($-a$).



- Составляющие массовых сил в уравнении получают значения:
- $X = -a;$
- $Y = 0;$
- $Z = -g,$
- тогда уравнение свободной поверхности примет вид:
- $-adx - gdz = 0$ или
- После интегрирования уравнения получим
- $-ax - gz = C.$
- При $x = 0$; $z = H$; $C = -gH$, тогда



$$Z = H - \frac{a}{g}x.$$

- Из вышеизложенного следует, что свободная поверхность бензина в цистерне представляет собой плоскость с углом наклона $\alpha = arctg\left(-\frac{a}{g}\right).$

- Так как свободная поверхность, как поверхность равного давления, должна быть нормальна к указанной равнодействующей, то она в данном случае представит собой уже не горизонтальную плоскость, а наклонную, составляющую угол α с горизонтом. Учитывая, что величина этого угла зависит только от ускорений, приходим к выводу, что положение свободной поверхности не будет зависеть от рода находящейся в цистерне жидкости. Любая другая поверхность уровня в жидкости также будет плоскостью, наклоненной к горизонту под углом α. Если бы движение цистерны было не равноускоренным, а равнозамедленным, направление ускорения изменилось бы на обратное, и наклон свободной поверхности обратился бы в другую сторону.

- Основное уравнение гидростатики в этом случае примет вид

- $dp = -\rho\ (adx+gdz).$

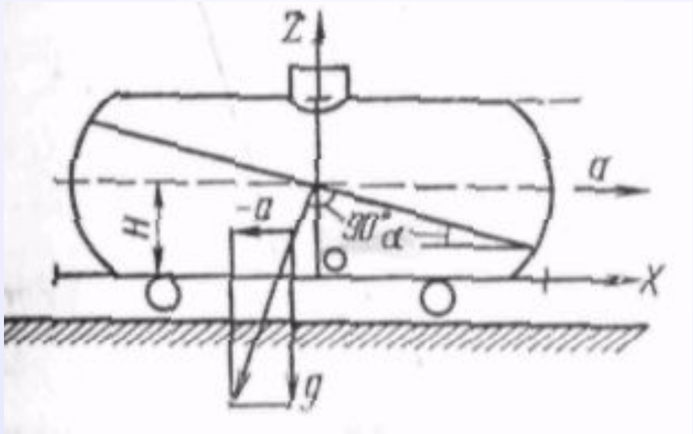
- После интегрирования получим зависимость распределения давления в любой точке цистерны с бензином:

- $p = -\rho ax - \rho gz + C$

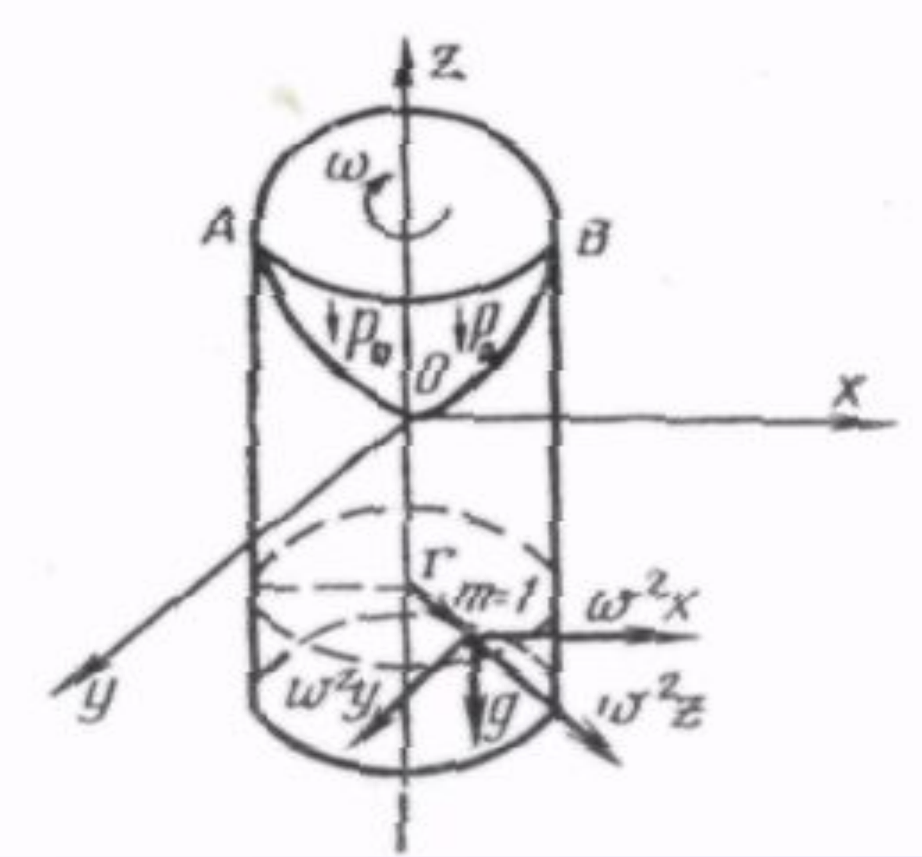
- При $x=0;\ z = 0,\ C = p_0 = \rho\ gH$ и тогда

