МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Дисциплина:
Механика жидкости и газа

Тема 1. Гидростатическое давление в точке

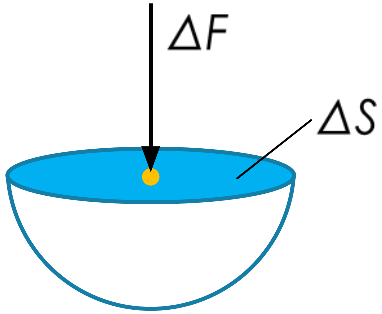
Преподаватель:
Лазурина Мария Александровна

Санкт-Петербург 2022

В результате действия поверхностных и массовых сил внутри жидкости возникает напряжение сжатия, называемое <u>гидростатическим давлением</u>.

Гидростатическое давление в точке (Р) – это предел отношения силы ΔF к площади ΔS при уменьшении ее размеров до нуля:

$$P = \lim_{\Delta S \to 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right)$$



ΔF – сила гидростатического давления

ΔS – площадь поверхности, на которую воздействует сила F. В любой точке жидкости гидростатическое давление перпендикулярно площадке, касательной к выделенному объему и действует внутрь рассматриваемого объема жидкости

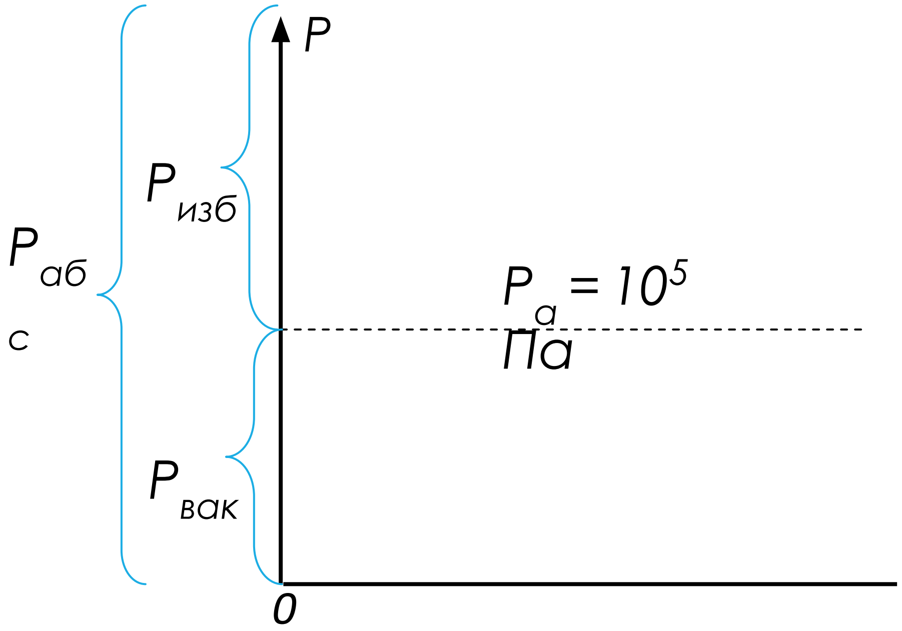
Единицы измерения и виды гидростатического давления

$P_a = 10^5$ Па = 100 кПа = 1 бар = 1 техн. атм. = 1 кгс/см^2 =

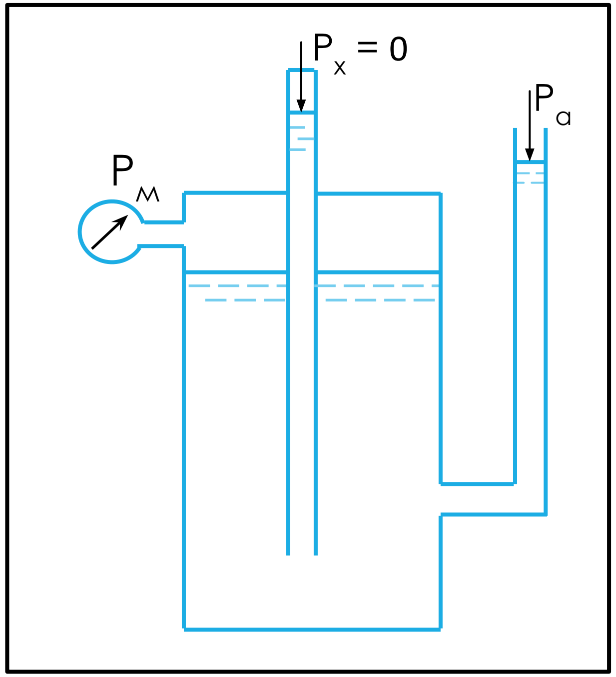
$$= \underbrace{750 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.}}_{\text{данные единицы измерения относятся уже к напору, т.е. } \frac{P}{\rho g}}$$

Виды гидростатического давления:

- Полное (абсолютное) $P_{абс}$ – величина давления, отсчитываемая от «0» (с учетом атмосферного);
- Атмосферное давление P_a – давление, создаваемое окружающей воздушной средой (Ра = 10^5 Па);
- Избыточное давление $P_{изб}$ – превышение давления над атмосферным (отсчитывается от атмосферного): $P_{изб} = P_{абс} - P_a = \rho g h$;
- Вакуумметрическое (отрицательное избыточное) $P_{вак}$ – недостаток давления до атмосферного: $P_{вак} = P_a - P$.



Обратите внимание при решении задач



В абсолютной форме	В избыточной форме
$P_м = P_м$	$P_м = P_м - P_a$
$P_x = 0$	$P_x = (-P_a) = -10^5$
$P_a = P_a = 10^5$	$P_a = 0$

Основное уравнение гидростатики

$$\boxed{P = P_x + \rho g h}$$

P – давление в точке;

P_x – давление на поверхности жидкости;

$\rho g h$ – избыточное давление, создаваемое слоем вышележащей жидкости.

Поверхность уровня или поверхность равного давления

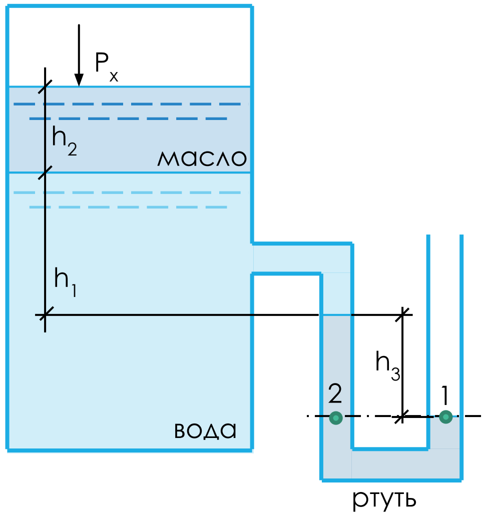
– это поверхность, во всех точках которой давление одинаково.

Условия равного давления:

1) точки должны располагаться в одной горизонтальной плоскости;
2) точки должны располагаться в жидкости одного и того же вида.

Задача

В закрытом резервуаре имеется вода (h_1 = 30 см) и масло (h_2 = 50 см), плотность масла $\rho_м$ = 800 кг/м^3. Найти давление P_x на поверхности масла, если показания ртутного прибора h_3 = 40 см.

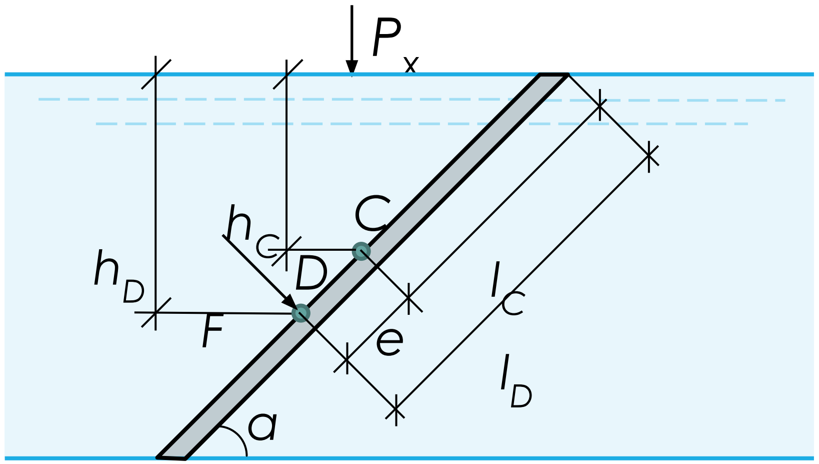


Дано:	Решение
h_1 = 30 см h_2 = 50 см h_3 = 40 см $\rho_м$ = 800 кг/м^3 $\rho_{рт}$ = 13600 кг/м^3 $\rho_в$ = 1000 кг/м^3 P_x = ?	1. Обозначаем 2 точки на поверхности равного давления. 2. Записываем основное уравнение гидростатики для каждой точки: $\left.\begin{aligned} P_1 &= P_a \\ P_2 &= P_x + g(\rho_м h_2 + \rho_в h_1 + \rho_{рт} h_3) \end{aligned}\right\} \Rightarrow$ $P_a = P_x + g(\rho_м h_2 + \rho_в h_1 + \rho_{рт} h_3)$ 3. Выражаем P_x: $P_x = P_a - g(\rho_м h_2 + \rho_в h_1 + \rho_{рт} h_3) = 10^5 - 9{,}81(800 \cdot 0{,}5 + 1000 \cdot 0{,}3 + 13600 \cdot 0{,}4) = 39828$ Па $= 39{,}83$ кПа

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Тема 2.
Сила гидростатического давления на плоские поверхности

При расчете строительных конструкций и сооружений необходимо знать <u>общую силу давления жидкости на сооружение или его часть</u>, а не только силу давления в отдельной точке.



