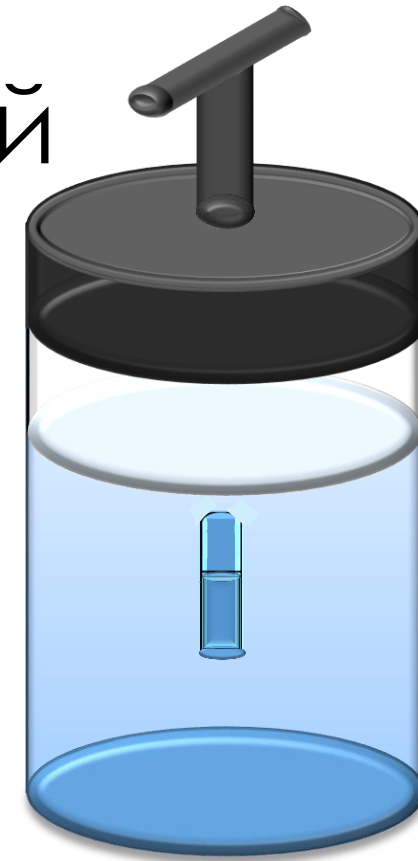


# Невозвратный картезианский водолаз



Команда: Лицей БНТУ-1  
Докладчик: Наркевич Григорий



---

Простой картезианский водолаз помещается в длинную вертикальную трубку, заполненную водой. Увеличение давления в трубе заставляет картезианского водолаза уходить ко дну. Когда водолаз достигает определенной глубины, он никогда не возвращается на поверхность, даже если давление возвращается к первоначальному значению. Исследуйте это явление и его зависимость от соответствующих параметров.



1

## Качественное описание

*Демонстрация эффекта, причина по которой, после погружения на определенную глубину, водолаз не всплывает.*

2

## Теоретическая часть

*Определение критической глубины погружения и критического объема воздуха в пробирке.*

3

## Экспериментальная часть

*Параметры: объем воздуха в пробирке, давление в трубке, плотность жидкости, масса пробирки.*

4

## Выводы

*Влияющие и не влияющие параметры, причины, по которым водолаз в определенный момент перестает всплывать.*



3

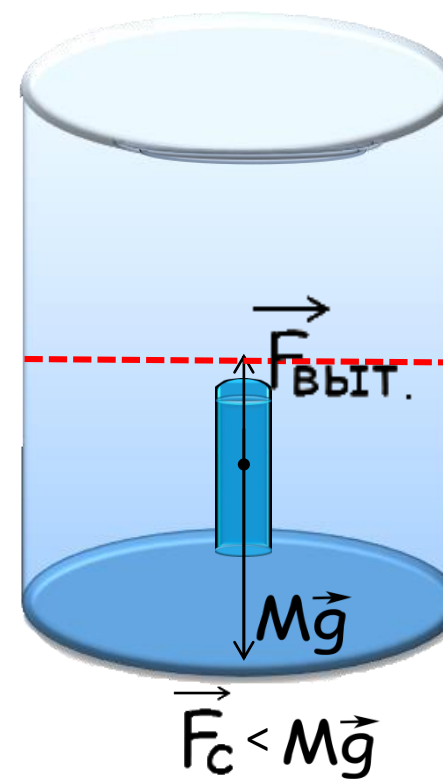
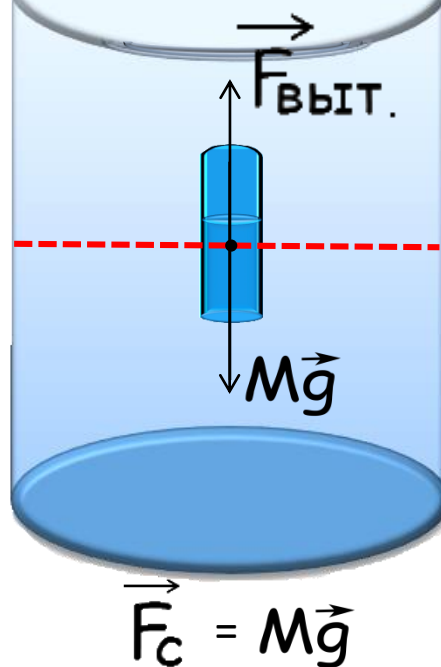
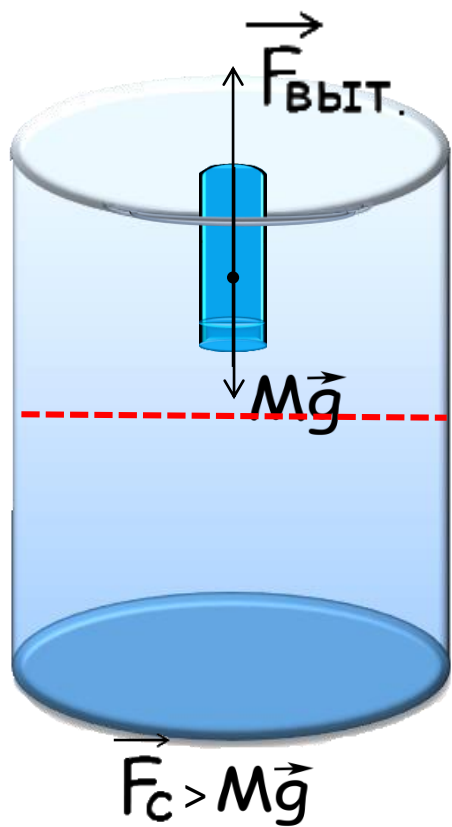
# Качественное описание

---

Условие плавания на  
поверхности жидкости

Условие плавания  
в жидкости

Условие потопления



Качественное  
описание

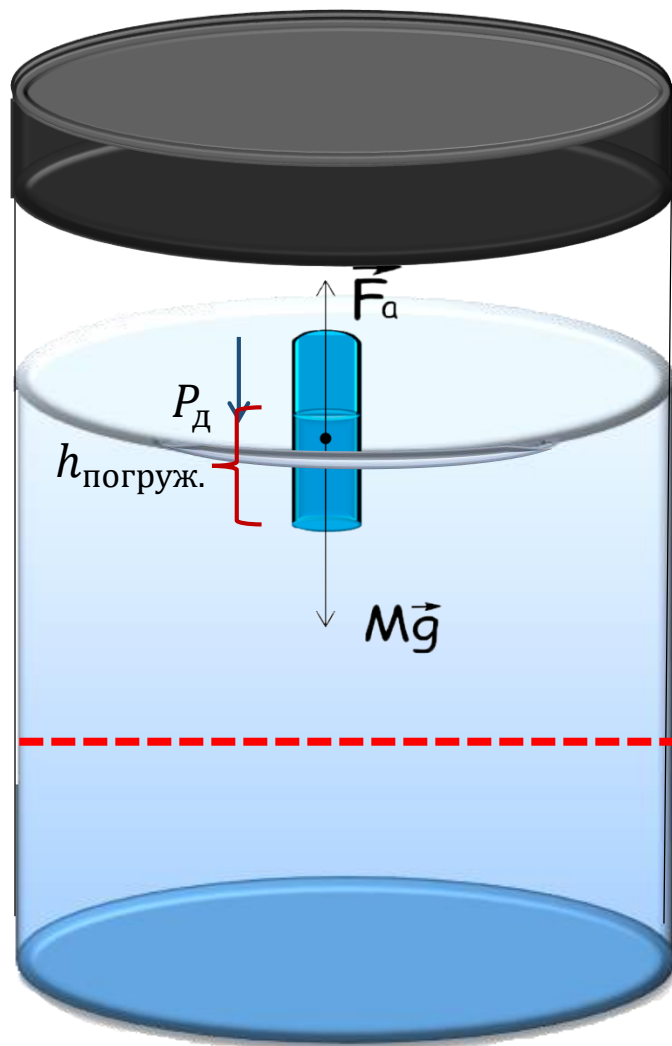
Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

