

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

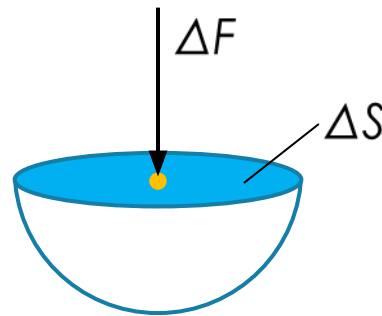
Преподаватель:
Лазурин Мария Александровна

Санкт-Петербург 2022

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

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

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



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

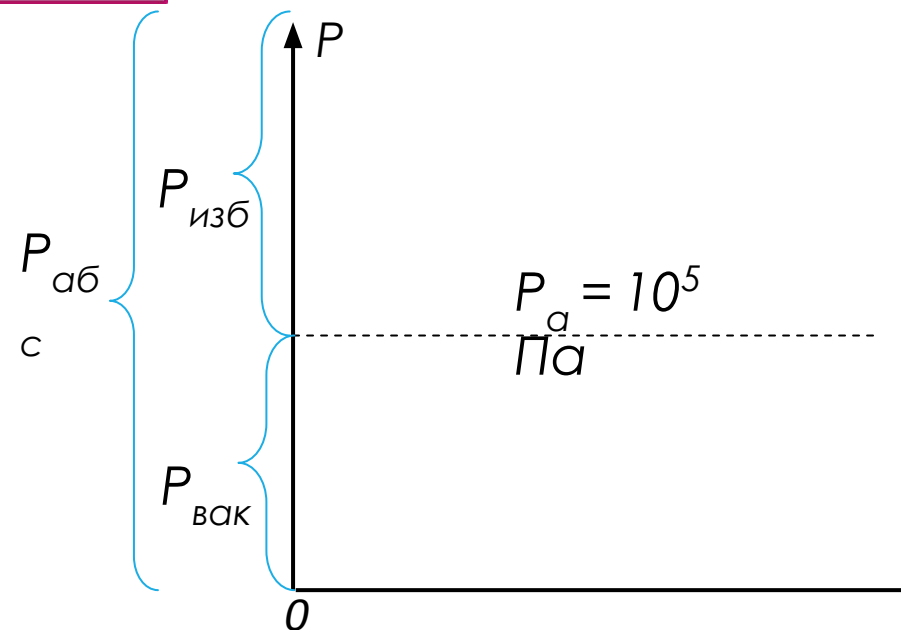
Единицы измерения и виды гидростатического давления

$$P_a = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа} = 1 \text{ бар} = 1 \text{ техн. атм.} = 1 \text{ кгс/см}^2 = \\ = 750 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

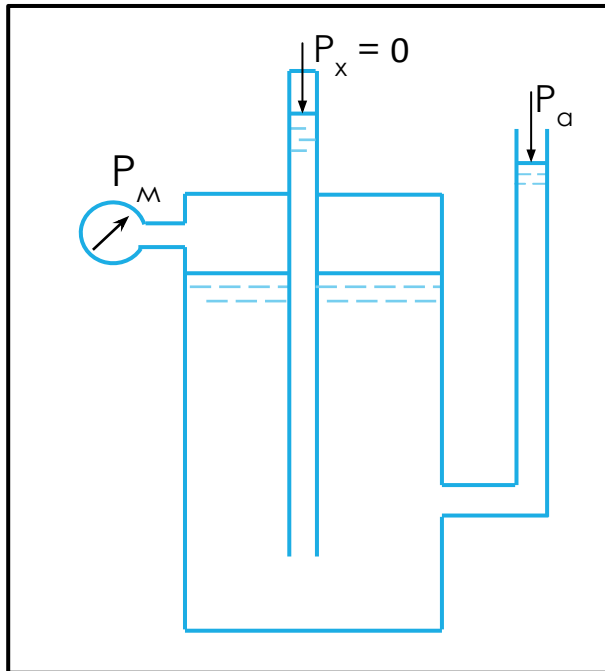
данные единицы измерения относятся уже к напору, т.е. $\frac{P}{\rho g}$

Виды гидростатического давления:

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



Обратите внимание при решении задач



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

Основное уравнение гидростатики

$$P = P_x + \rho gh$$

P – давление в точке;

P_x – давление на поверхности жидкости;

ρgh – избыточное давление, создаваемое слоем вышележащей жидкости.

Поверхность уровня или поверхность равного давления

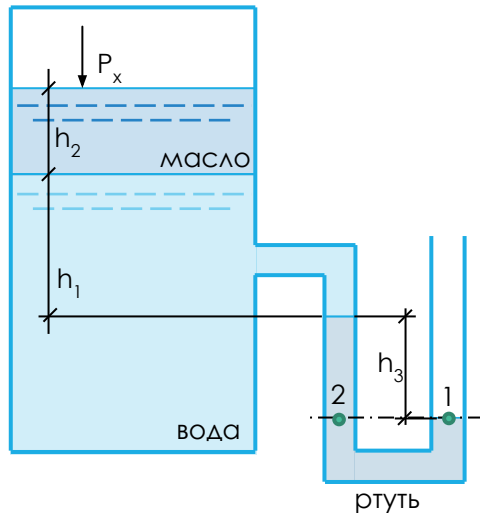
– это поверхность, во всех точках которой давление одинаково.

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 $\rho_M = 800$ кг/м³. Найти давление P_x на поверхности масла, если показания ртутного прибора $h_3 = 40$ см.



Дано:

$h_1 = 30$ см
 $h_2 = 50$ см
 $h_3 = 40$ см
 $\rho_M = 800$ кг/м³
 $\rho_{рт} = 13600$
кг/м³
 $\rho_B = 1000$ кг/м³

$P_x = ?$

Решение

1. Обозначаем 2 точки на поверхности равного давления.
2. Записываем основное уравнение гидростатики для каждой точки:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_a \\ P_2 &= P_x + g(\rho_M h_2 + \rho_B h_1 + \rho_{рт} h_3) \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$P_a = P_x + g(\rho_M h_2 + \rho_B h_1 + \rho_{рт} h_3)$$

3. Выражаем P_x :

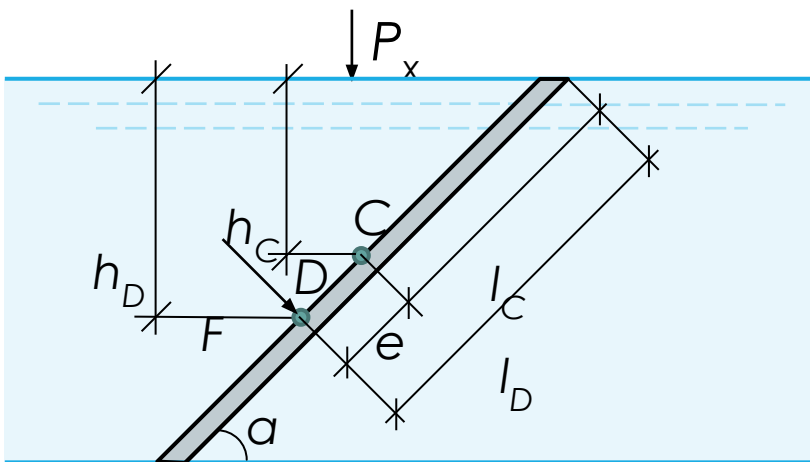
$$P_x = P_a - g(\rho_M h_2 + \rho_B h_1 + \rho_{рт} h_3) = 10^5 - 9,81(800 \cdot 0,5 + 1000 \cdot 0,3 + 13600 \cdot 0,4) = 39828 \text{ Па} = 39,83 \text{ кПа}$$



Тема 2.