C – центр тяжести смоченной конструкции

D – центр давления смоченной конструкции

F – сила давления жидкости

h_C – глубина погружения центра тяжести (от поверхности жидкости до точки *C*)

h_D – глубина погружения центра давления (от поверхности жидкости до точки *D*)

l_C – расстояние от поверхности жидкости до точки *C*

l_D – расстояние от поверхности жидкости до точки *D*

a – угол наклона конструкции или сооружения

P_x – давление на поверхности жидкости

Определение величины силы гидростатического давления

Силой давления (F) называется равнодействующая элементарных сил гидростатического давления (P_C) на некоторую поверхность (S).

$$F = P_C \cdot S \ [\text{Н}]$$

* Обычно для таких расчетов учитывается только величина избыточного давления ($P_{изб}$), так как атмосферное давление действует равномерно со всех сторон конструкции и само себя уравнивает.

$$F = \underbrace{(P_x + \rho g h_C)}_{P_C} \cdot S \ [\text{Н}]$$

При $P_x = P_{изб}$:

$$F = (P_{изб} + \rho g h_C) \cdot S$$

При $P_x = P_a$:

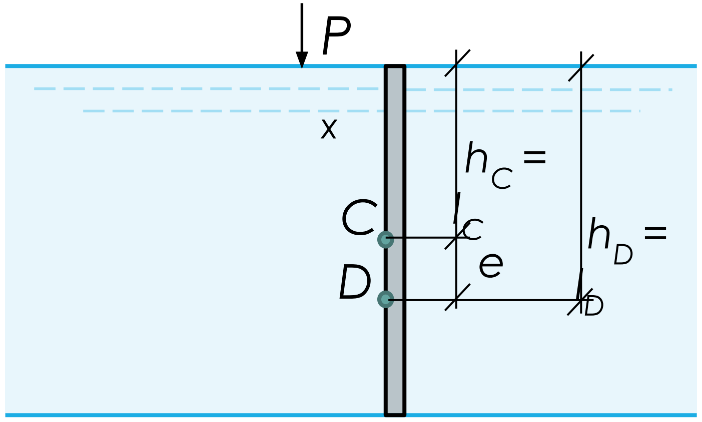
$$F = \rho g h_C \cdot S$$

P_C – величина давления в точке C, [Па]
S – площадь конструкции, на которую действует жидкость [м^2]
P_x – давление на поверхности жидкости, [Па]
$\rho g h_C$ – избыточное давление, создаваемое слоем вышележащей жидкости, [Па]
h_C – глубина погружения центра тяжести, [м] (см. табл. или считать)

Определение координат точки приложения силы давления (координат точки *D*)

Сила *F* прикладывается в точке *D*, называемой центром давления, перпендикулярно к поверхности.
Центр давления *D* всегда ниже центра тяжести *C* на величину, равную эксцентриситету *e*.

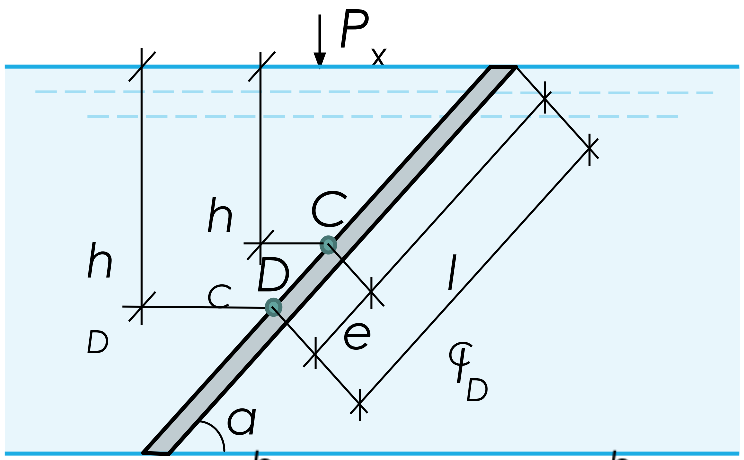
Для вертикальных стенок



$$h_C = l_C ; h_D = l_D$$

$$\boxed{h_D = h_C + e = h_C + \underbrace{\frac{I_C}{h_C \cdot S}}_{e}}$$

Для наклонных стенок



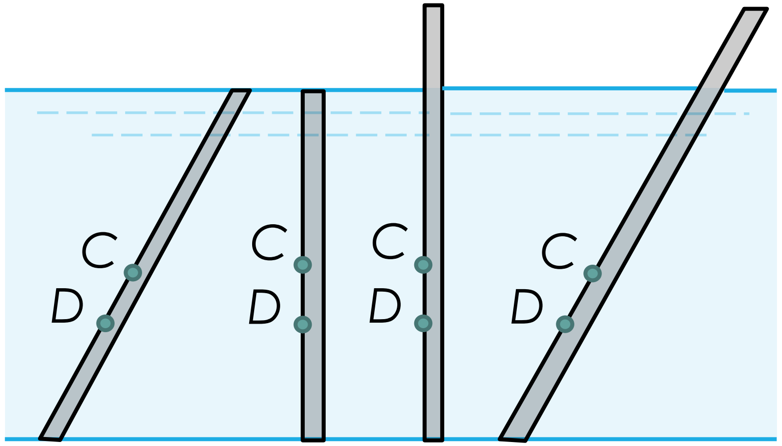
$$h_C \neq l_C, \; l_C = \frac{h_C}{\sin a} \; ; \; h_D \neq l_D, \; l_D = \frac{h_D}{\sin a}$$

$$\boxed{l_D = l_C + e = l_C + \underbrace{\frac{I_C}{l_C \cdot S}}_{e}}$$

h_D – глубина погружения центра давления смоченного участка
h_C – глубина погружения центра тяжести смоченного участка
e – величина эксцентриситета
I_C – момент инерции площади плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести плоской фигуры
l_C – расстояние от поверхности жидкости до точки *C*
l_D – расстояние от поверхности жидкости до точки *D*
S – площадь конструкции, на которую действует жидкость

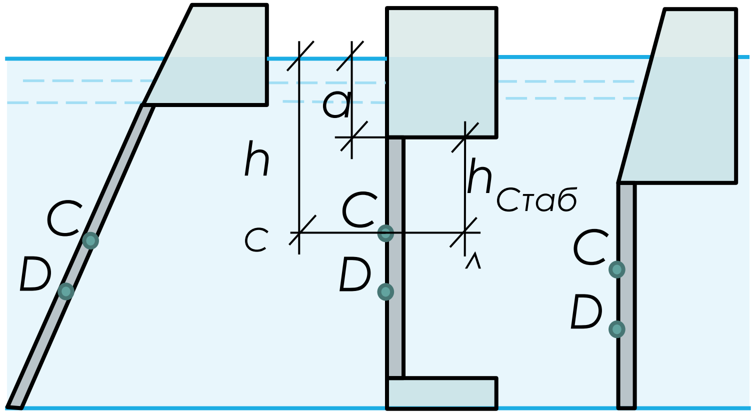
Определение h_C и h_D

Если рассматриваемая плоская поверхность – единственное <u>цельное</u> сооружение, на которое действует жидкость (полностью или частично)



h_C и h_D определяется по таблице

Если рассматриваемая плоская поверхность – лишь <u>часть</u> сооружения, на которое действует жидкость



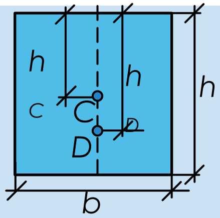
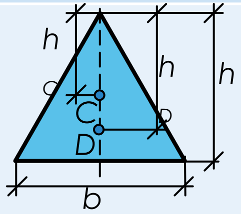
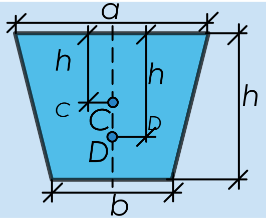
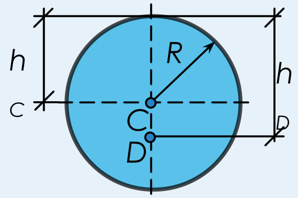
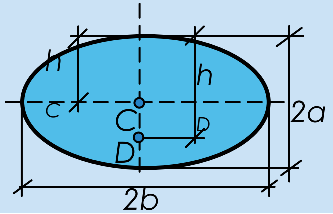
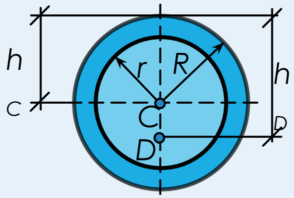
$$h_C = h_{Стабл} + a$$

a – расстояние от верха фигуры до поверхности воды

h_D всегда определяется по формуле через эксцентриситет e:

$$h_D = h_C + e$$

Момент инерции I_C, площадь S, координаты центра тяжести h_C и центра давления h_D плоских фигур

Сечение	S	I_C	h_C	h_D
	bh			
				
				
				
			a	
			R	

Для решения задач на данную тему используются:

1. Уравнение равновесия. Отражает равенство нулю суммы моментов всех сил, действующих на плоскую поверхность

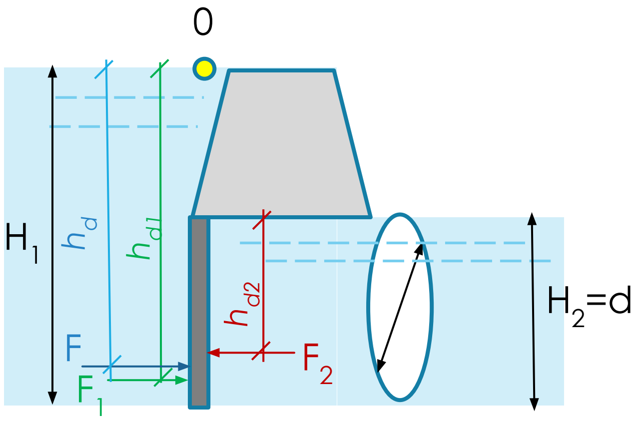
$$\sum M_0 (Fi) = 0 \quad M_0 = F \cdot l$$

M_0 – момент силы, относительно точки *0*
F – сила
l – плечо силы (перпендикулярно от точки приложения силы *F* до *0)*

2. Теорема о равенстве момента равнодействующей силы сумме моментов сил ее составляющих (используется для определения координат точки приложения равнодействующей силы)

$$F_1 > F_2 \rightarrow R = F_1 - F_2$$

$$M_0 (R) = \sum_{i=1}^{n} M_0 (Fi)$$



Определить равнодействующую силу давления воды на плоский затвор, перекрывающий отверстие трубы диаметром d=2 м, и точку ее приложения, если глубина воды до затвора H_1=5 м, а после него H_2= 2м

Задача

Дано:	Решение
$H_1 = 5$ м $H_2 = d = 2$м $F=?;\ h_d = ?$	1. На затвор действует сила давления жидкости слева F_1 и справа F_2. Чтобы найти величину равнодействующей, найдем величины сил ее составляющих.