Водолаз погружается и всплывает

$$h_{\text{погруж.}} < h_{\text{кр.}}$$



$Mg$  – сила тяжести

$P_d$  – добавочное давление

$F_a$  – сила Архимеда

$h_{\text{погруж.}}$  – глубина погружения водолаза

$h_{\text{кр.}}$  – критическая глубина погружения

Качественное  
описание

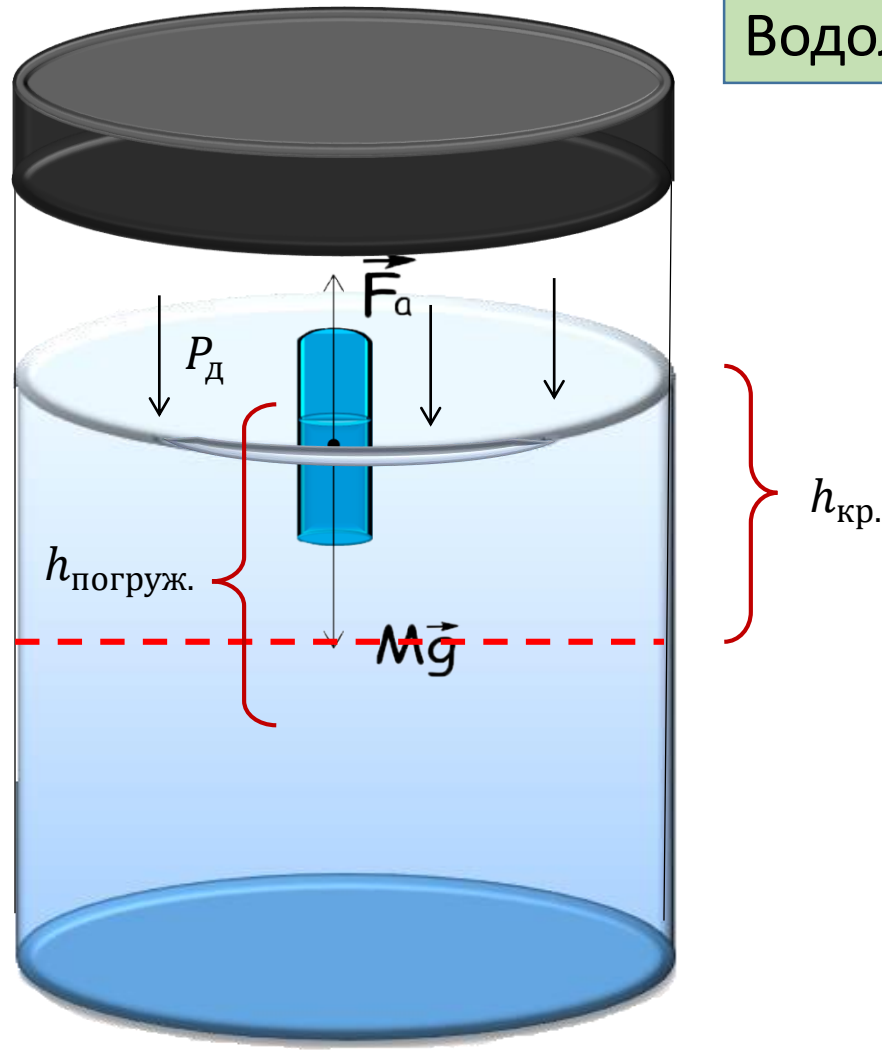
Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