Сила гидростатического давления на плоские поверхности

При расчете строительных конструкций и сооружений необходимо знать общую силу давления жидкости на сооружение или его часть, 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

α – 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 ($P_{\text{изб}}$), 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 $P_x = P_{\text{изб}}$:

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

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]

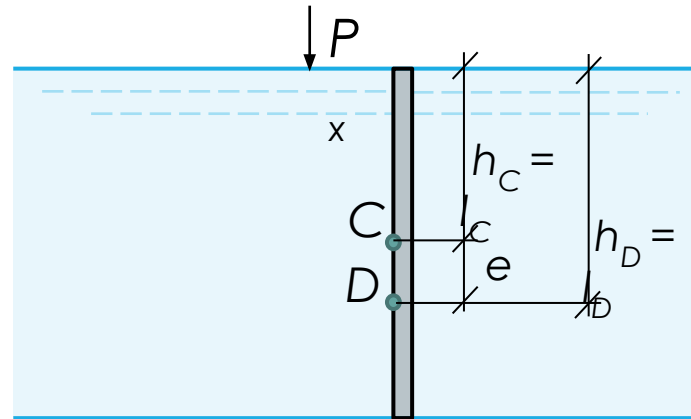
$\rho g h_C$ – избыточное давление, создаваемое слоем вышележащей жидкости, [Па]

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 .

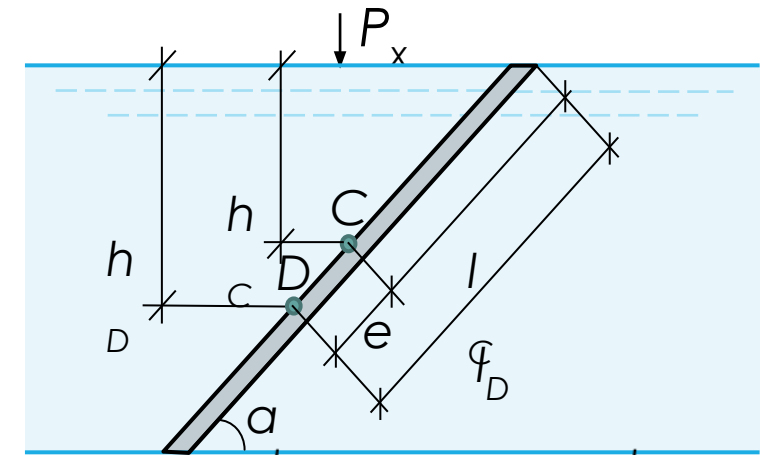
Для вертикальных стенок



$$h_C = l_C; h_D = l_D$$

$$h_D = h_C + e = h_C + \frac{l_C}{h_C \cdot S}$$

Для наклонных стенок



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

$$l_D = l_C + e = l_C + \frac{l_C}{l_C \cdot S}$$

h_D – глубина погружения центра давления смоченного участка

h_C – глубина погружения центра тяжести смоченного участка

e – величина эксцентриситета

l_C – момент инерции площади плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести плоской фигуры

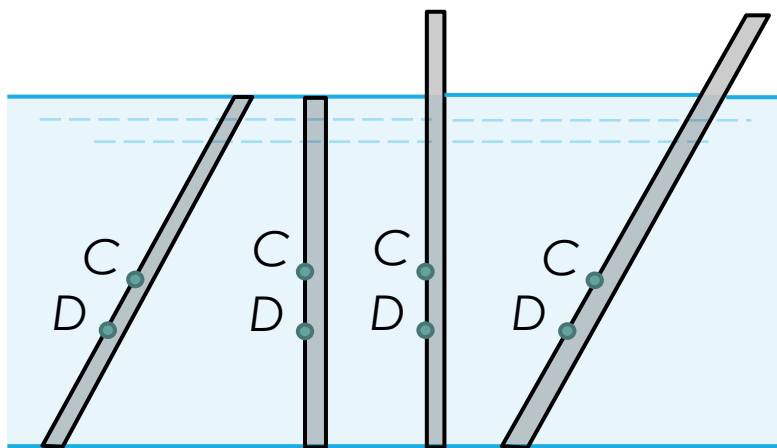
l_C – расстояние от поверхности жидкости до точки C

l_D – расстояние от поверхности жидкости до точки D

S – площадь конструкции, на которую действует жидкость

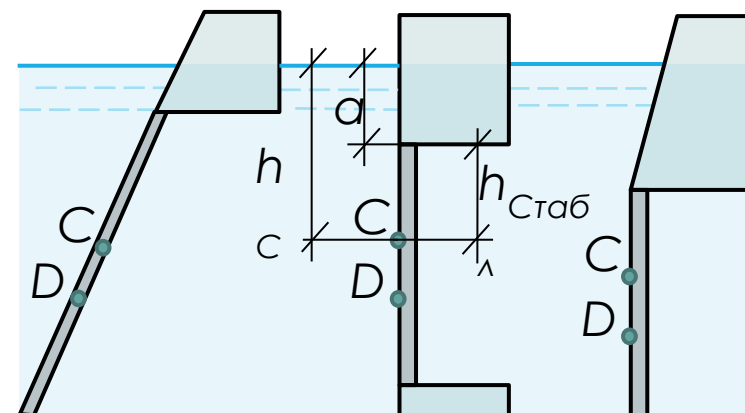
Определение h_C и h_D

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



h_C и h_D определяется по таблице

Если рассматриваемая плоская поверхность – лишь часть сооружения, на которое действует жидкость

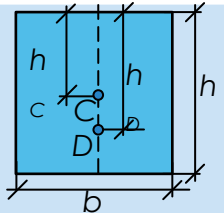
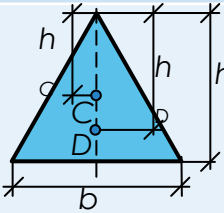
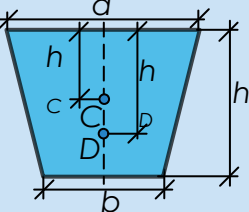
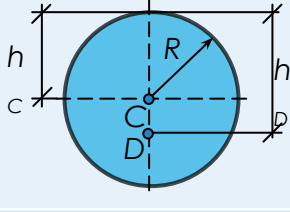
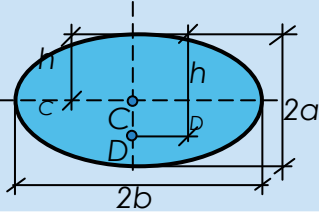
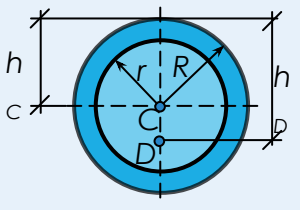


$$h_C = h_{\text{Стабл}} + a$$

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

$$\sum M_o (F_i) = 0 \quad M_o = F \cdot l$$

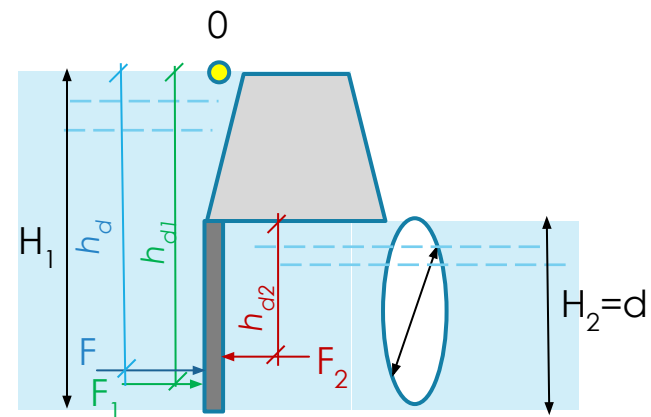
M_o – момент силы, относительно точки O

F – сила

l – плечо силы (перпендикулярно от точки приложения силы F до O)

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

$$F_1 > F_2 \rightarrow R = F_1 - F_2$$
$$M_o(R) = \sum_{i=1}^n M_o(F_i)$$



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 $H_2=2$ м

Задача

Дано:

$$H_1 = 5 \text{ м}$$

$$H_2 = d = 2 \text{ м}$$

$$F = ?; h_d = ?$$

Решение

1. На затвор действует сила давления жидкости слева F_1 и справа F_2 . Чтобы найти величину равнодействующей, найдем величины сил ее составляющих.