$F_1 = \rho g h_{C1} \cdot S;\quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4};\quad h_{C1} = H_1 - d/2$

$F_1 = \rho g \cdot (H_1 - d/2) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot (5-1) \cdot \frac{3{,}14 \cdot 2^2}{4} = 123{,}1$ кН

$F_2 = \rho g h_{C2} \cdot S;\quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4};\quad h_{C2} = d/2$

$F_2 = \rho g \cdot d/2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 1 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 2^2}{4} = 31$ кН

$F = F_1 - F_2 = 123{,}1 - 31 = 92{,}1$ кН

2. Определяем точку приложения силы гидростатического давления:

Обозначаем на рисунке точку **0**, относительно которой будем строить плечи сил F_1 и F_2 (на поверхности воды слева). Момент равнодействующей равен сумме моментов сил ее составляющих

$\rightarrow\quad F \cdot h_d = F_1 \cdot h_{d1} - F_2 \cdot (h_{d2} + \Delta H) \quad\rightarrow\quad h_d = \frac{F_1 \cdot h_{d1} - F_2 \cdot (h_{d2} + \Delta H)}{F}$

Слева вода действует на затвор и стенку, к которой он прикреплен

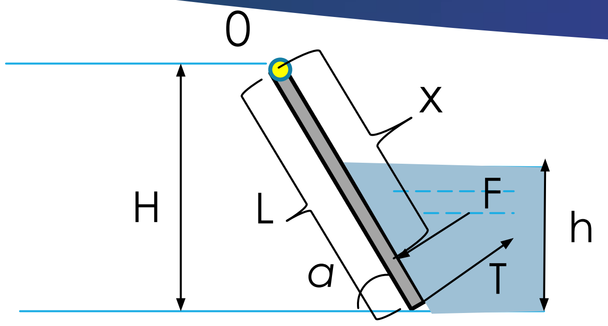
$h_{d1} = h_{C1} + e = h_{C1} + \frac{I_C}{h_{C1} S} = H_1 - d/2 + \frac{\pi \cdot d^4 \cdot 4}{64 \cdot (H_1 - d/2) \pi \cdot d^2} = (5-1) + \frac{4}{16 \cdot (5-1)} = 4{,}06$ м

Справа вода действует только на затвор (считаем по таблице)

$h_{d2} = 5/8 \cdot d = 5/8 \cdot 2 = 1{,}25$ м

$h_d = \frac{123{,}1 \cdot 4{,}06 - 31 \cdot (1{,}25+2)}{92{,}1} = 3{,}99$ м

Задача 2



- Прямоугольный щит шириной b=5 м закреплен шарнирно в точке 0. Определить усилие T, необходимое для подъема щита, если шарнир находится на высоте H= 4 м от дна, глубина воды h=2 м. Угол наклона щита a=60°. Силой тяжести и силой трения пренебречь

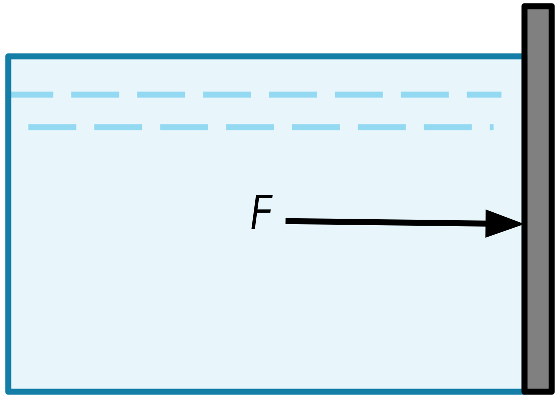
Дано:	**Решение**
b = 5 м *h = 2 м* *H= 4 м* a=60° *T = ?*	

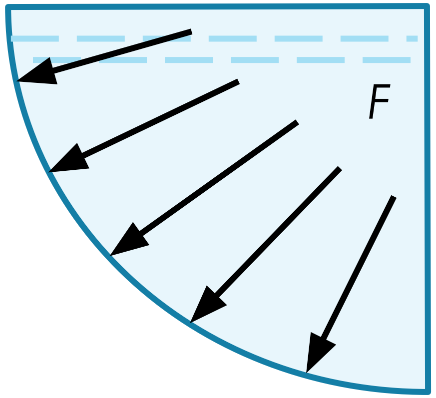
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

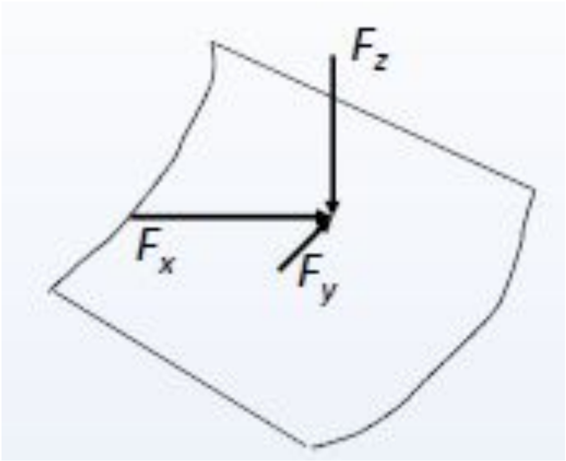
Тема 3.
Сила гидростатического давления на криволинейные поверхности

Общие положения

При определении силы давления *F* на криволинейные поверхности неизвестна не только точка приложения силы, но и ее направление (в отличие от плоских поверхностей), так как в каждой точке направление силы нормально поверхности.





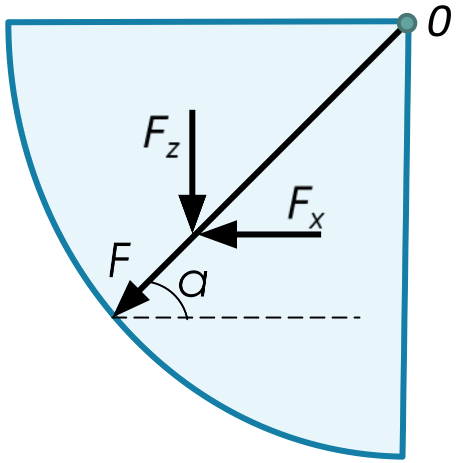


В подобном случае результирующая сила давления будет определяться как векторная сумма ее проекций на координатные плоскости:

$$F = \sqrt{F^2{}_x + F^2{}_y + F^2{}_z}$$

Сила давления на цилиндрические поверхности

Необходимо определить составляющие силы *F*:



$$\underbrace{F = \sqrt{F_{x\,(гор)}^{2} + F_{z\,(верт)}^{2}}}_{\text{двухмерная плоская задача}}$$

F_x – горизонтальная составляющая силы;

F_z – вертикальная составляющая силы;

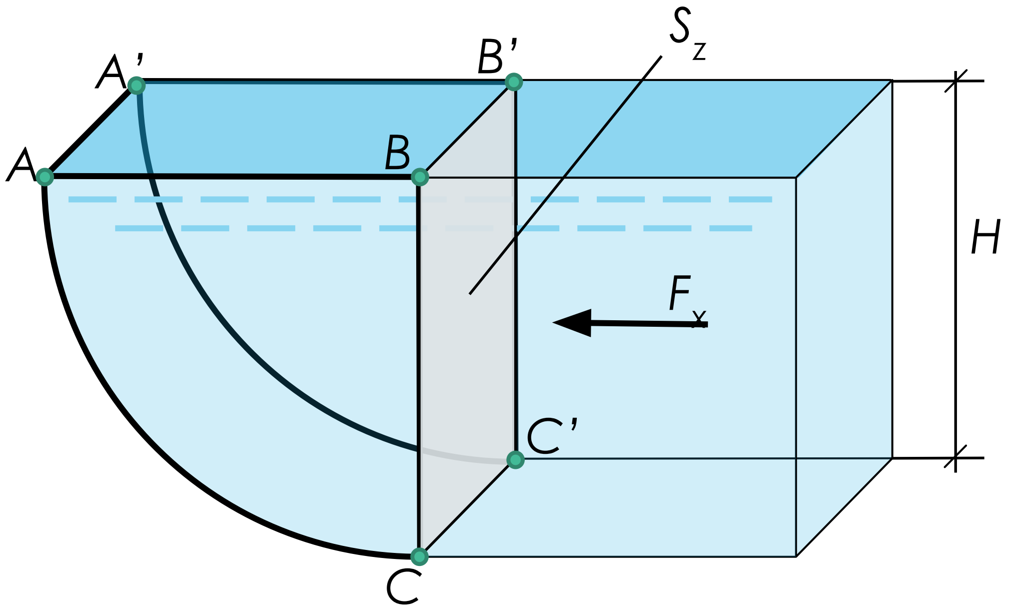
α – угол наклона силы относительно горизонтальной поверхности

$$\alpha = arctg\,\frac{F_z}{F_x}$$

** Если образующая цилиндрической поверхности описывает окружность, то сила *F* пройдет через центр окружности (точка *0* на рисунке)

Горизонтальная составляющая силы (F_x)

Горизонтальная составляющая силы давления на цилиндрическую поверхность равна силе давления на ее вертикальную проекцию



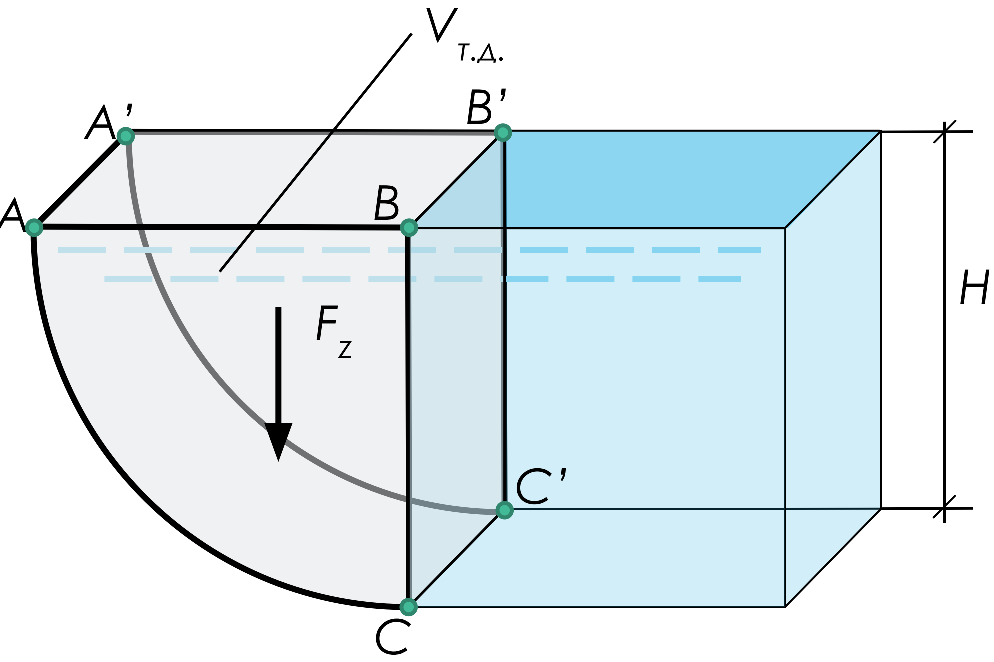
$$F_x = \rho g h_C S_z$$

h_C – глубина над центром тяжести (BB'CC') ($h_C = \frac{H}{2}$)

S_z – площадь проекции заданной поверхности на вертикальную плоскость

Вертикальная составляющая силы (F_z)

Вертикальная составляющая силы давления на цилиндрическую поверхность равна весу жидкости ($\gamma = \rho g$) в объеме тела давления V.