Водолаз погружается и не всплывает

$$h_{\text{погруж.}} > h_{\text{кр.}}$$



$Mg$  – сила тяжести

$P_d$  – добавочное давление

$F_a$  – сила Архимеда

$h_{\text{погруж.}}$  – глубина погружения водолаза

$h_{\text{кр.}}$  – критическая глубина погружения

Качественное  
описание

Теория

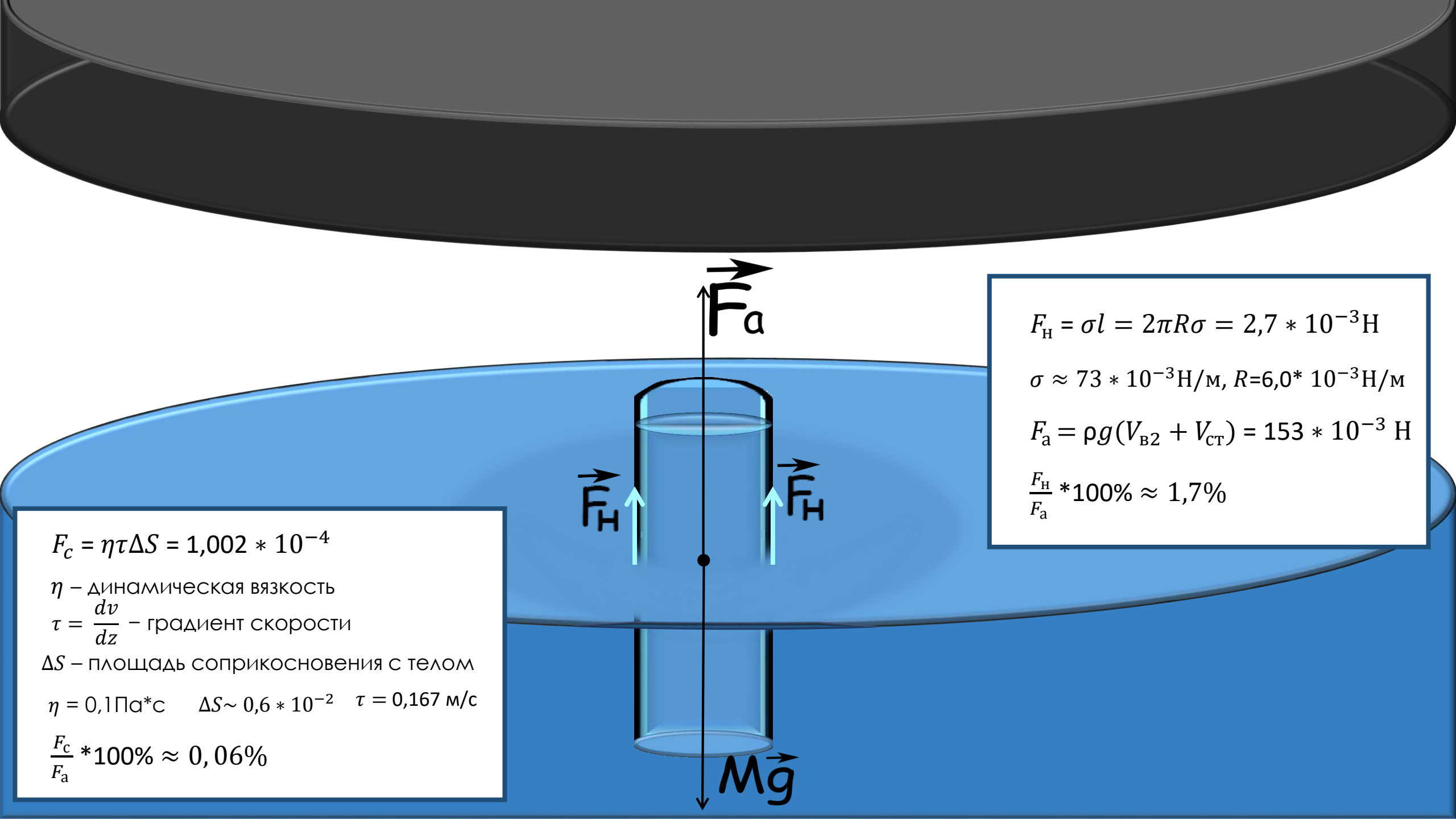
Экспериментальная  
часть

Выводы



# Теоретическая часть

---



$$F_H = \sigma l = 2\pi R\sigma = 2,7 * 10^{-3} \text{ H}$$

$$\sigma \approx 73 * 10^{-3} \text{ H/м}, R=6,0 * 10^{-3} \text{ H/м}$$

$$F_a = \rho g (V_{B2} + V_{CT}) = 153 * 10^{-3} \text{ H}$$

$$\frac{F_H}{F_a} * 100\% \approx 1,7\%$$

$$F_c = \eta \tau \Delta S = 1,002 * 10^{-4}$$

$\eta$  – динамическая вязкость

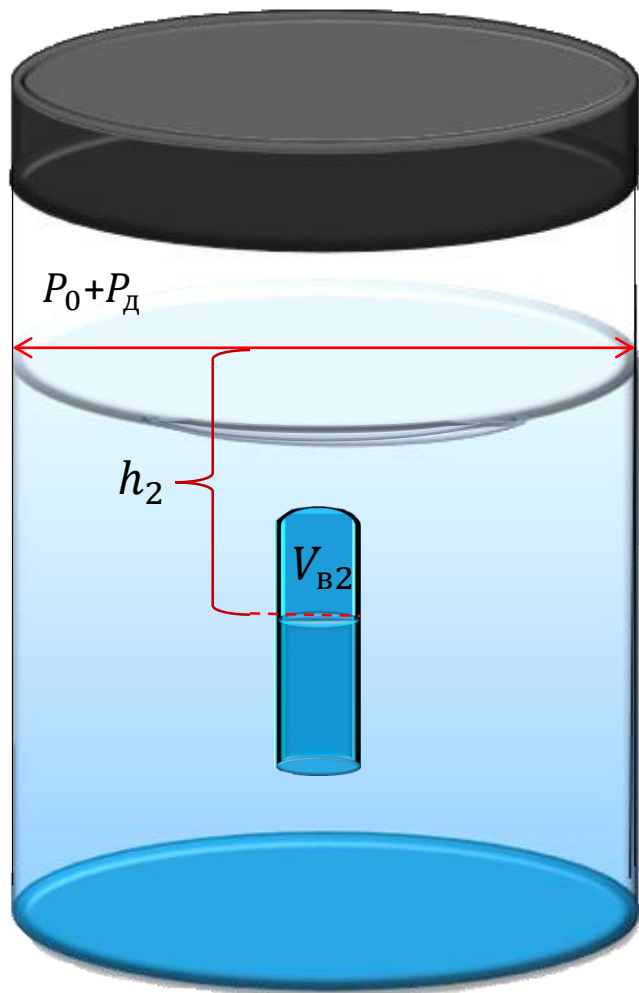
$\tau = \frac{dv}{dz}$  – градиент скорости

$\Delta S$  – площадь соприкосновения с телом

$$\eta = 0,1 \text{ Па*с} \quad \Delta S \sim 0,6 * 10^{-2} \quad \tau = 0,167 \text{ м/с}$$

$$\frac{F_c}{F_a} * 100\% \approx 0,06\%$$





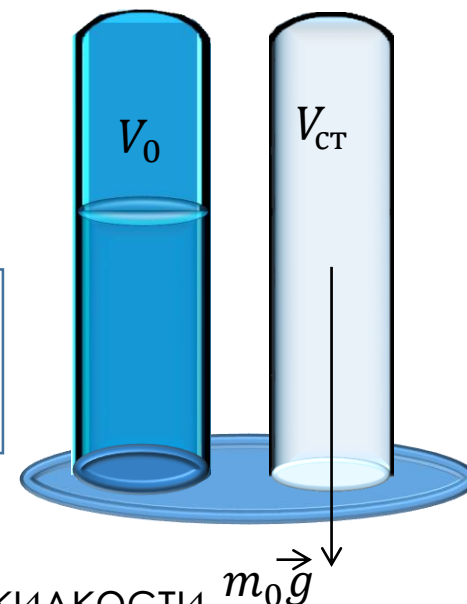
Закон Бойля- Мариотта:

$$P_0 V_0 = (P_0 + P_d + pgh_2) V_{B2} \quad (1) \Rightarrow V_{B2} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2} \quad (2)$$

Критическая глубина погружения:

$$m_0 g = \rho g (V_{B2} + V_{CT}) \quad (3) \Rightarrow V_{B2} = \frac{m_0 - \rho V_{CT}}{\rho} \quad (4)$$

$$V_{B2} = V_{B2} \Rightarrow \frac{m_0 - \rho V_{CT}}{\rho} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2}$$



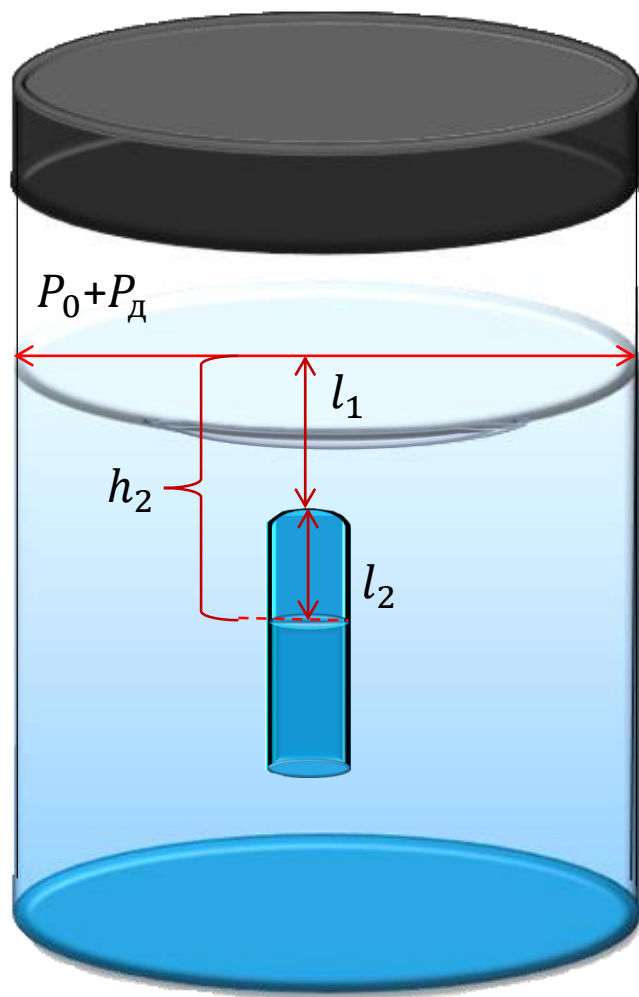
$V_{B2}$  - воздух в пробирке, плавающей в жидкости  
 $P_d$  - добавочное давление

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



$$\frac{m_0 - pV_{\text{ст}}}{p} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2} \Rightarrow h_2 = \frac{\frac{pP_0 V_0}{(m_0 - pV_{\text{ст}})} - (P_0 + P_d)}{pg}$$

$$h_2 = l_1 + l_2$$

$$l_1 = h_2 - l_2 = \frac{\frac{pP_0 V_0}{(m_0 - pV_{\text{ст}})} - (P_0 + P_d)}{pg} - \frac{m_0 - pV_{\text{ст}}}{pS}$$

$V_{\text{в2}}$  - воздух в пробирке, плавающей в жидкости  
 $P_d$  - добавочное давление