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

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

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

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

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

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

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

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

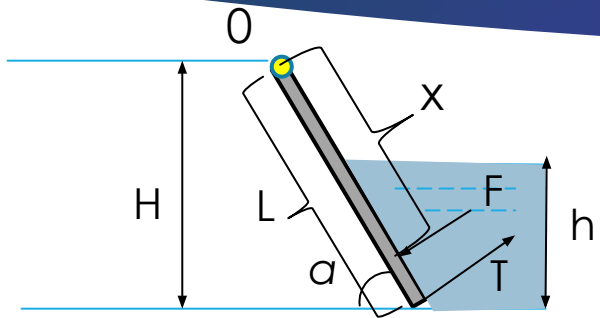
$$h_{d1} = h_{C1} + e = h_{C1} + \frac{I_C}{h_{C1} S} = H_1 - d/2 + \frac{\pi \cdot d^4 \cdot 4}{64 \cdot (H_1 - d/2) \pi \cdot d^2} = (5-1) + \frac{4}{16 \cdot (5-1)} = 4,06 \text{ м}$$

Справа вода действует только на затвор (считаем по таблице)

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

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

Задача 2



▶ Прямоугольный щит шириной $b=5$ м закреплен шарнирно в точке O . 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 $\alpha=60^\circ$. Силой тяжести и силой трения пренебречь

Дано:

$$b = 5 \text{ м}$$

$$h = 2 \text{ м}$$

$$H = 4 \text{ м}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$T = ?$$

Решение

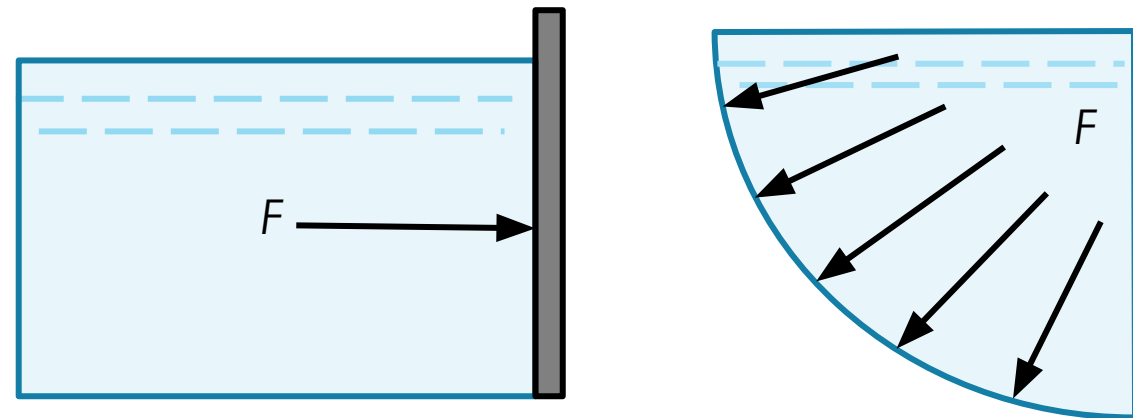
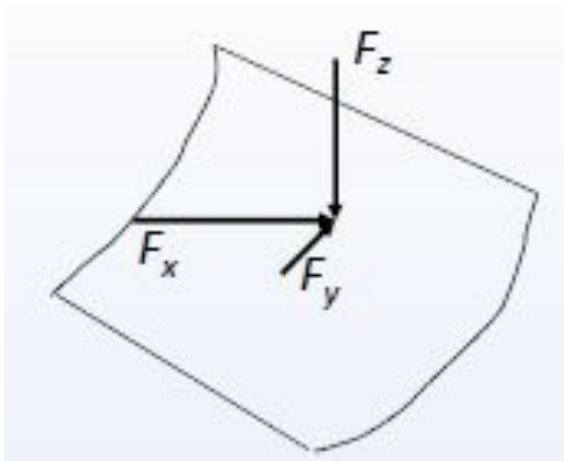


Тема 3.

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.

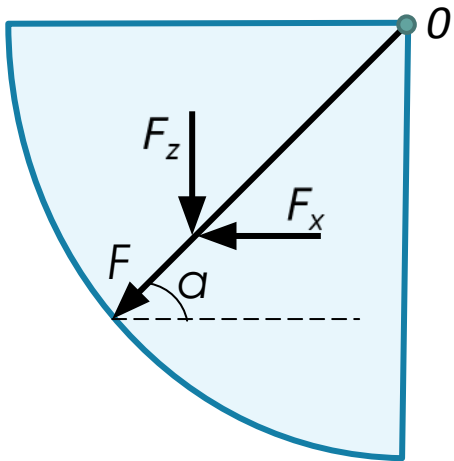


В подобном случае результирующая сила давления будет определяться как векторная сумма ее проекций на координатные плоскости:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$$

Сила давления на цилиндрические поверхности

Необходимо определить составляющие силы F :



$$F = \sqrt{F_x^2 (\text{гор}) + F_z^2 (\text{верт})}$$

двухмерная плоская задача

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

F_x – горизонтальная составляющая силы;

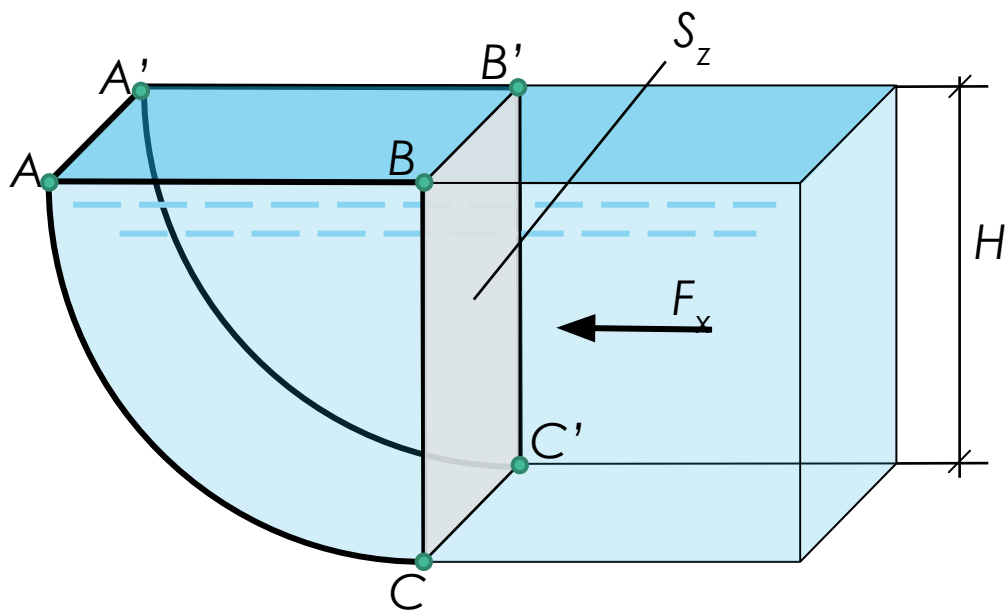
F_z – вертикальная составляющая силы;