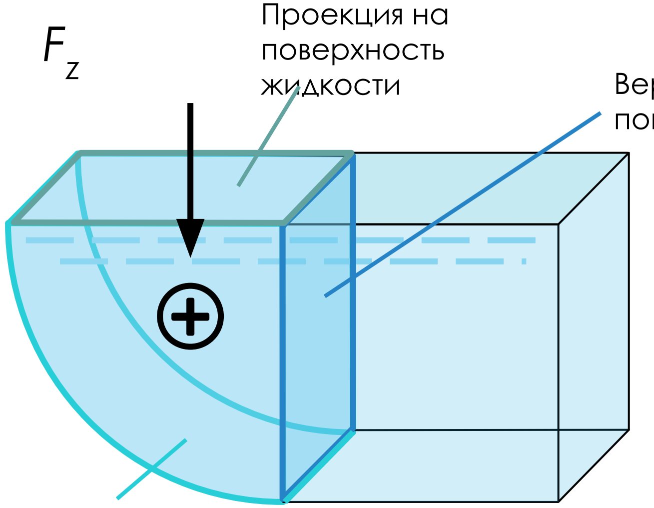
$$F_z = \rho g V_{т.д.} = \rho g S_{т.д.} \cdot b$$

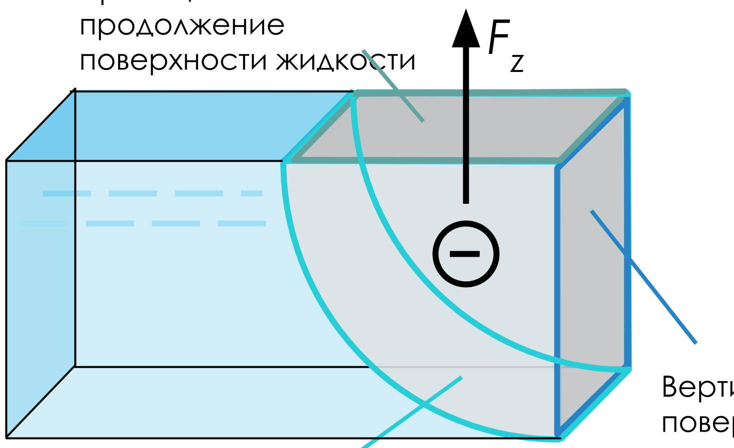
$S_{т.д.}$ – площадь тела давления ($S_{т.д.}$ = ABC или $A'B'C'$)

b – ширина тела давления (b = AA', или BB', или CC')

Определение объема тела давления

Объем тела давления представляет собой объем, ограниченный цилиндрической поверхностью, ее проекцией на поверхность жидкости или ее продолжение, а также вертикальными поверхностями, соединяющими границы цилиндрической поверхности с соответствующими точками ее проекции.



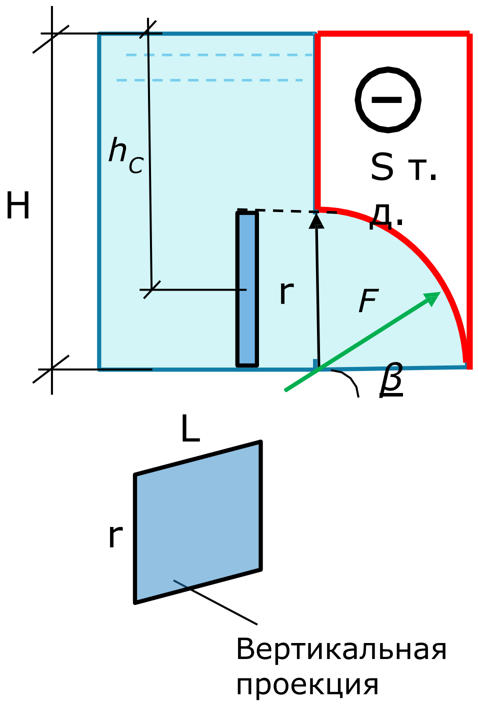


Тело давления положительное, если объем заполнен жидкостью

$F_z = F_{тяж}$
и совпадает по направлению

Тело давления отрицательное (мнимое), если объем не заполнен жидкостью

$F_z = F_{тяж}$,
но противоположна по направлению



Внизу вертикальной стенки резервуара с водой имеется фасонная часть виде ¼ цилиндра поверхности. Определить силу давления на эту часть, если r = 0,4 м, H=1,2м, длина образующей L=0,8 м

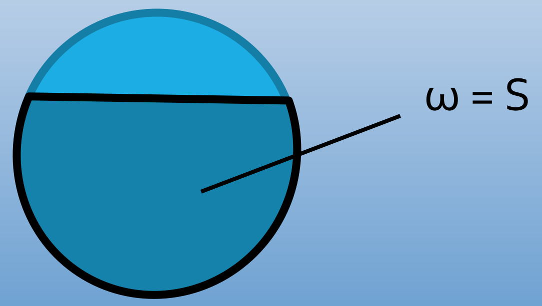
Дано:	Решение
$r = 0,4$ м $H = 1,2$ м $L = 0,8$ м $F = ?$ $\beta = ?$	Записываем уравнение силы давления на криволинейные поверхности: $F=\sqrt{F^2_{x(гор)}+F^2_{z(верт)}}$. 1. Находим горизонтальную составляющую силы F: $F_x=\rho g h_C S_z$ $h_C=(H-r/2)$ – центр тяжести вертикальной проекции криволинейной поверхности ; $S_z = L\cdot r$ – площадь вертикальной проекции $F_x=\rho g\cdot(H-r/2)\cdot L\cdot r = 1000\cdot 9,81\cdot(1,2-0,4/2)\cdot 0,8\cdot 0,4= 3,14$ кН Находим тело давления на рисунке и определяем знак и направление силы F. 2. Находим вертикальную составляющую силы F: $F_z=\rho g V_{т.д.}=\rho g S_{т.д.}\cdot b$ $S_{т.д.}=S_{прямоуг.}-S_{сектора}=H\cdot r-\frac{\pi r^2}{4}$ $F_{z(верт)}=\rho g\cdot(H\cdot r-\frac{\pi r^2}{4})\cdot L=1000\cdot 9,81\cdot(1,2\cdot 0,4-\frac{3,14\cdot 0.4^2}{4})\cdot 0,8= 2,74$ кН 3. Находим силу давления на криволинейную поверхность: $F=\sqrt{F^2_{x(гор)}+F^2_{z(верт)}}=\sqrt{3,14^2+2,74^2}=4,17$ кН 4. Находим угол приложения силы F: $\beta = arctg\frac{F_z}{F_x}=arctg\frac{2,74}{3,14}=42^o$

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

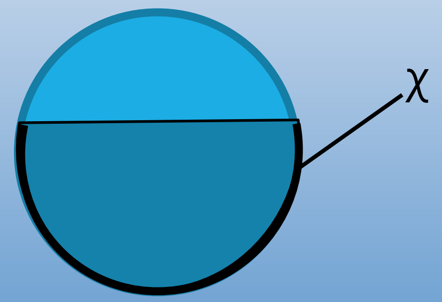
Тема 5.
Уравнение Бернулли для вязкой (реальной) жидкости

Основные параметры потока

Живое сечение (ω), [м²]



Смоченный периметр (χ), [м]



Гидравлический радиус (R), [м]. $R = \omega/\chi$

Расход (Q), [м^3/с, м^3/ч, л/с, л/ч] – количество жидкости, протекающее в единицу времени через живое сечение потока. $Q = v\omega$, где v – скорость движения потока [м/с]

Основные уравнения динамики

1. Уравнение Бернулли.

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum h, \text{ [м], где:}$$

z – отметка выбранного сечения относительно заданной оси (геодезический напор);

$\frac{P}{\rho g}$ – пьезометрический напор (P – избыточное давление в сечении);

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ – скоростной напор (v – скорость в направлении, перпендикулярном сечению); кинетическая энергия потока

α – коэффициент Кориолиса. (Определяется в зависимости от режима движения жидкости);

$z + \frac{P}{\rho g}$ – потенциальная энергия потока (пьезометрическая линия);

$z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ – напорная линия;

$\sum h$ – потери напора по ходу движения жидкости за счет гидравлических сопротивлений:

$$\sum h = h_l + h_м$$

Основные уравнения динамики

Режимы движения жидкости

Re = (*число Рейнольдса*)

– коэффициент кинематической вязкости

Ламинарный

Re < 2320

α = 2

Турбулентный

Re ≥ 2320

α = 1

$h_м$ – местные потери напора (на поворотах, при изменении d трубы, при входе и выходе из трубопровода в резервуар, на задвижках и т.д.)

$h_м = \zeta \frac{v^2}{2g}$, где:

ζ – коэффициент местного сопротивления

2320– критическое значение Re

1) *Re* ≥ 2320 * (турбулентный):

а) область гидравлически гладких труб:

Re ≤

λ =

б) переходная область:

< *Re* <

λ = 0,11

в) область гидравлически шероховатых труб:

Re ≥

λ = 0,11

Δэ – эквивалентная шероховатость.