Качественное  
описание

Теория

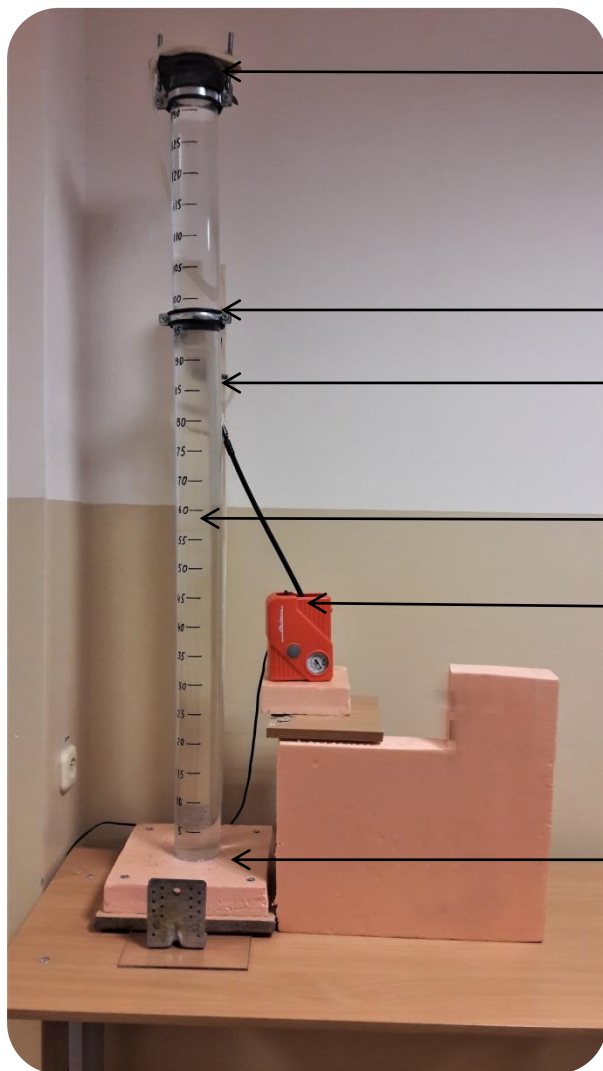
Экспериментальная  
часть

Выводы



# Экспериментальная часть

---



Герметичная крышка

Фиксатор  
Манометр

Трубка, в которой тонет водолаз

Нагнетатель давления

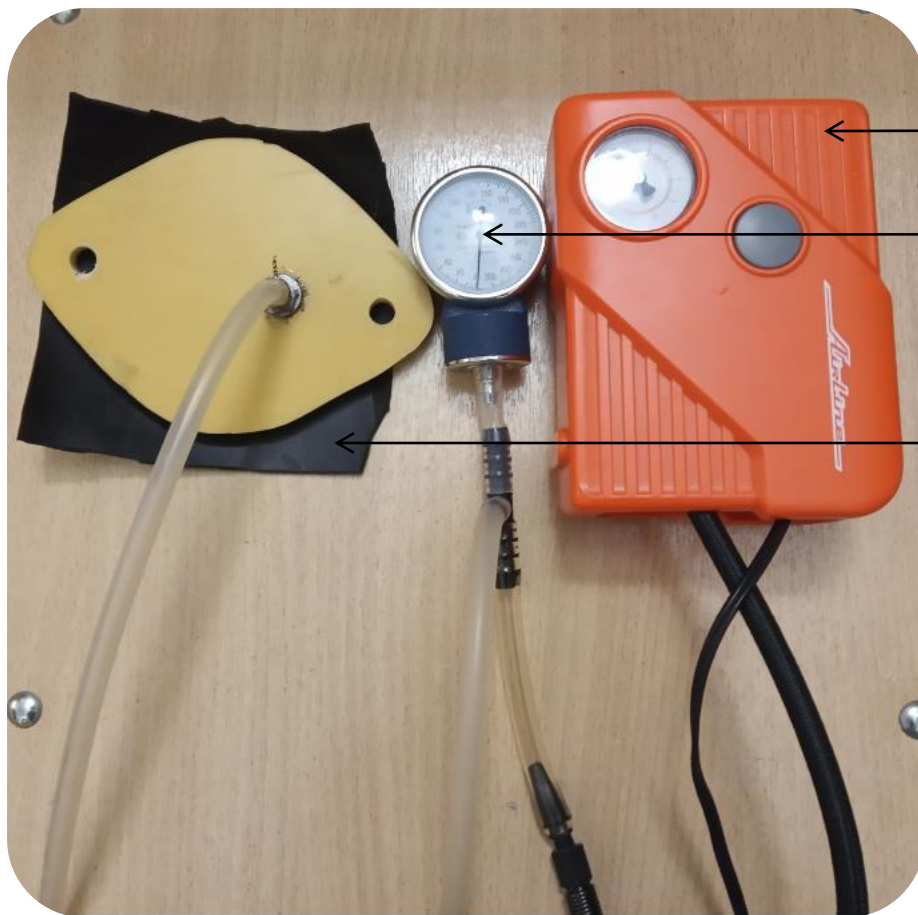
Пенопластовая подставка

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



Нагнетатель давления

Манометр

Герметичная крышка для  
трубки

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



Крышка



Пробирка(водолаз)



Устройство для опускания  
водолаза в трубку

Качественное  
описание

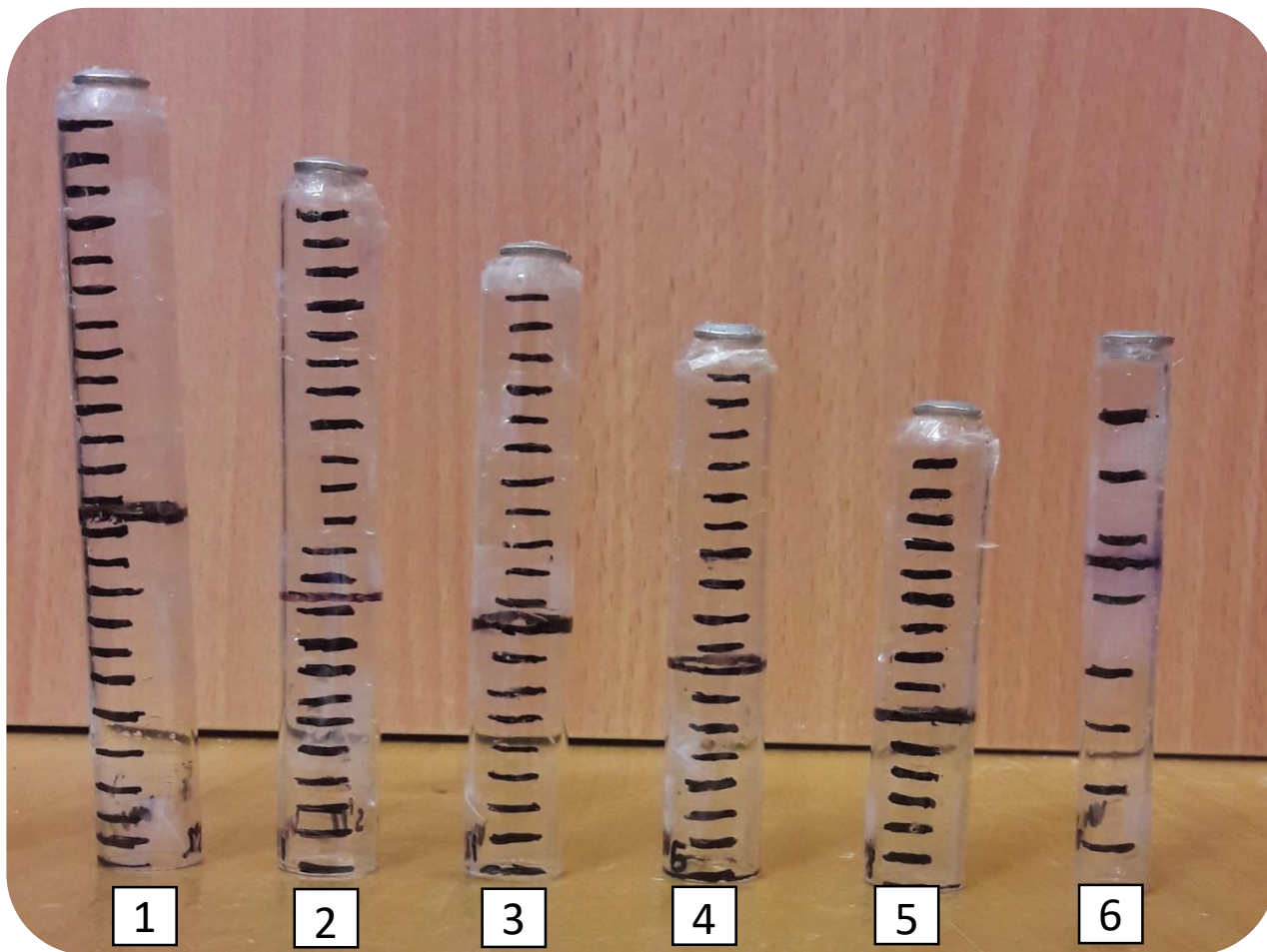
Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



Пробирки, которые мы использовали



Объем пробирок:

- 1. – 14 мл.
- 2. – 12 мл.
- 3. – 11 мл.
- 4. – 10 мл.
- 5. – 9 мл.
- 6. – 4 мл.