α – угол наклона силы относительно горизонтальной поверхности

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

Горизонтальная составляющая силы (F_x)

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



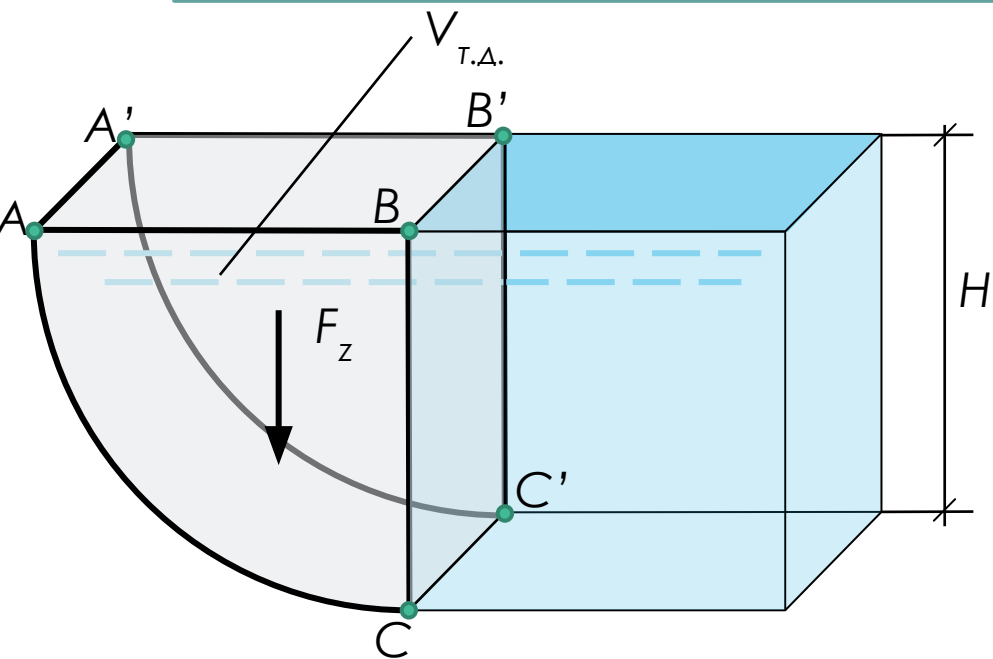
$$F_x = \rho g h_c S_z$$

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 .



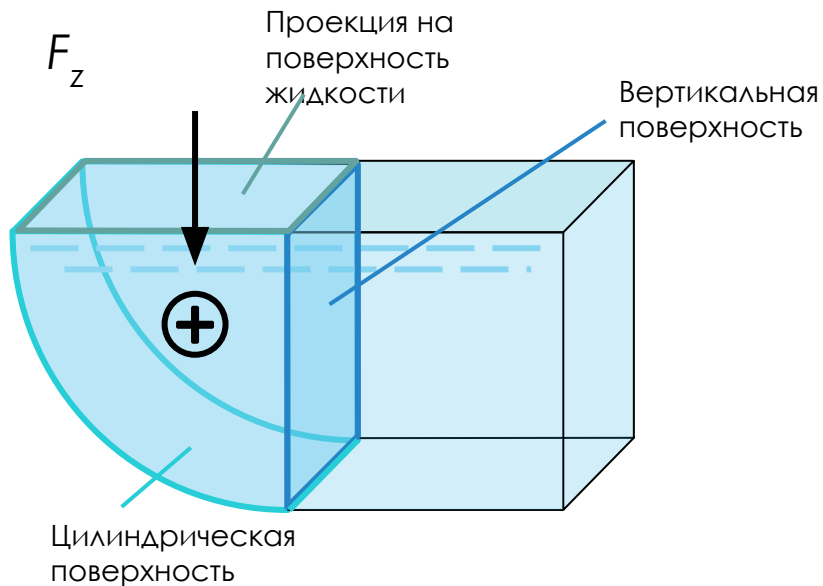
$$F_z = \rho g V_{\text{т.д.}} = \rho g S_{\text{т.д.}} \cdot b$$

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

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

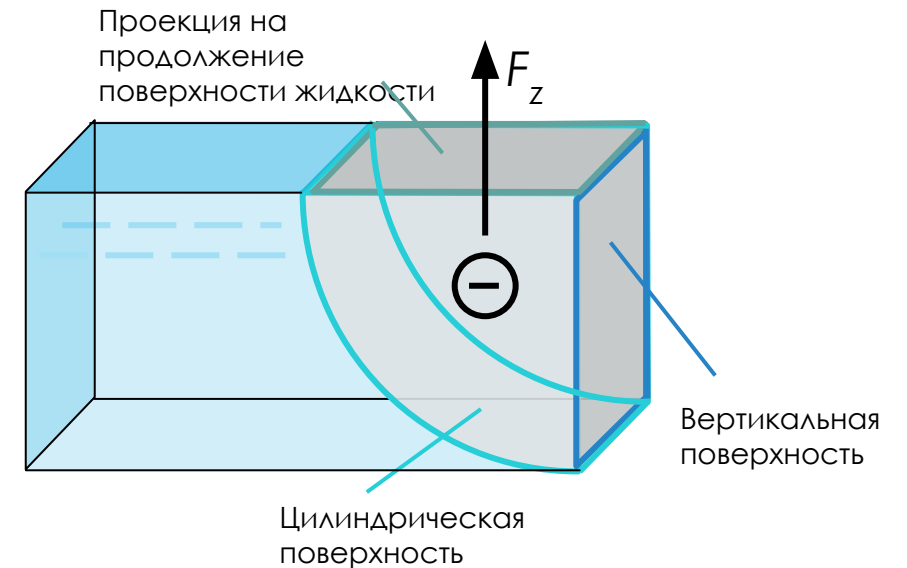
Определение объема тела давления

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

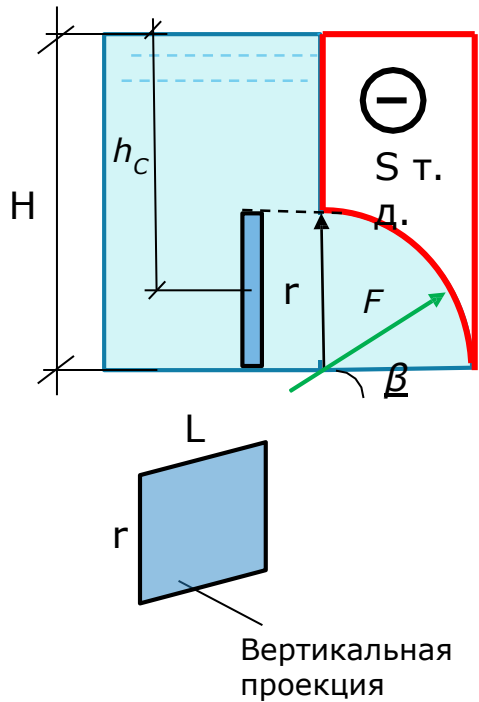


Тело давления отрицательное (мнимое), если объем не заполнен жидкостью

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

Дано:

Решение



Внизу вертикальной резервуара с водой имеется фасонная часть виде $\frac{1}{4}$ поверхности. Определить давление на эту часть, если $r = 0,4$ м, $H = 1,2$ м, длина образующей $L = 0,8$ м

$r = 0,4$
 $H = 1,2$ м
 $L = 0,8$
 $M = ?$
 $\beta = ?$

Записываем уравнение силы давления на криволинейные поверхности $F = \sqrt{F_x^2(\text{гор}) + F_z^2(\text{верт})}$.