- $p = \rho\ gH - \rho\ ax - \rho gz = \rho[g\ (H-z) - ax].$

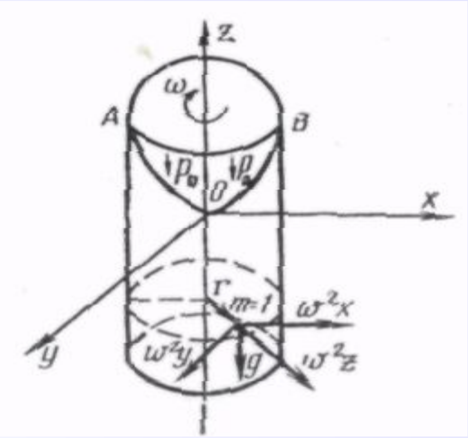
- Из выражения следует, что наибольшее давление будет в точке $z = 0$ и максимальным отрицательным значением x.



- **Третий случай**, когда жидкость находится в открытом цилиндрическом сосуде, вращающемся вокруг его вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω.
- В этом случае на частицу жидкости массой $m=1$ действуют сила тяжести $G=-1g$, параллельная оси Z, и перпендикулярная к оси Z центробежная сила (рис.)
- $F=1 \cdot \omega^2/r = \omega^2 r$.



- Определим проекции составляющих равнодействующей массовых сил *X, У, Z* на оси *x, y, z:*



- $X = \omega^2 r \cos(r \wedge x) = \omega^2 r\, x/r = \omega^2 x;$
- $Y = \omega^2 r \cos(r \wedge y) = \omega^2 r\, y/r = \omega^2 y;$
- $Z = -g.$
- Подставляем эти величины *в* ***уравнение поверхности жидкости равного давления***, получим
- $dp = \rho\ (\omega^2 xdx + \omega^2 ydy - gdz)$. Интегрируя это выражение, будем иметь
- $p = \rho \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 \acute{o}^2}{2} - gz \right) + C$ или $p = \rho\ (\frac{\omega^2 r^2}{2} - gz) + C$
- так как $r^2 = x^2 + y^2$.

- При $x=y=z=0$, $p=0$ и $C=0$
- $p=\rho\,\left(\dfrac{\omega^2 r^2}{2} - gz\right)$
- Из уравнения видно, что при вращении сосуда наибольшее давление будет в точках у дна и на боковых стенках сосуда.
- Уравнение свободной поверхности можно получить при p=0 из выражения $p=\rho\,\left(\dfrac{\omega^2 r^2}{2} - gz\right)$
- *при* $\rho \neq 0$

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g}.$$