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

Водолаз тонет и всплывает

$$h_{\text{погруж.}} < h_{\text{критич.}}$$



Качественное  
описание

Теория

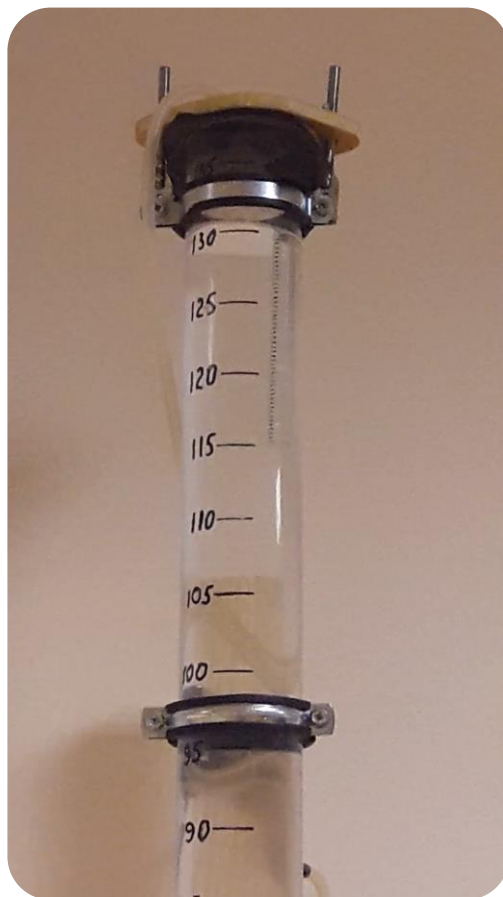
Экспериментальная  
часть

Выводы



Водолаз тонет и не всплывает

$$h_{\text{погруж.}} > h_{\text{критич.}}$$



Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

## Определение критического объема воздуха в пробирке



$$V_{\text{пробирки}} = 14 \text{ мл}$$

$$V_{\text{критич.}} = 6.5 \text{ мл}$$

Условие равновесия водолаза:  $mg = \rho_{\text{ж}} gV$

$$m_{\text{пр.}} + \rho_{\text{в}} (V_{\text{пр.}} - V_{\text{в.кр.}}) = \rho_{\text{ж.}} (V_{\text{ст.}} + V_{\text{пр.}})$$

$$V_{\text{в.кр.}} = V_{\text{пр.}} - \frac{\rho_{\text{ж.}} (V_{\text{ст.}} + V_{\text{пр.}}) - m_{\text{пр.}} + \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}$$

$V_{\text{в.кр.}}$  - критический объем воздуха в пробирке  
 $m_{\text{пр.}}$  - масса пробирки

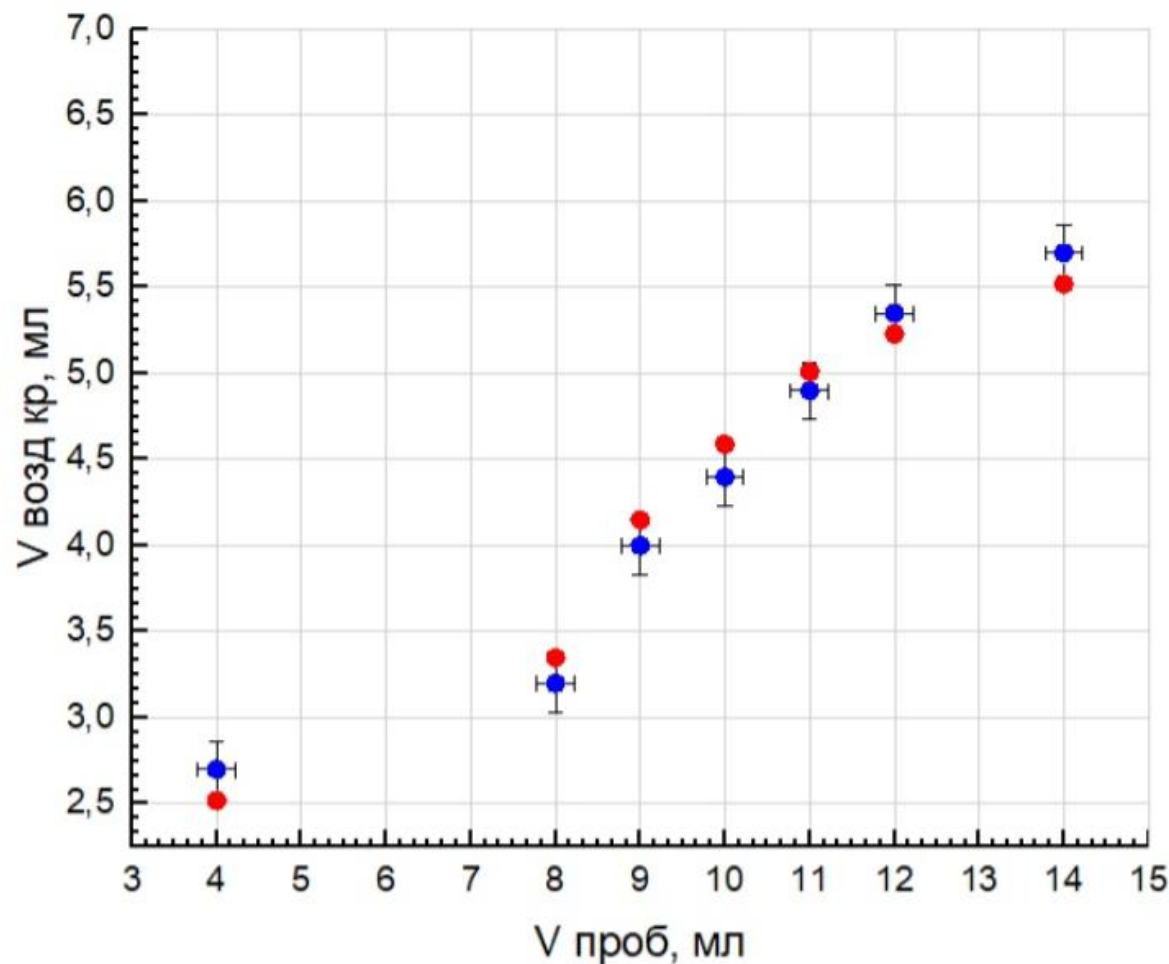
Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