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

2. Находим вертикальную составляющую силы F : $F_z = \rho g V_{\text{т.д.}} = \rho g S_{\text{т.д.}}$

$S_{\text{т.д.}} = S_{\text{прямоуг.}} - S_{\text{сектора}} = L \cdot r - \frac{\pi r^2}{4} = H \cdot r - \frac{\pi r^2}{4}$

$F_z(\text{верт}) = \rho g \cdot H \cdot r \cdot \left(\frac{\pi r^2}{4} \right) \cdot L = 1000 \cdot 9,81 \cdot \left(1,2 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} \right) \cdot 0,8 = 2,74$ кН

3. Находим силу давления на криволинейную поверхность:

$F = \sqrt{F_x^2 + F_z^2} = \sqrt{3,14^2 + 2,74^2} = 4,17$ кН

4. Находим угол приложения силы F :

$\beta = \text{arctg} \frac{F_z}{F_x} = \text{arctg} \frac{2,74}{3,14} = 42^\circ$

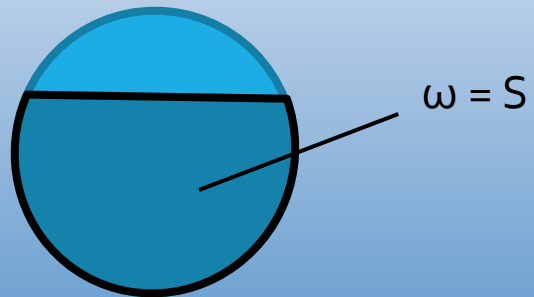


Тема 5.

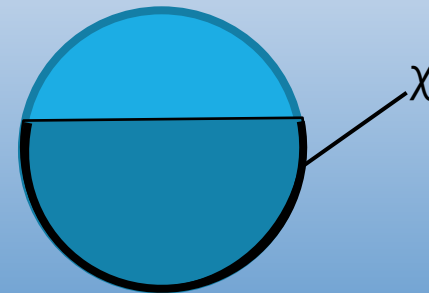
Уравнение Бернулли для вязкой (реальной) жидкости

Основные параметры потока

Живое сечение (ω), [м²]



Смоченный периметр (χ), [м]



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

Расход (Q), [м³/с, м³/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.

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

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:

$$\sum h = h_l + h_m$$

Основные уравнения динамики

Режимы движения жидкости
 $Re =$ (число Рейнольдса)
– коэффициент кинематической вязкости

h_m – местные потери напора (на поворотах, при изменении d трубы, при входе и выходе из трубопровода в резервуар, на задвижках и т.д.)
 $h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}$, где:
 ζ – коэффициент местного сопротивления

1) $Re \geq 2320$ *
(турбулентный):

Ламинарный
 $Re < 2320$
 $\alpha = 2$

Турбулентный
 $Re \geq 2320$
 $\alpha = 1$

2320 – критическое значение Re

Δz – эквивалентная шероховатость.

а) область гидравлически гладких труб:
 $Re \leq$
 $\lambda =$

б) переходная область:
 $< Re <$
 $\lambda = 0,11$

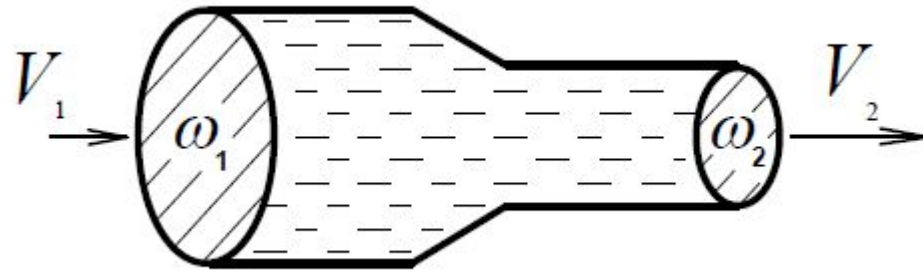
в) область гидравлически шероховатых труб:
 $Re \geq$
 $\lambda = 0,11$

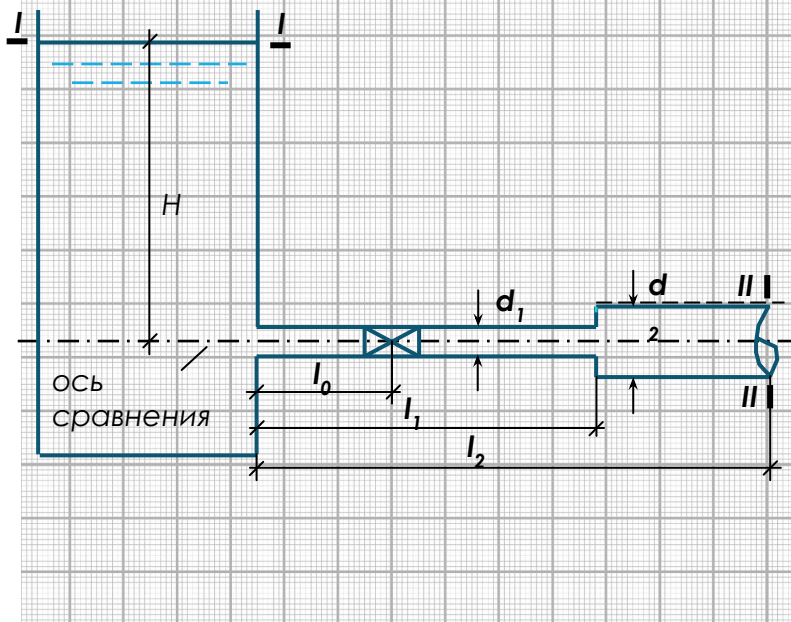
* Если: 1) мы не знаем материал труб и не можем определить Δz ;
2) нам неизвестна t жидкости и мы не можем определить η ,
то вне зависимости от режима движения:
 $\lambda = \frac{0,021}{d^{0,3}}$

Основные уравнения динамики

2. Уравнение неразрывности движения жидкости.

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





Определить напор в резервуаре H и расход воды Q ($t = 15^\circ\text{C}$), 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.

Задача

Дано:

$t_B = 15^\circ\text{C}$
 $\eta = 1,15 \cdot 10^{-6}$ м²/с
 чугун
 $\Delta\varepsilon = 0,5$ мм
 $d_1 = 100$ мм
 $d_2 = 120$ мм
 $l_2 = 100$ м
 $l_1 = 70$ м
 $l_0 = 30$ м
 задвижка закрыта на $\frac{1}{2}$
 $v_2 = 1$ м/с
 $Q - ?$
 $H - ?$

Решение

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

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

$$z_I = H; P_I = 0; v_I = 0; z_{II} = 0; P_{II} = 0; \alpha_{II} = 1; v_{II} = 1; \sum h = h_{\text{вх}} + h_{l_0} + h_{\text{зав}} + h_{(l_1-l_0)} + h_{\text{расш}}$$

- Перепишем уравнение Бернулли найденными значениями:

$$H + 0 + 0 = 0 + 0 + \frac{\alpha_{II} v_{II}^2}{2g} + \sum h; H = \frac{v_{II}^2}{2g} + h_{\text{вх}} + h_{l_0} + h_{\text{зав}} + h_{(l_1-l_0)} + h_{\text{расш}} + h_{(l_2-l_1)}$$

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

$$Re_2 = \frac{v_2 d_2}{\eta} - \text{необходимо определить } v_2.$$

$$\text{Из условия неразрывности жидкости: } Q = \omega_1 v_1 \rightarrow$$

$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_2 = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 1 = 0,00785 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,00785}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,0 \text{ м/с}.$$

Теперь находим Re_1 , Re_2 :

$$Re_1 = \frac{v_1 d_1}{\eta} = \frac{1,0 \cdot 0,1}{1,15 \cdot 10^{-6}} = 86956 > 2320$$

турб. реж., $\alpha = 1$.