* Если: 1) мы не знаем материал труб и не можем определить Δэ;

2) нам неизвестна *t* жидкости и мы не можем определить η,

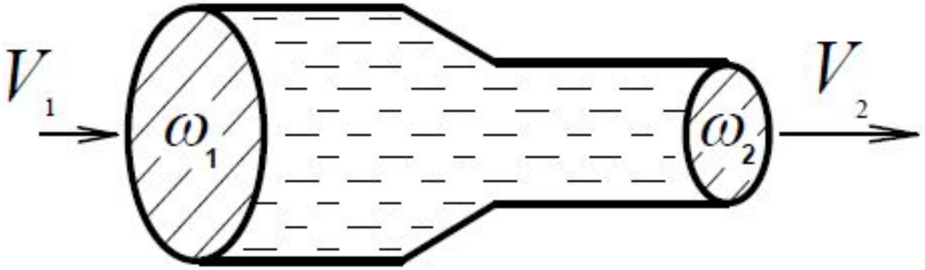
то вне зависимости от режима движения:

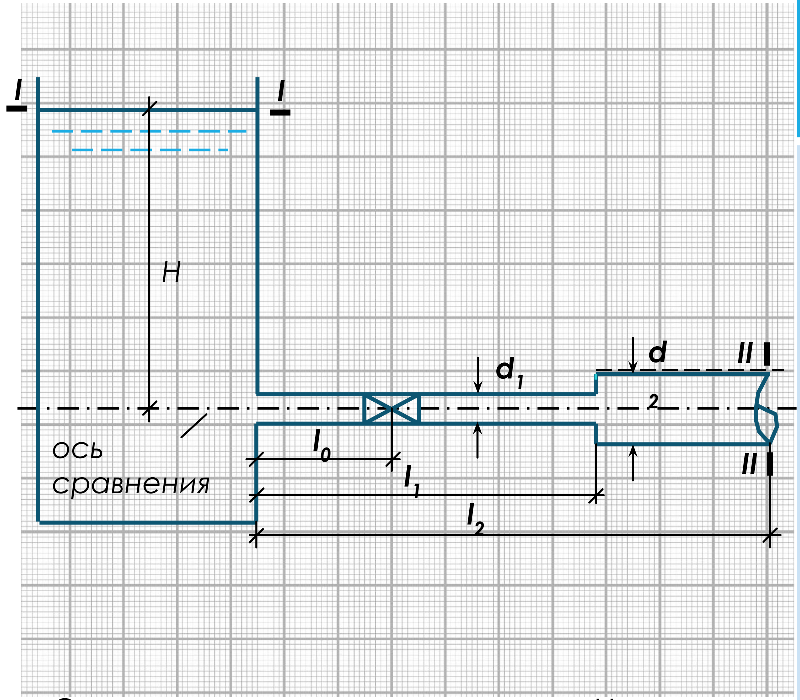
$$\lambda = \frac{0{,}021}{d^{0,3}}$$

Основные уравнения динамики

2. Уравнение неразрывности движения жидкости.

$$Q_1 = Q_2 = \ldots = Q_n$$
$$\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = \ldots \omega_n v_n$$





Определить напор в резервуаре H и расход воды Q (t = 15°С), протекающий по трубопроводу из чугуна, имеющего переменное сечение: d_1 = 100 мм, d_2 = 120 мм, Общая длина трубопровода l_2 = 100 м. Длина участка меньшего диаметра l_1 = 70 м, причем на расстоянии l_0 = 30 м от начала участка трубопровода имеется задвижка, наполовину закрытая. Скорость потока на выходе из трубы v_2 = 1 м/с.

Задача

Дано:

$t_в$ = 15°C
$\eta = 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ м²/с
чугун
$\Delta э$ = 0,5 мм
d_1 = 100 мм
d_2 = 120 мм
l_2 = 100 м
l_1 = 70 м
l_0 = 30 м
задвижка закрыта на ½
v_2 = 1 м/с
Q - ?
H - ?

Решение

1. Отмечаем на рисунке сечения I-I (на поверхности жидкости в баке) и II-II (на конце трубопровод
2. Отмечаем на рисунке горизонтальную ось сравнения (по оси трубопровода).
3. Записываем уравнение Бернулли для выбранных сечений:

$$z_I + \frac{P_I}{\rho g} + \frac{\alpha_I v_I^2}{2g} = z_{II} + \frac{P_{II}}{\rho g} + \frac{\alpha_{II} v_{II}^2}{2g} + \sum h$$

$$\boxed{z_I = H;\ P_I = 0;\ v_I = 0;\ z_{II} = 0;\ P_{II} = 0;\ \alpha_{II} = 1;\ v_{II} = 1;\quad \sum h = h_{вх} + h_{l0} + h_{зад} + h_{(l1\text{-}l0)} + h_{расш} + h_{(l2\text{-}l1)}} \longrightarrow$$

4. Переписываем уравнение Бернулли с найденными значениями:

$$H + 0 + 0 = 0 + 0 + \frac{\alpha_{II} v_{II}^2}{2g} + \sum h;\ H = \frac{v_{II}^2}{2g} + h_{вх} + h_{l0} + h_{зад} + h_{(l1\text{-}l0)} + h_{расш} + h_{(l2\text{-}l1)}$$

5. Далее определяем число Рейнольдса для каждого участка трубопровода: Re_1 и Re_2:

$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\eta}$ – необходимо определить v_1.

Из условия неразрывности жидкости: $Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2$ $\longrightarrow$

$$Q = \frac{\pi d_2^2}{4} \cdot v_2 = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}12^2}{4} \cdot 1 = 0{,}013\ м^3/с. \longrightarrow v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0{,}013}{3{,}14 \cdot 0{,}1^2} = 1{,}44\ м/с.$$

Теперь находим Re_1, Re_2:

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\eta} = \frac{1{,}44\ 0{,}1}{1{,}15 \cdot 10^{-6}} = 125217 > 2320$$ турб. реж., α = 1.

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\eta} = \frac{1 \cdot 0{,}12}{1{,}15 \cdot 10^{-6}} = 104348 > 2320$$ турб. реж., α = 1.

6. Определяем области труб, чтобы посчитать коэффициент Дарси (λ):

1-ый участок: проверяем условие гидравлически шероховатых труб: $Re_l \geq \frac{500 \cdot d_l}{\Delta э}$; $\frac{500 \cdot 0{,}1}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 100000$;

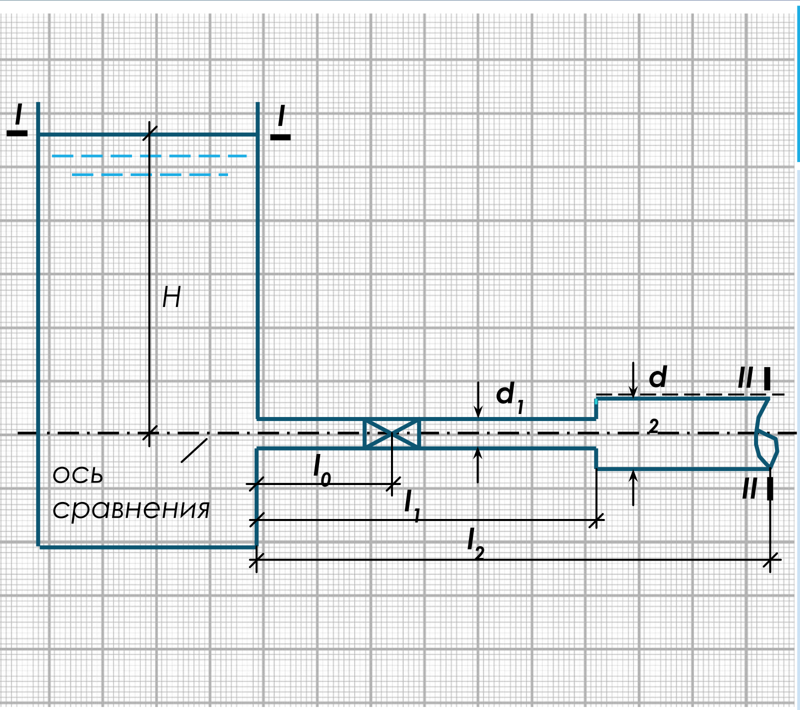
2-ой участок: проверяем условие гидравлически шероховатых труб: $Re_2 \geq \frac{500 \cdot d_2}{\Delta э}$; $\frac{500 \cdot 0{,}12}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 120000$; Re 120000

проверяем условие переходной области: $\frac{20 \cdot d_2}{\Delta э} < Re_2 < \frac{500 \cdot d_2}{\Delta э}$; $\frac{20 \cdot d_2}{\Delta э} = \frac{20 \cdot 0{,}12}{0{,}5 \cdot 10^{-3}} = 4800$; $4800 < Re_2 < 12000$

7. Исходя из найденной области труб, определяем коэффициент Дарси:

$$\lambda_l = 0{,}11 \left(\frac{\Delta э}{d_l}\right)^{0{,}25} = 0{,}11 \left(\frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}1}\right)^{0{,}25} = 0{,}029;$$

$$\lambda_2 = 0{,}11 \left(\frac{68}{Re_2} + \frac{\Delta э}{d_2}\right)^{0{,}25} = 0{,}11 \left(\frac{68}{104348} + \frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}12}\right)^{0{,}25} = 0{,}029.$$



Определить расход воды Q (t = 15°C), протекающий по трубопроводу из чугуна, имеющего переменное сечение: d_1 = 100 мм, d_2 = 120 мм. Общая длина трубопровода l_2 = 100 м. Длина участка меньшего диаметра l_1 = 70 м, причем на расстоянии l_0 = 30 м от начала участка трубопровода имеется задвижка, наполовину закрытая. Скорость потока на выходе из трубы v_2 = 1 м/с. Построить напорную и пьезометрическую линии и определить напор в резервуаре H.

Дано:

$t_в$ = 15°C
$\eta = 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ м^2/с
чугун
$\Delta э$ = 0,5 мм
d_1 = 100 мм
d_2 = 120 мм
l_2 = 100 м
l_1 = 70 м
l_0 = 30 м
задвижка закрыта на ½
v_2 = 1 м/с
Q - ?
H - ?

Решение

8. Считаем значения скоростного напора:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{1 \cdot 1{,}44^2}{19{,}6} = 0{,}106 \text{ м} \qquad \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = \frac{1 \cdot 1^2}{19{,}6} = 0{,}051 \text{ м}$$

9. Определяем потери напора:

$$h_{вх} = \zeta_{вх} \frac{v_1^2}{2g} = 0{,}5 \cdot 0{,}106 = 0{,}05 \text{ м.}$$

$$h_{l0} = \lambda_1 \cdot \frac{l_0}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = 0{,}029 \cdot \frac{30}{0{,}1} \cdot 0{,}106 = 0{,}92 \text{ м.}$$

$$h_{зад} = \zeta_{зад} \frac{v_1^2}{2g} = 2{,}06 \cdot 0{,}106 = 0{,}22 \text{ м.}$$

$$h_{(l1\text{-}l0)} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1 - l_0}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = 0{,}029 \cdot \frac{40}{0{,}1} \cdot 0{,}106 = 1{,}23 \text{ м.}$$

$$h_{расш} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1\right)^2 \cdot 0{,}051 = 0{,}01 \text{ м.}$$

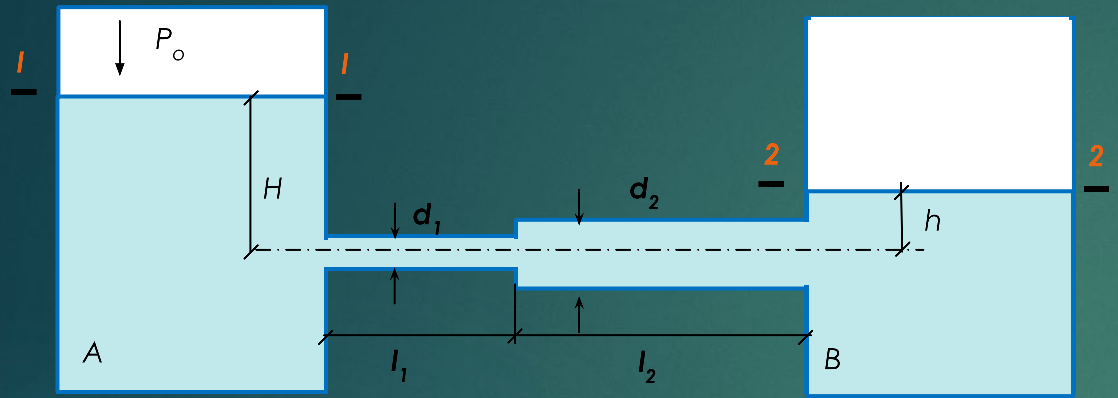
$$h_{(l2\text{-}l1)} = \lambda_2 \cdot \frac{l_2 - l_1}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g} = 0{,}029 \cdot \frac{100-70}{0{,}12} \cdot 0{,}051 = 0{,}37 \text{ м.}$$

10. Считаем значения напора H:

$$H = \frac{1^2}{19{,}6} + 0{,}05 + 0{,}92 + 0{,}22 + 1{,}23 + 0{,}01 + 0{,}37 = 2{,}85 \text{ м.}$$

Задача 2

Резервуары А и В соединены горизонтальной новой чугунной трубой переменного сечения: l_1=10 м, d_1=50 мм, l_2= 6 м, d_2=100 мм. Напор воды в резервуаре А при $t^0_в$ =15 ℃ H=8 м. Определить расход воды в трубопроводе, если манометрическое давление P_0=0,2 МПа и h=2 м.