## Зависимость критического объема воздуха от объема пробирки



$V_{\text{возд.кр.}}$  - критический объем воздуха в пробирке

$V_{\text{проб.}}$  - объем воздуха в пробирке

● – экспериментальные данные

● – теоретические значения

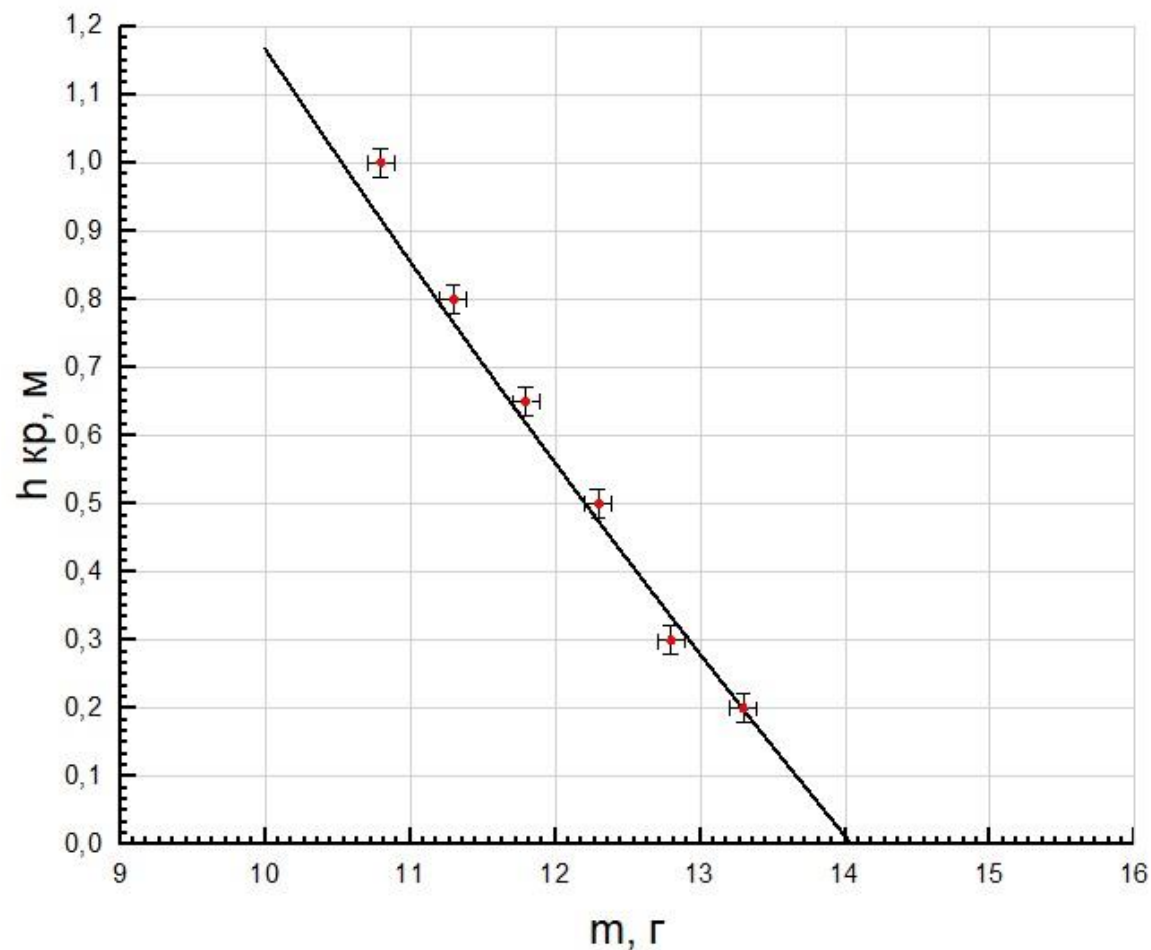
Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

Зависимость критической глубины погружения  
от массы, при  $V_{\text{воздуха}} = \text{const}$



$h_{\text{кр}}$  – критическая глубина погружения  
 $m$  – масса пробирки

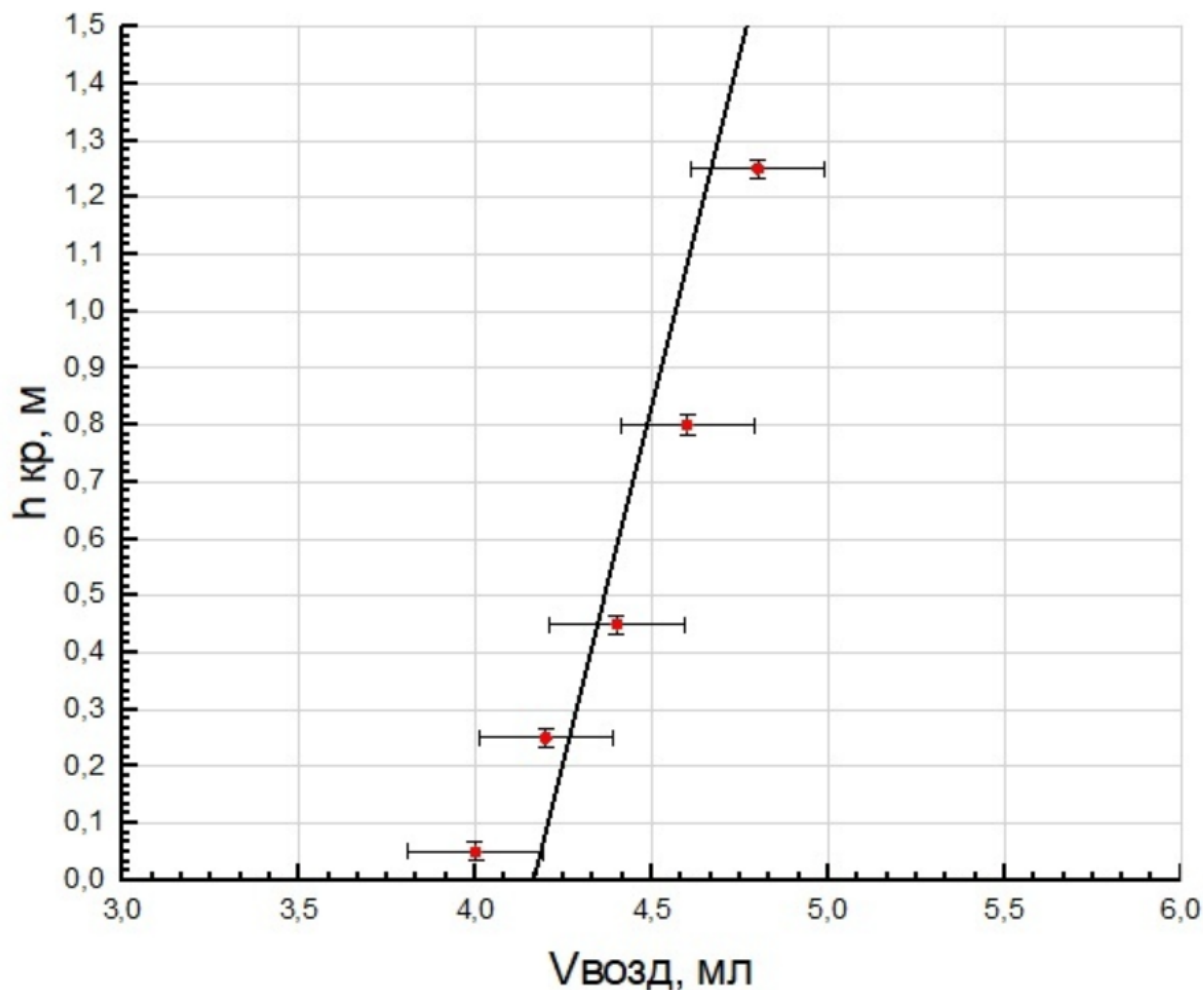
Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