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

турб. реж., $\alpha = 1$.

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

$$\text{1-ый участок: проверяем условие гидравлически шероховатых труб: } Re_1 \geq \frac{500 \cdot d_1}{\Delta\varepsilon}; \frac{500 \cdot 0,1}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 100000;$$

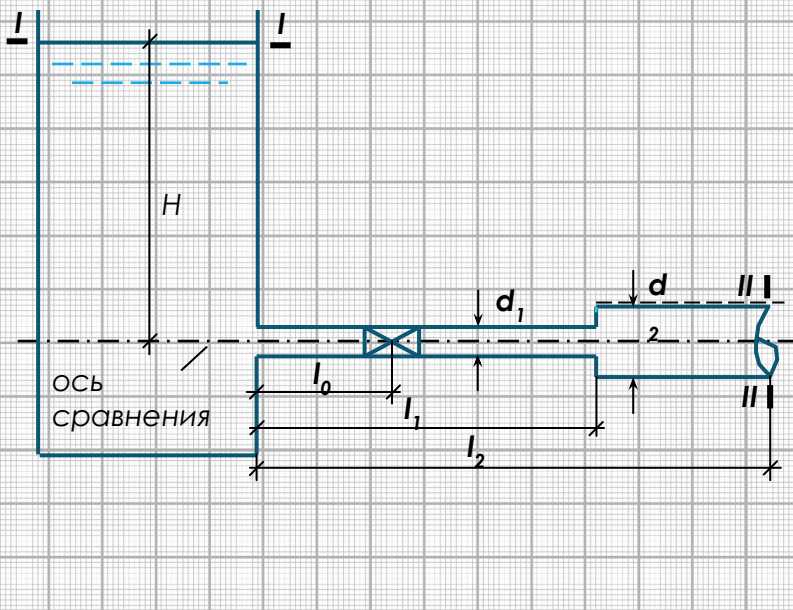
$$\text{2-ой участок: проверяем условие гидравлически шероховатых труб: } Re_2 \geq \frac{500 \cdot d_2}{\Delta\varepsilon}; \frac{500 \cdot 0,12}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 120000;$$

$$\text{проверяем условие переходной области: } \frac{20 \cdot d_2}{\Delta\varepsilon} < Re_2 < \frac{500 \cdot d_2}{\Delta\varepsilon}; \frac{20 \cdot 0,12}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 4800; 4800 < Re_2 < 120000$$

- Исходя из найденной области труб, определяем коэффициент Дарси:

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta\varepsilon}{d_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,1} \right)^{0,25} = 0,029;$$

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



Дано:

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

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

Решение

8. Считаем значения скоростного напора:

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

9. Определяем потери напора:

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

$$h_{|(1-10)} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1 - l_0}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2g} = 0,029 \cdot \frac{40}{0,1} \cdot 0,106 = 1,23 \text{ м.}$$

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

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

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

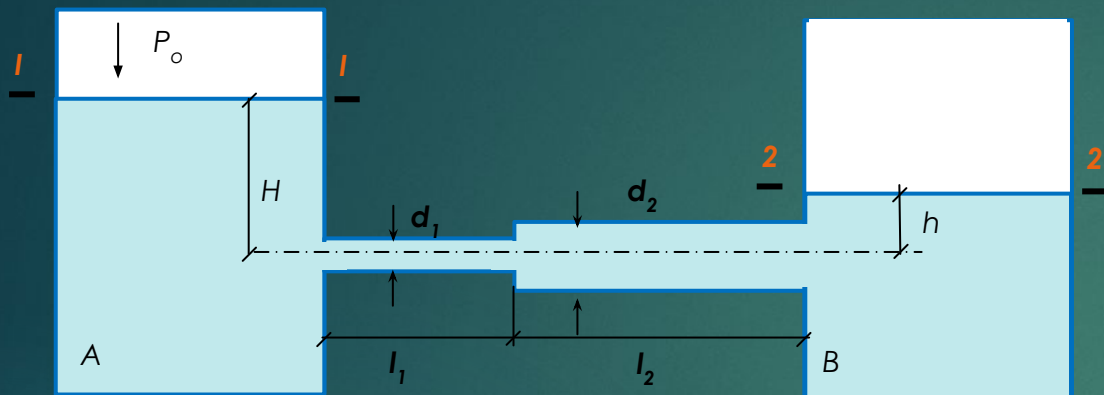
$$h_{|(2-1)} = \lambda_2 \cdot \frac{l_2 - l_1}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g} = 0,029 \cdot \frac{100 - 70}{0,12} \cdot 0,051 = 0,37 \text{ м.}$$

10. Считаем значения напора H :

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

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 $t_B=15^\circ\text{C}$ $H=8$ м. Определить расход воды в трубопроводе, если манометрическое давление $P_0=0,2$ МПа и $h=2$ м.



чугун
 $\Delta\varepsilon = 0,5$ мм
 $l_1 = 10$ м
 $d_1 = 50$ мм
 $l_2 = 6$ м
 $d_2 = 100$ мм
 $t_B = 15^\circ\text{C}$
 $\eta = 1,15 \cdot 10^{-6}$ 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:

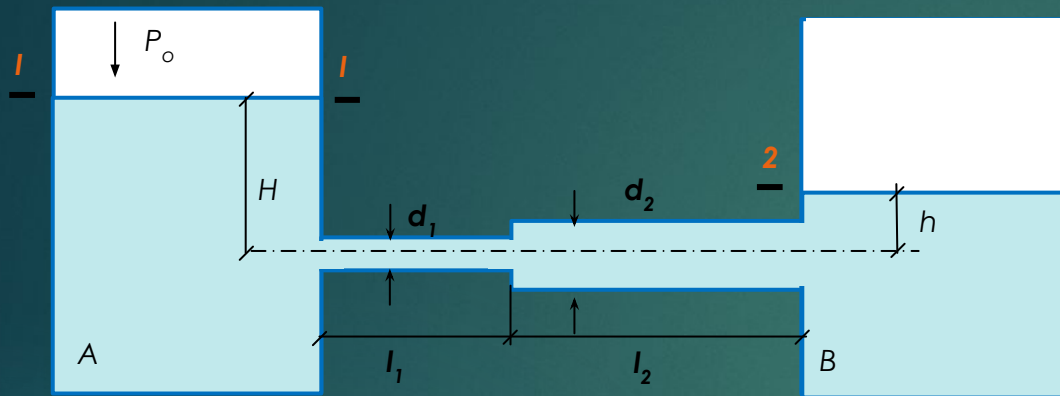
$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \Sigma h$$

$$z_1 = H, P_1 = P_0, v_1 = 0, z_2 = h, P_2 = 0, v_2 = 0$$

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

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

$$H + \frac{P_0}{\rho g} - h = 8 + \frac{0,2 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 9,81} - 2 = 26,4$$