чугун
$Δэ = 0{,}5$ мм
$l_1 = 10$ м
$d_1 = 50$ мм
$l_2 = 6$ м
$d_2 = 100$ мм

$t_в = 15°C$
$\eta = 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ м²/с
$H = 8$ м
$h = 2$ м
$P_0 = 0{,}2$ МПа

Q - ?

Решение:
- На рисунке показываем сечения 1-1 и 2-2 на поверхности воды в резервуарах.
- Ось сравнения выбираем по оси трубопровода, т.к. он горизонтальный
- Записываем уравнение Бернулли для выбранных сечений:

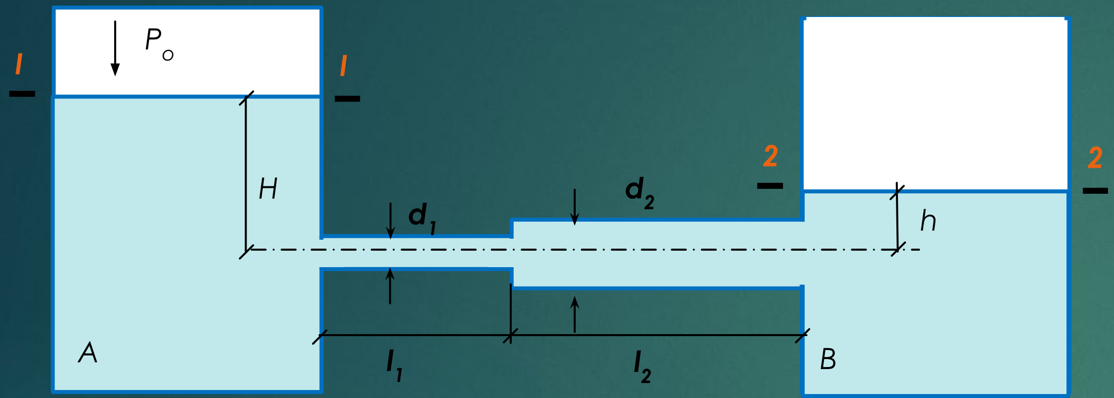
$$z_1+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}=z_2+\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}+\Sigma h$$

$$\boxed{z_1=H, P_1=P_0,\ v_1=0, z_2=h\ P_2=0, v_2=0}$$

$$H+\frac{P_0}{\rho g}=h+h_{вх}+h_{l1}+h_{рас}+h_{l2}+h_{вых}$$

$$H+\frac{P_0}{\rho g}-h=\zeta_{вх}\frac{v_1{}^2}{2g}+\lambda_1\cdot\frac{l_1}{d_1}\cdot\frac{v_1{}^2}{2g}+(1-\frac{d_1{}^2}{d_2{}^2})^2\frac{v_1{}^2}{2g}+\lambda_2\cdot\frac{l_2}{d_2}\cdot\frac{v_2{}^2}{2g}+\zeta_{вых}\frac{v_2{}^2}{2g}$$

$$H+\frac{P_0}{\rho g}-h=8+\frac{0{,}2\cdot10^6}{10^3\cdot9{,}81}-2=26{,}4$$



Резервуары А и В соединены горизонтальной новой чугунной трубой переменного сечения: l_1=10 м, d_1=50 мм, l_2= 6 м, d_2=100 мм. Напор воды в резервуаре А при $t^0_в$ =15 ℃ H=8 м. Определить расход воды в трубопроводе, если манометрическое давление P_0=0,2 Мпа и h=2 м.

Решение:

- Выразим скорость v_2 через v_1 и подставим в упрощённое уравнение Бернулли:

$$\omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 \rightarrow v_2 = v_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

$$26{,}4 = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \left[\zeta_{вх} + \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} + \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 + \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{d_1^4}{d_2^4} + \zeta_{вых} \frac{d_1^4}{d_2^4}\right]$$

- Задаемся областью гидравлически шероховатых труб и считаем коэффициенты Дарси для 1-го и 2-го участков:

$$\lambda_1 = 0{,}11 \left(\frac{\Delta э}{d_1}\right)^{0,25} = 0{,}11 \left(\frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}05}\right)^{0,25} = 0{,}035$$

$$\lambda_2 = 0{,}11 \left(\frac{\Delta э}{d_2}\right)^{0,25} = 0{,}11 \left(\frac{0{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}1}\right)^{0,25} = 0{,}029$$

- Решаем уравнение:

$$26{,}4 = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \left[0{,}5 + 0{,}035 \cdot \frac{10}{0{,}05} + \left(1 - \frac{0{,}05^2}{0{,}1^2}\right)^2 + 0{,}029 \cdot \frac{6}{0{,}1} \cdot \frac{0{,}05^4}{0{,}1^4} + 1 \cdot \frac{0{,}05^4}{0{,}1^4}\right]$$

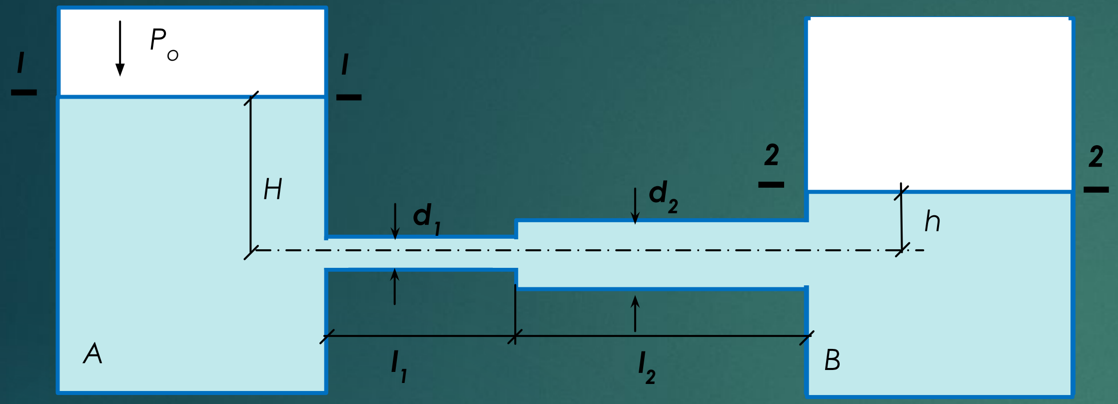
$$= 8{,}23 \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\rightarrow \frac{v_1^2}{2g} = \frac{26{,}4}{8{,}23} = 3{,}20 \text{ м} \rightarrow v_1 = \sqrt{19{,}6 \cdot 3{,}2} = 7{,}99 \text{ м/с}$$

- Проверяем выполнение условия области гидравлически шероховатых труб на 1-м участке:

$$Re \frac{\Delta э}{d_1} = \frac{v_1 d_1}{\eta} \cdot \frac{\Delta э}{d_1} = \frac{v_1 \cdot \Delta э}{\eta} = \frac{7{,}99 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3}}{1{,}15 \cdot 10^{-6}} = 3474 > 500$$

Область выбрана верно



Резервуары А и В соединены горизонтальной новой чугунной трубой переменного сечения: l_1=10 м, d_1=50 мм, l_2= 6 м, d_2=100 мм. Напор воды в резервуаре А при $t^0_в$ =15 ℃ H=8 м. Определить расход воды в трубопроводе, если манометрическое давление P_0=0,2 Мпа и h=2 м.

Решение:

- Считаем скорость v_2 и проверяем выполнение условия области гидравлически шероховатых труб на 2-м участке

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} = 7{,}99 \cdot \frac{0{,}05^2}{0{,}1^2} = 2 \text{ м/с}$$

$$Re \cdot \frac{\Delta э}{d_2} = \frac{v_2 d_2}{\eta} \cdot \frac{\Delta э}{d_2} = \frac{v_2 \cdot \Delta э}{\eta} = \frac{2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3}}{1{,}15 \cdot 10^{-6}} = 869 > 500$$

Область выбрана верно. Следовательно, коэффициенты Дарси посчитаны правильно.