## Зависимость критической глубины погружения от объема воздуха в пробирке



$h_{кр}$  – критическая глубина погружения

$V_{возд.}$  – объем воздуха в пробирке

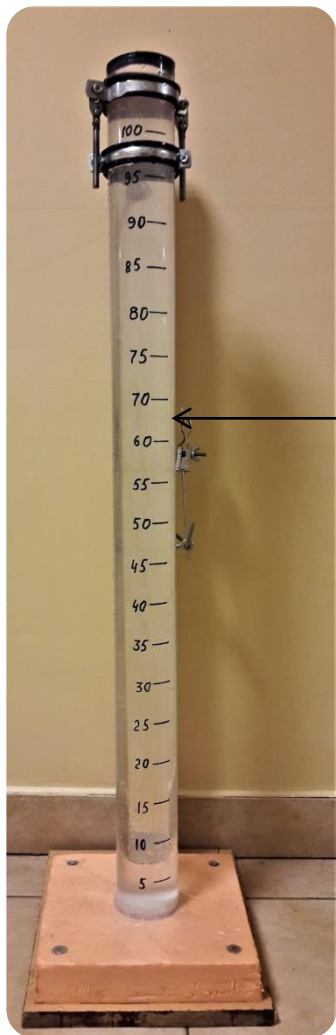
$$h_{кр} \sim V_{возд.} + k_1$$

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



Соляной раствор

Кол-во соли для 5% концентрации  
 $m_{\text{соли}} = 181 \text{ г.}$



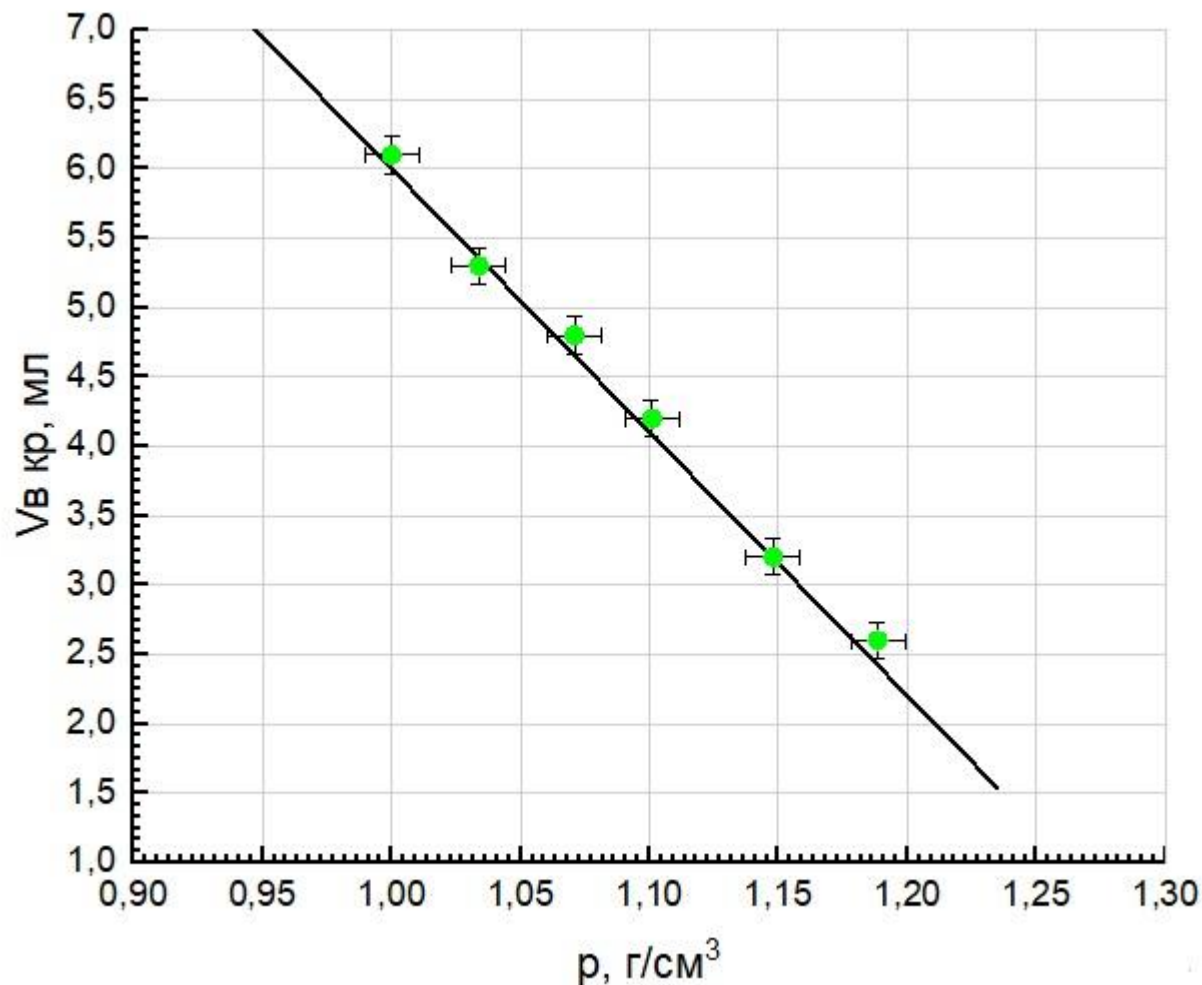
Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

## Зависимость объема воздуха в пробирке от плотности жидкости



$V_{в.кр.}$  - критический объем воздуха в пробирке  
 $\rho$  - плотность жидкости

$$V_{в.кр.} = V_{пр.} - \frac{\rho_{ж.}(V_{ст.} + V_{пр.}) - m_{пр.} + \rho_{в.}}{\rho_{в.}}$$



$$V_{в.кр.} \sim k_1 - \frac{\rho_{ж.}}{k_2}$$

Качественное  
описание

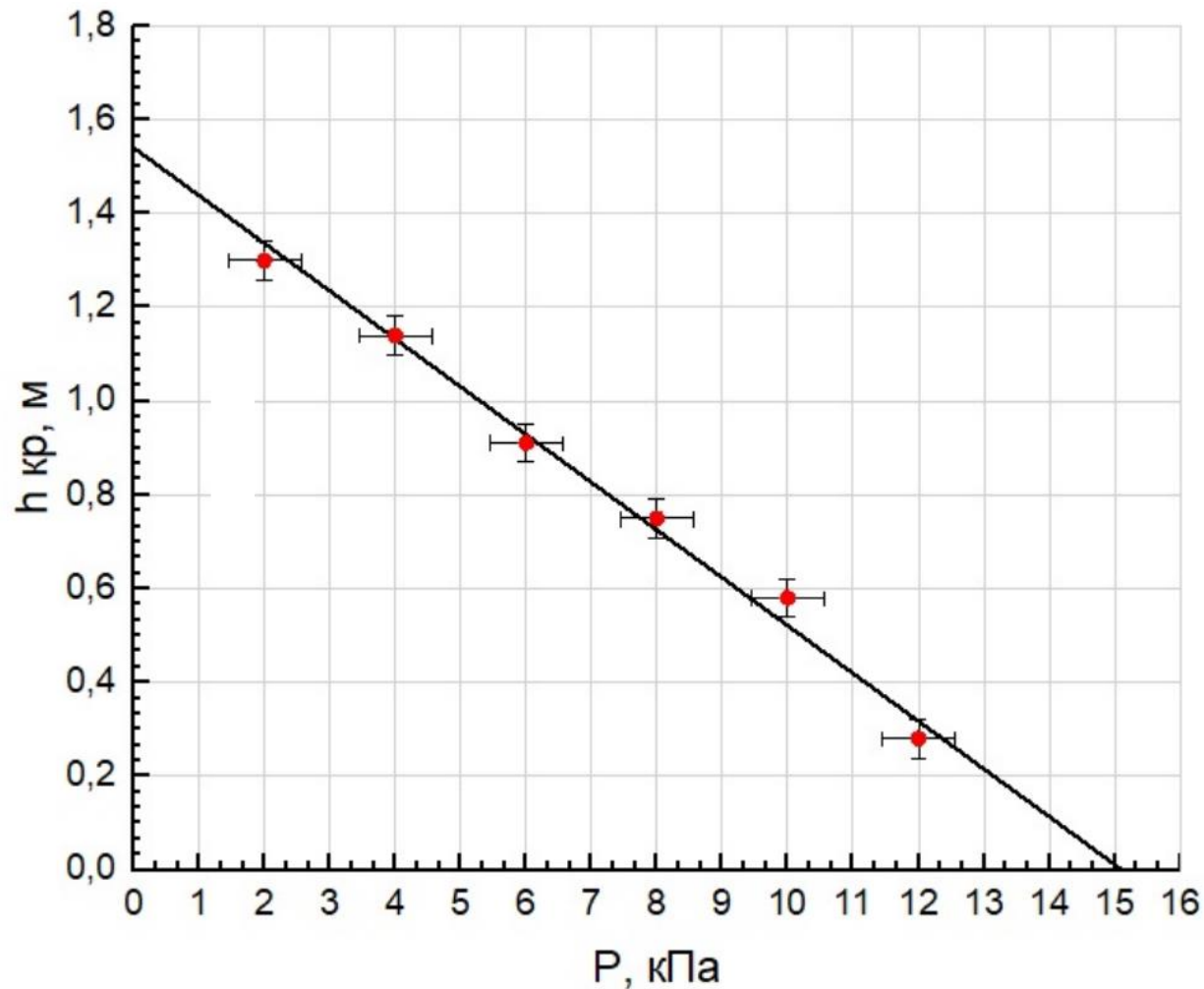
Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