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 $t^0_B=15$ °С $H=8$ 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:

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

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

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

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

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

- Решаем уравнение:

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

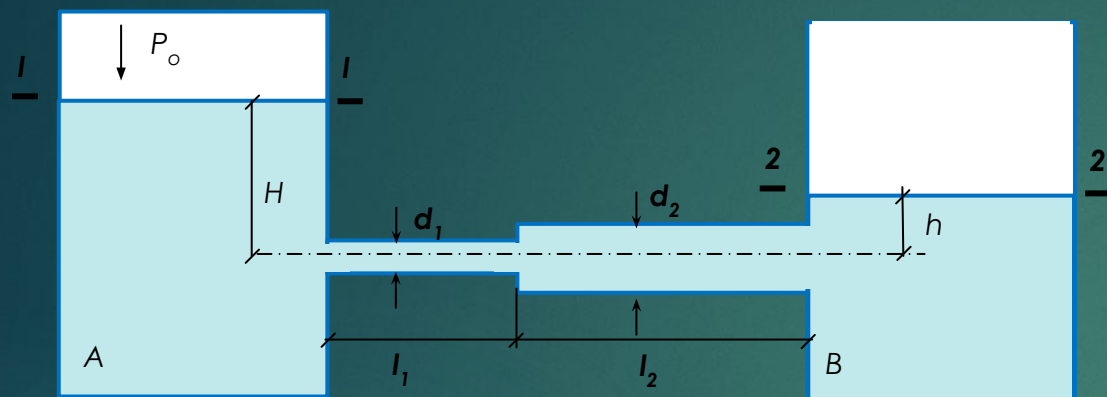
$$= 8,23 \cdot \frac{v_1^2}{2g}$$

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

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

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

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 $t^0_B=15$ °С $H=8$ 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

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

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

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

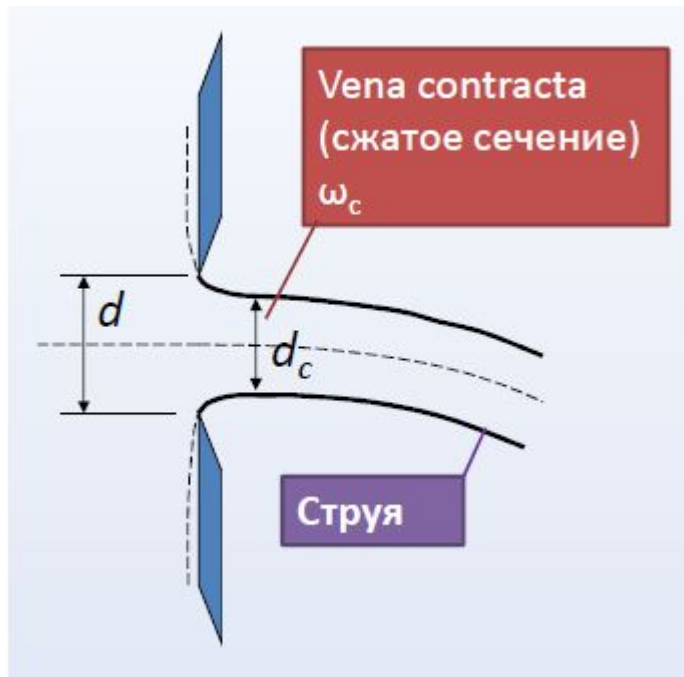
$$Q = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot v_1 = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 7,99 = 0,016 \text{ м}^3/\text{с} = 16 \text{ л/с}$$



Тема 6.

Истечение жидкости через отверстия и насадки

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ



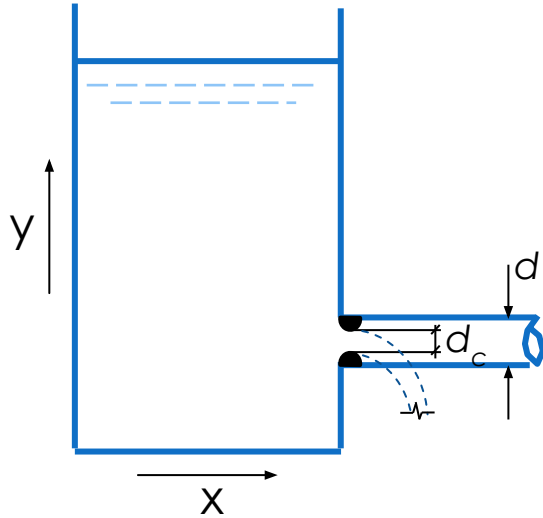
В разделе рассматриваются случаи малых отверстий и тонкой стенки

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

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 $\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$, где ω_c - площадь сжатого сечения,
 ω - площадь сечения

Насадки



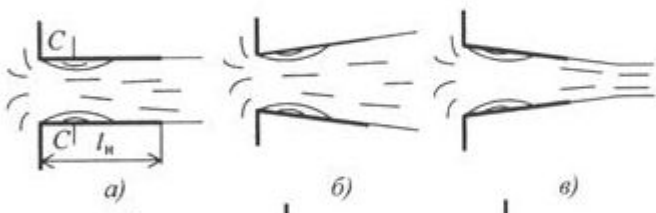
Насадок – прикрепленный к отверстию патрубков (маленький кусок трубы), длина которого $l \leq 3 \div 4 d$

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

a - цилиндрический внешний; *b* - 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	Конический 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

$$1. v = \varphi \sqrt{2gH_0}, \text{ где:}$$

φ – коэффициент скорости;

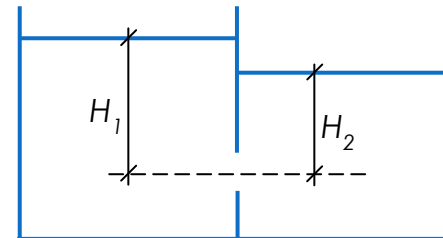
$$H_0 - \text{напор истечения: } H_0 = H + \frac{P_0 - P}{\rho g},$$

$(P_0 - P)$ – 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

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

μ – коэффициент расхода

ω – площадь сечения

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

W – начальный объем жидкости в резервуаре;

Q_1 – расход жидкости через отверстие в начальный момент времени.

Типы задач

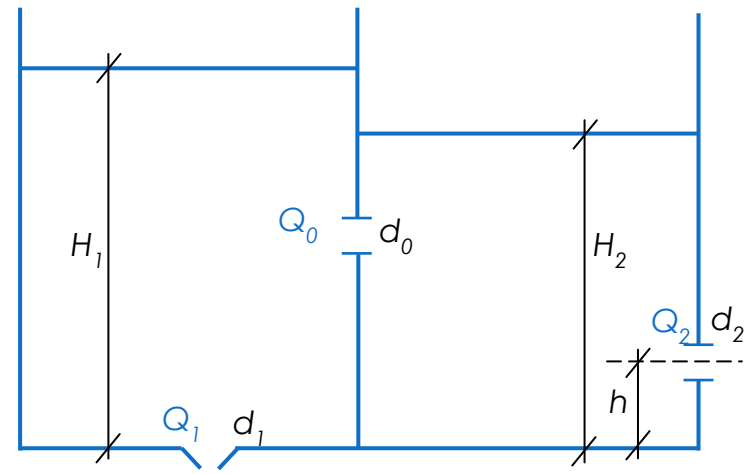
При постоянном напоре
 H

$$\sum Q_{\text{ВХ}} = \sum Q_{\text{ВЫХ}}$$

При переменном
напоре H

$$\sum Q_{\text{ВХ}} \neq \sum Q_{\text{ВЫХ}}$$

(задачи на определение $t_{\text{оп}}$)