Скоростной напор на 2-м участке $\frac{v_2^2}{2g} = \frac{2^2}{19{,}6} = 0{,}2$ м

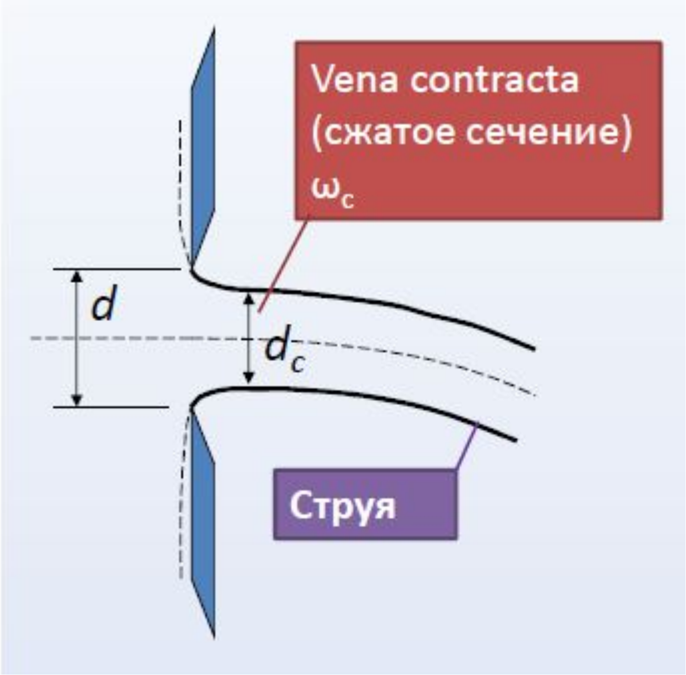
- Определяем расход

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}05^2}{4} \cdot 7{,}99 = 0{,}016 \text{ м}^3/\text{с} = 16 \text{ л/с}$$

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Тема 6.
Истечение жидкости через отверстия и насадки

Основные понятия



В разделе рассматриваются случаи малых отверстий и тонкой стенки

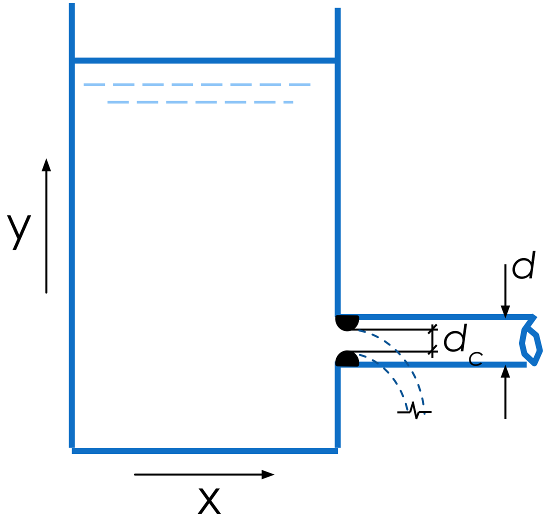
Стенка считается тонкой, если вытекающая струя соприкасается лишь с кромкой отверстия, обращенной внутрь сосуда, и не касается боковой поверхности отверстия. Толщина стенки не более 2 ÷2,5 d

При прохождении жидкости через отверстие или внутри насадка происходит сжатие струи, то есть уменьшение диаметра. Ее минимальный диаметр будет на некотором расстоянии (примерно 0,5d) за отверстием.

Коэффициент сжатия $\varepsilon = \dfrac{\omega_c}{\omega}$, где ω_c - площадь сжатого сечения,

ω – площадь сечения

Насадки



Насадок – прикрепленный к отверстию патрубок (маленький кусок трубы), длина которого $l \leq 3 \div 4\ d$

Струя жидкости после вхождения в насадок через простое круглое отверстие , подвергается сжатию ($d_c \approx 0{,}8d$), а потом расширяется и заполняет все сечение. Коэффициент сжатия $\varepsilon = 1$

По распоряжению насадки бывают внешние и внутренние.

Классификация по форме приведена на рисунке

а - цилиндрический внешний; *б* -конический расходящийся; *в* - конический сходящийся; ; *г* - цилиндрический внутренний; *д* - коноидальный; *е* - комбинированный.

Характеристики отверстия и различных насадков:

	Отверстие	Внешний цилиндрический насадок	Внутренний цилиндрический насадок	Конически сходящийся насадок	Конически расходящийся насадок	Коноидальный насадок
Коэффициент сжатия ε	0,64	1	1	0,98	1	1
Коэффициент скорости ϕ	0,97 - 0,98	0,82	0,71	0,94	0,45 - 0,5	0,97
Коэффициент расхода μ	0,62	0,82	0,71	0,94	0,45 - 0,5	0,97
Коэффициент сопротивления ζ	0,06	0,48	0,98	0,08	3,0 – 3,94	0,06

1. Скорость истечения

$$1.\ v = \varphi\sqrt{2gH_0},$$ где:

φ – коэффициент скорости;

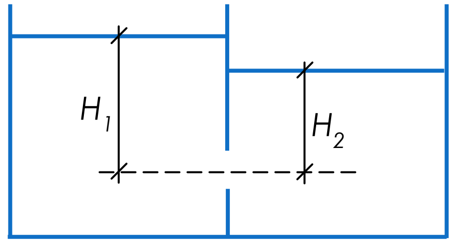
H_0 – напор истечения: $H_0 = H + \dfrac{P_0 - P}{\rho g}$,

$(P_0 - P)$ – разница давлений в резервуаре и снаружи,

H – напор (слой вышележащей жидкости)*.

* Если истечение происходит не в газ, а в другую жидкость, то:

$$H = H_1 - H_2$$



2. Расход жидкости через отверстие или насадок.

3. Скорость опорожнения

$$2.\ Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0},$$ где:

μ – коэффициент расхода

ω – площадь сечения

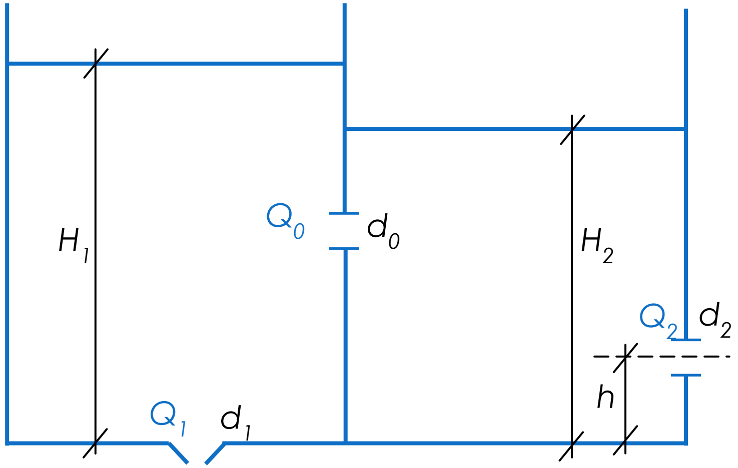
$$3.\ t_{оп} = \frac{2W}{Q_1},$$ где:

W – начальный объем жидкости в резервуаре;

Q_1 – расход жидкости через отверстие в начальный момент времени.

Типы задач

При постоянном напоре *H* $\sum Q_{вх} = \sum Q_{вых}$	**При переменном напоре *H*** $\sum Q_{вх} \neq \sum Q_{вых}$ **(задачи на определение $t_{оп}$)**



Резервуар разделен тонкой стенкой, в которой имеется круглое отверстие диаметром $d_0 = 30$ мм. Диаметр конически сходящегося насадка, через который вытекает вода из первого отсека $d_1 = 15$ мм; диаметр внешнего цилиндрического насадка, через который вытекает вода из второго отсека $d_2 = 20$ мм. Определить расход воды из бака Q и глубину H_2 во втором отсеке, если глубина воды в первом отсеке $H_1 = 1{,}25$ м, а расстояние от дна до центра цилиндрического насадка $h = 0{,}2$м. Движение воды в резервуаре установившееся.

Задача

Дано:

$d_0 = 30$ мм

$d_1 = 15$ мм

$d_2 = 20$ мм

$H_1 = 1{,}25$ м

$h = 0{,}2$ м

$Q = ?$

$H_2 = ?$

Решение

Исходя из того, что движение установившееся, следует: $Q = Q_1 + Q_2$ и $Q_0 = Q_2$.

$Q_0 = Q_2$: распишем, чему равняется $Q_0 = Q_2$.

$$Q_0 = \mu_0 \omega_o \sqrt{2gH_0} = 0{,}62 \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}$$

$$Q_2 = \mu_2 \omega_2 \sqrt{2gH_0} = 0{,}82 \frac{\pi d_2^2}{4} \sqrt{2g(H_2 - h)}$$

Уравниваем их : $0{,}62 \cdot d_0^2 \sqrt{(H_1 - H_2)} = 0{,}82 \cdot d_2^2 \sqrt{(H_2 - h)}$

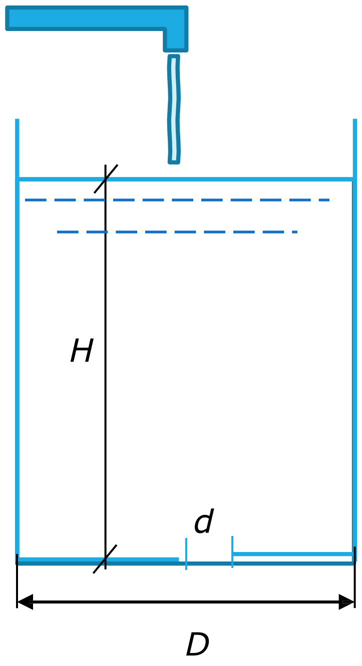
Подставляем значения : $0{,}62 \cdot (0{,}03)^2 \sqrt{(1{,}25 - H_2)} = 0{,}82 \cdot (0{,}02)^2 \sqrt{(H_2 - 0{,}2)}$

Выражаем H_2: $\sqrt{(1{,}25 - H_2)} = 0{,}588\sqrt{(H_2 - 0{,}2)}$; $1{,}25 - H_2 = 0{,}346\,(H_2 - 0{,}2)$;
$1{,}25 - H_2 = 0{,}346\, H_2 - 0{,}069$; $H_2 = 0{,}98$ м.

Распишем и посчитаем, чему равняется Q_1: $Q_1 = \mu_1 \omega_1 \sqrt{2gH_0} = 0{,}94 \frac{\pi d_1^2}{4} \sqrt{2gH_1} =$
$= 0{,}94 \frac{3{,}14 \cdot (0{,}015)^2}{4} \sqrt{19{,}6 \cdot 1{,}25} = 0{,}00082$ м³/с $= 0{,}82$ л/с.

Считаем Q_2: $Q_2 = 0{,}82 \frac{3{,}14\,(0{,}02)^2}{4} \sqrt{19{,}6\,(0{,}98 - 0{,}2)} = 0{,}001$ м³/с $= 1$ л/с.

Считаем, чему равняется Q: $Q = Q_1 + Q_2 = 0{,}82 + 1 = 1{,}82$ л/с.