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 $Q_0 = Q_2$.

$$Q_0 = \mu_0 \omega_0 \sqrt{2gH_0} = 0,62 \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2g(H_1 - H_2)}$$

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

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

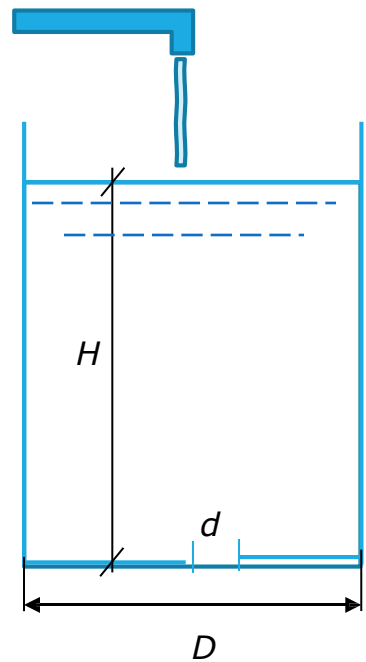
$$\text{Подставляем значения : } 0,62 \cdot (0,03)^2 \sqrt{(1,25 - H_2)} = 0,82 \cdot (0,02)^2 \sqrt{(H_2 - 0,2)}$$

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

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

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

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



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:

$D = 1$ м
 $H = 1,5$ м
 $t_{оп} = 19$ мин
 $Q = ?$
 $d = ?$

Решение

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 $W = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H$

$$Q = \frac{2\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot t_{оп}} = \frac{3,14 \cdot 1^2 \cdot 1,5}{2 \cdot 19 \cdot 60} = 0,039 \text{ м}^3/\text{с} = 39 \text{ л/с}$$

Диаметр отверстия найдем из уравнения расхода жидкости,

вытекающей из отверстия:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2 g H} = \mu \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 g H}$$

$$\rightarrow d = \sqrt{\frac{4Q}{\mu \pi \sqrt{2 g H}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,039}{0,62 \cdot 3,14 \sqrt{19,6 \cdot 1,5}}} = 0,015 \text{ м} = 15 \text{ мм}$$

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



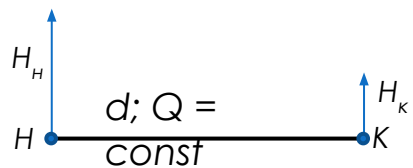
Тема 7. Напорное движение в трубопроводах

Классификация трубопроводов

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

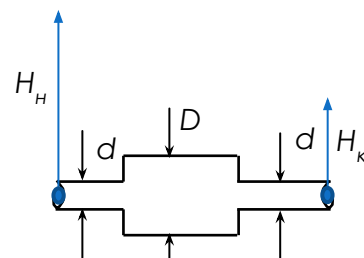
Виды трубопроводов

Простые

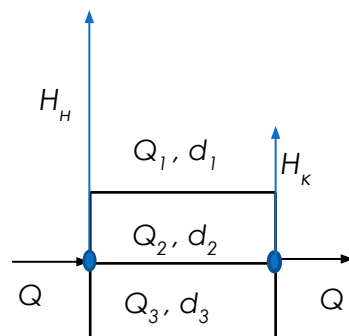


Сложные

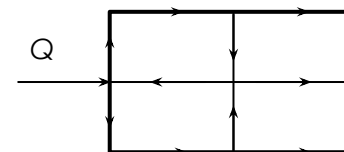
1) с последовательным соединением



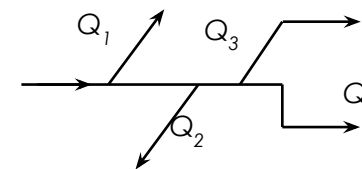
2) с параллельным соединением



3) кольцевые сети



4) разветвленные тупиковые

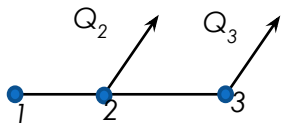


5) комбинированные (кольцевые + тупиковые)

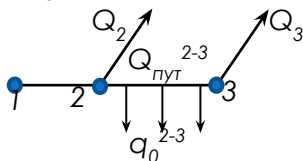
Виды расходов

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

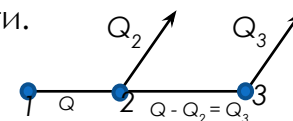
а) узловой (сосредоточенный) – Q_n – это расход, отделяющийся или присоединяющийся в конкретной точке сети.



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.

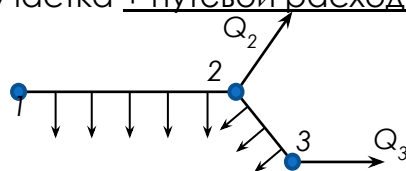


Q_3 – узловой расход для участка 2-3 и транзитный для участка 1-2.

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

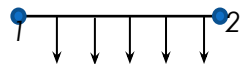
- если путевой расход находится на рассматриваемом участке, а после него есть еще расходы, расчетный расход будет находиться как сумма расходов после рассматриваемого участка + путевой расход на этом участке, определяемый по формуле $0,55 \cdot q_0 \cdot l$.

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



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

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



Формула напора H :
$$(z_H - z_K) + \left(\frac{P_H}{\rho g} - \frac{P_K}{\rho g} \right) = \sum h_l, \text{ где:}$$

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:

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

K – расходная характеристика

(Если скорость движения потока отличается от установленной, то:

$K = a \cdot K$, a – коэффициент пересчета).

Формула Дарси-Вейсбаха:

$$h_l = S_0 \cdot l \cdot Q^2, \text{ где:}$$

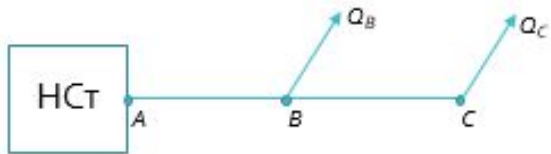
S_0 – удельное сопротивление трубопровода

! При параллельном соединении потери напора на линиях равны

Определение диаметра трубопровода d :

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

$v_э$ – 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 $H_{CB} = 16$ м. Определить необходимое давление в точке А, а также изменение давления при уменьшении расхода в точке С на 3 л/с и одновременном его увеличении в точке В на 3 л/с.

Дано:

$$l_{AB} = 400 \text{ м}$$

$$l_{BC} = 300 \text{ м}$$

$$d_{AB} = 200$$

мм

$$d_{BC} = 150$$

мм

$$Q_B = 15 \text{ л/с}$$

$$Q_C = 12 \text{ л/с}$$

$$H_{CB} = 16 \text{ м}$$

$$P_A = ?$$

$$\Delta P_A = ?$$

$$(\text{если } Q_B + 3, \\ Q_C - 3)$$

Решение

$$1. \text{ Записываем уравнение напора: } (z_H - z_K) + \left(\frac{P_H}{\rho g} - \frac{P_K}{\rho g} \right) = \sum h_l$$

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

, а в конечном – равен свободному напору в конце трубопровода: $H_K = H_{CB} = 16$ м.

$$\text{Потери напора по длине: } \sum h_l = h_{IAB} + h_{IBC}$$

$$2. \text{ Переписываем упрощенное уравнение: } \frac{P_A}{\rho g} - H_{CB} = h_{IAB} + h_{IBC}$$

$$3. \text{ Выражаем давление в точке А: } P_A = (H_{CB} + h_{IAB} + h_{IBC}) \cdot \rho g$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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