В вертикальный цилиндрический сосуд диаметром D=1 м поступает вода из крана с расходом Q, которая затем вытекает через малое отверстие в дне сосуда при глубине воды в нем H=1,5 м. Определить расход Q и диаметр отверстия, если после закрытия крана сосуд опорожняется за 19 минут

Дано:	**Решение**
D= 1 м *H = 1,5 м* $t_{оп}$ = *19 мин* *Q = ?* *d=?*	Время опорожнения сосуда при переменном напоре в 2 раза больше времени наполнения того же сосуда при постоянном напоре, т.е. $t_{оп} = \frac{2W}{Q}$, где W – начальный объем воды в сосуде. Сосуд имеет форму цилиндра W= $\frac{\pi D^2}{4} \cdot H$ $Q = \frac{2\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot t_{оп}} = \frac{3{,}14 \cdot 1^2 \cdot 1{,}5}{2 \cdot 19 \cdot 60} = 0{,}039\ м^3/с = 39\ л/с$ Диаметр отверстия найдем из уравнения расхода жидкости, вытекающей из отверстия: $Q = \mu\,\omega\,\sqrt{2\,gH} = \mu \cdot \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{2\,gH}$ $\Rightarrow d = \sqrt{\frac{4Q}{\mu\pi\sqrt{2\,gH}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}039}{0{,}62 \cdot 3{,}14\sqrt{19{,}6 \cdot 1{,}5}}} = 0{,}015\ м = 15\ мм$

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

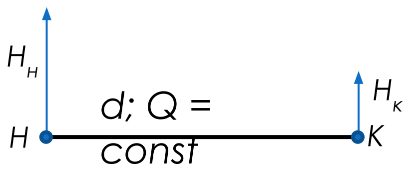
Тема 7.
Напорное движение в трубопроводах

Классификация трубопроводов

Короткие	Длинные
Трубопроводы, в которых преобладают местные потери (hм ≥ 5-10% от всех потерь) называют <u>короткими</u>. При их расчете учитываются $h_м$ и h_l.	Трубопроводы, в которых доля местных потерь мала (hм < 5-10%), называют <u>длинными</u> При их расчете учитывается только h_l.

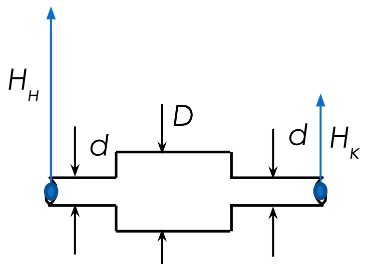
Виды трубопроводов

Простые

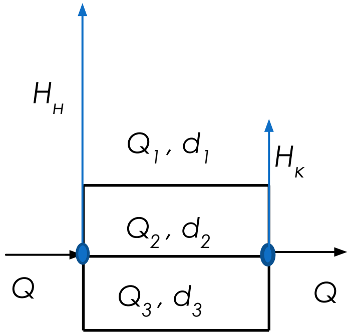


Сложные

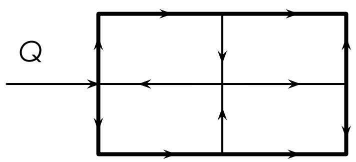
1) с последовательным соединением



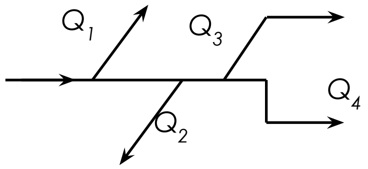
2) с параллельным соединением



3) кольцевые сети



4) разветвленные тупиковые

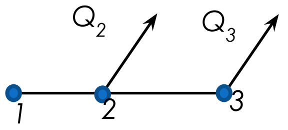


5) комбинированные (кольцевые + тупиковые)

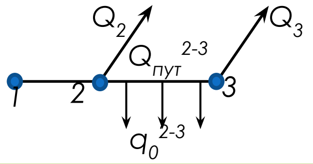
<u>Виды расходов</u>

Для сетей главными являются две характеристики: расход Q и напор H.

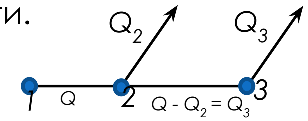
а) узловой (сосредоточенный) – Q_n – это расход, отделяющийся или присоединяющийся в конкретной точке сети.



б) путевой (распределительный) – $Q_{пут}$ – это расход, отбираемый из трубопровода непрерывно: $Q_{пут} = q_0 \cdot l$, где: q_0 – удельный путевой расход.



в) транзитный – это часть расхода трубопровода, предназначенная для снабжения жидкостью последующих участков сети.

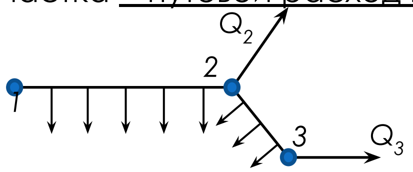


Q_3 – узловой расход для участка 2-3 и транзитный для участка 1-2.

г) расчетный – тот, по которому ведется гидравлический расчет:

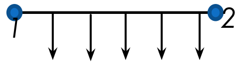
- если <u>путевой расход</u> находится на рассматриваемом участке, а <u>после</u> <u>него</u> <u>есть еще расходы</u>, расчетный расход будет находиться как <u>сумма расходов после</u> рассматриваемого участка <u>+ путевой расход на этом</u> участке, определяемый по формуле <u>$0{,}55 \cdot q_0 \cdot l$.</u>

$$Q_{расч}^{1\text{-}2} = Q_2 + Q_3 + q_0^{2\text{-}3} \cdot l_{2\text{-}3} + 0{,}55 \cdot q_0^{1\text{-}2} \cdot l_{1\text{-}2}.$$



- если <u>путевой расход</u> находится на рассматриваемом участке, а <u>после</u> него <u>нет расходов</u>, то <u>расчетным</u> расходом <u>будет путевой</u> расход на <u>этом</u> участке, определяемый по формуле <u>$0{,}58 \cdot q_0 \cdot l$</u>.

$$Q_{расч}^{1\text{-}2} = 0{,}58 \cdot q_0^{1\text{-}2} \cdot l_{1\text{-}2}.$$



Формула напора H:

$$(z_н - z_к) + \left(\frac{P_н}{\rho g} - \frac{P_к}{\rho g}\right) = \sum h_l,$$ где:

z – отметка оси трубопровода;

$\frac{P}{\rho g}$ = H – напор в сечении;

$\sum h_l$ – потери напора по длине.

Определение потерь напора по длине h_l:

Формула Шези:

$$h_l = \frac{Q^2}{K^2} \cdot l,$$ где:

K – расходная характеристика

(Если скорость движения потока отличается от установленной, то:
$K = a \cdot K$, а – коэффициент пересчета).

Формула Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = S_0 \cdot l \cdot Q^2,$$ где:

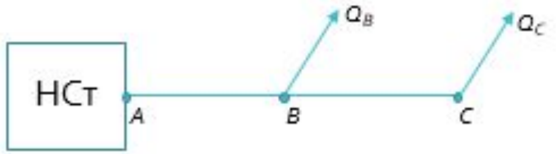
S_0 – удельное сопротивление трубопровода

! При параллельном соединении потери на пора на линиях равны

Определение диаметра трубопровода d:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v_э}} = 1{,}13\sqrt{\frac{Q}{v_э}},$$ где:

$v_э$ – экономически выгодная скорость (0,7-1,5 м/с).



Вода подается по горизонтальному пластмассовому трубопроводу, состоящему из двух последующих участков: l_{AB} = 400 м, l_{BC} = 300 м, d_{AB} = 200 мм, d_{BC} = 150 мм. Расходы воды в точках: Q_B = 15 л/с, Q_C = 12 л/с, свободный напор в конце трубопровода $H_{Св}$ = 16 м. Определить необходимое давление в точке А, а также изменение давление при уменьшении расхода в точке C на 3 л/с и одновременном его увеличении в точке B на 3 л/с.

Дано:

l_{AB} = 400 м

l_{BC} = 300 м

d_{AB} = 200 мм

d_{BC} = 150 мм

Q_B = 15 л/с

Q_C = 12 л/с

$H_{Св}$ = 16 м

P_A = ?

$_\Delta P_A$ = ? (если $Q_B + 3$, $Q_C - 3$)

Решение

1. Записываем уравнение напора: $(z_н - z_к) + \left(\frac{P_н}{\rho g} - \frac{P_к}{\rho g}\right) = \sum h_l$

Т.к. рельеф местности – равнина, отметки оси трубопровода будут на одном уровне, то $(z_н - z_к) = 0$. Напор в начальном сечении определяется как: $H_н = \frac{P_A}{\rho g}$

, а в конечном - равен свободному напору в конце трубопровода: $H_к = H_{Св} = 16$ м.

Потери напора по длине: $\sum h_l = h_{lAB} + h_{lBC}$

2. Переписываем упрощенное уравнение: $\frac{P_A}{\rho g} - H_{Св} = h_{lAB} + h_{lBC}$.

3. Выражаем давление в точке А: $P_A = (H_{Св} + h_{lAB} + h_{lBC}) \cdot \rho g$.

4. Гидравлический расчет всегда ведется с последнего участка. Находим потери напора по длине участка ВС по формуле Дарси-Вейсбаха: $h_{lBC} = S_{0BC} \cdot l_{BC} \cdot Q_{BC}^2$.

Удельное сопротивление S_{0BC} зависит от скорости на участке ВС

$Q_{BC} = Q_C = 12$ л/с $= 0{,}012$ м^3/с. $v_{BC} = \frac{4Q_{BC}}{\pi d_{BC}^2} = \frac{4 \cdot 0{,}012}{3{,}14 \cdot 0{,}15^2} = 0{,}68$ м/с.

Исходя из скорости и диаметра на участке ВС находим: $S_{0BC} = 21{,}76$ с^2/м^6.

$h_{lBC} = 21{,}76 \cdot 300 \cdot 0{,}012^2 = 0{,}94$ м.

5. Потери напора по длине участка АВ по формуле Дарси-Вейсбаха: $h_{lAB} = S_{0AB} \cdot l_{AB} \cdot Q_{AB}^2$.

$Q_{AB} = Q_B + Q_C = 15 + 12 = 27$ л/с $= 0{,}027$ м^3/с. $v_{AB} = \frac{4Q_{AB}}{\pi d_{AB}^2} = \frac{4 \cdot 0{,}027}{3{,}14 \cdot 0{,}2^2} = 0{,}86$ м/с; $S_{0AB} = 3{,}46$ с^2/м^6

$h_{lAB} = 3{,}46 \cdot 400 \cdot 0{,}027^2 = 1{,}01$ м.

6. Находим значение давления P_A: $P_A = (16 + 0{,}94 + 1{,}01) \cdot 9{,}81 \cdot 1000 = 176$ кПа.

7. Решаем вторую часть задачи. Находим потери напора по длине участка ВС:

$Q'_{BC} = Q_C - 3 = 12 - 3 = 9$ л/с $= 0{,}009$ м^3/с. $v'_{BC} = \frac{4Q'_{BC}}{\pi d_{BC}^2} = \frac{4 \cdot 0{,}009}{3{,}14 \cdot 0{,}15^2} = 0{,}51$ м/с: $S'_{0BC} = 23{,}2$ с^2/м^6.

$h'_{lBC} = 23{,}2 \cdot 300 \cdot 0{,}009^2 = 0{,}56$ м.

Т.к. суммарный расход на участке АВ не меняется, то потери напора по длине останутся прежними

8. Находим значение давления P'_A: $(16 + 0{,}56 + 1{,}01) \cdot 9{,}81 \cdot 1000 = 172$ кПа.

9. Находим разницу давлений: $_\Delta P_A = 176 - 172 = 4$ кПа.