## Зависимость критической глубины погружения от добавочного давления



$h_{кр.}$  - критическая глубина погружения  
 $P$  – давление в сосуде

$$h_{кр.} \sim \frac{k_1 - k_2 P}{k_3}$$

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

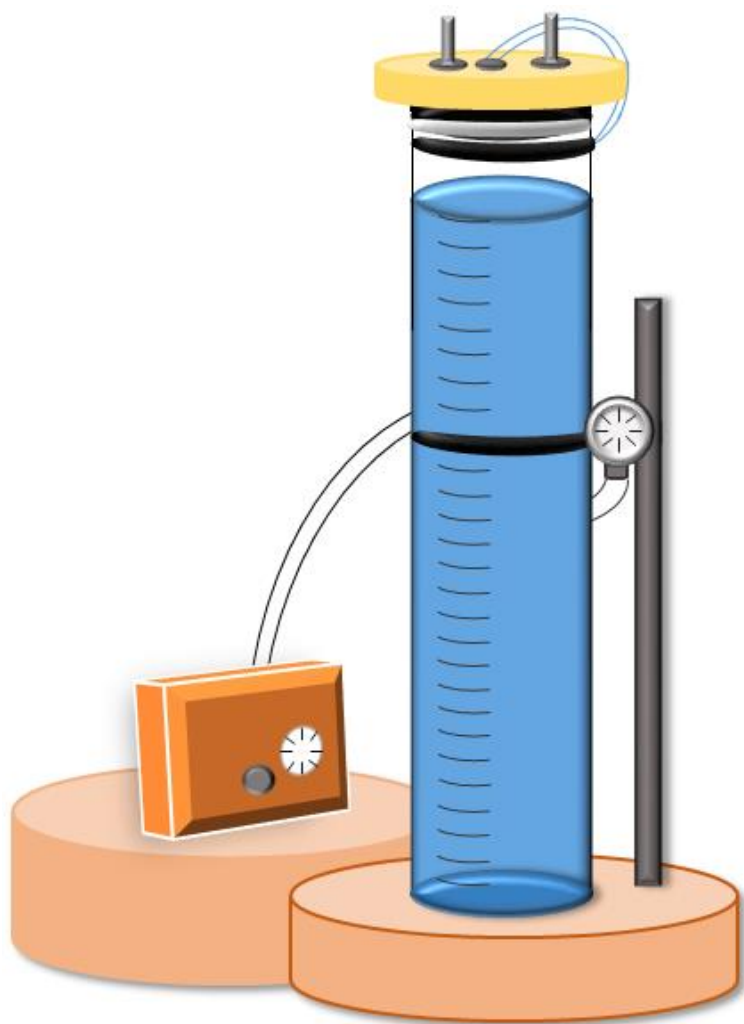




25

# Выводы

---



Параметры, влияющие на потопление водолаза:

- Объем воздуха в колбе
- Масса колбы
- Плотность жидкости
- Давление в трубке

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

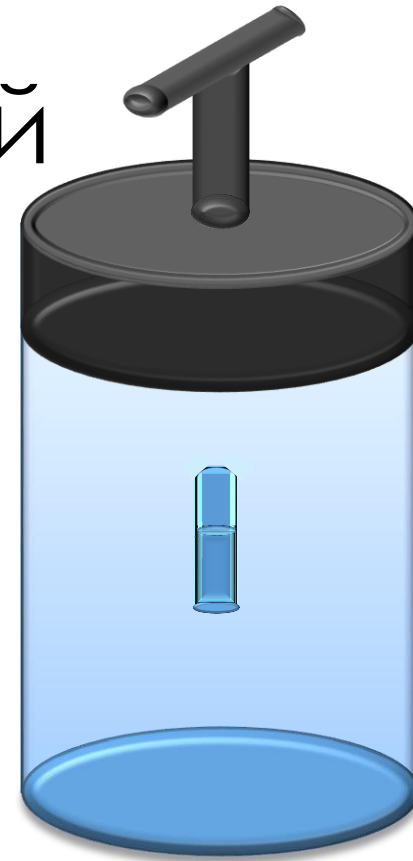


Спасибо за внимание!

# Невозвратный картезианский водолаз



Команда: Лицей БНТУ-1  
Докладчик: Наркевич Григорий



---

Простой картезианский водолаз помещается в длинную вертикальную трубку, заполненную водой. Увеличение давления в трубе заставляет картезианского водолаза уходить ко дну. Когда водолаз достигает определенной глубины, он никогда не возвращается на поверхность, даже если давление возвращается к первоначальному значению. Исследуйте это явление и его зависимость от соответствующих параметров.



# Дополнительные слайды

---

## Расчет погрешностей

$$\Delta m = \Delta_{\text{и}} m + \Delta_{\text{о}} m = 0.15 \text{ г}$$

$$\Delta_{\text{и}} m = 0.1 \text{ г}$$

$$\Delta_{\text{о}} m = 0.05 \text{ г}$$

$$\Delta V_{\text{возд.}} = \Delta_{\text{и}} V_{\text{возд.}} + \Delta_{\text{о}} V_{\text{возд.}} = 0.95 \text{ мл}$$

$$\Delta_{\text{о}} V_{\text{возд.}} = 0.5 \text{ мл}$$

$$\Delta_{\text{и}} V_{\text{возд.}} = 0.45 \text{ мл}$$

$$\Delta h = \Delta_{\text{и}} h + \Delta_{\text{о}} h = 3.5 \text{ см}$$

$$\Delta_{\text{и}} h = 1 \text{ см}$$

$$\Delta_{\text{о}} h = 2.5 \text{ см}$$

$$\Delta p = \Delta_{\text{и}} p + \Delta_{\text{о}} p = \frac{\Delta_{\text{и}} m}{\Delta_{\text{и}} V_{\text{.}}} + \frac{\Delta_{\text{о}} m}{\Delta_{\text{о}} V_{\text{.}}} = 9.09 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$$

$$\Delta_{\text{о}} p = 4.0 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$$

$$\Delta_{\text{и}} p = 5.09 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$$

## Параметры пробирок

Номер пробирки	Объем, мл	Масса пробирок, г	Объем стекла, мл	Внутр. диаметр, мм	Высота пробирк и, см	Масса соли для р-ра, г
1	14	10.52	5.0	12.0	11.9	5% - 181
2	12	9.93	4.7	12.0	11.1	10% - 363
3	11	8.91	3.9	12.0	10.1	15% - 544
4	10	8.09	3.5	12.0	9.0	20%- 726
5	9	7.15	2.9	12.0	8.0	25% -908
6	4	4.52	2	7.6	8.0	26% - 1089

## Дополнительные расчеты

Расчет  $l_2$

$$m_0 g = p g (V_{\text{ст}} + S l_2)$$

$$m_0 - p V_{\text{ст}} = p S l_2$$

$$l_2 = \frac{m_0 - p V_{\text{ст}}}{p S}$$

Расчет  $h_2$

$$\frac{m_0 - p V_{\text{ст}}}{p} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_{\text{д}} + p g h_2}$$

$$(P_0 + P_{\text{д}} + p g h_2)(m_0 - p V_{\text{ст}}) = P_0 V_0 p$$

$$P_0 + P_{\text{д}} + p g h_2 = \frac{P_0 V_0 p}{m_0 - p V_{\text{ст}}}$$

$$p g h_2 = \frac{P_0 V_0 p}{m_0 - p V_{\text{ст}}} - (P_0 + P_{\text{д}})$$

$$h_2 = \frac{\frac{p P_0 V_0}{(m_0 - p V_{\text{ст}})} - (P_0 + P_{\text{д}})}{p g}$$

Величины:

$V_0$  - объем воздуха в пробирке

$P_0$  - атмосферное давление находящейся в воздушной среде

$P_{\text{д}}$  - добавочное давление

$p$  - плотность жидкости

$h_2$  - Расстояние от края жидкости до нижнего края пузырька воздуха

$V_{\text{в2}}$  - воздух в пробирке, плавающей в жидкости

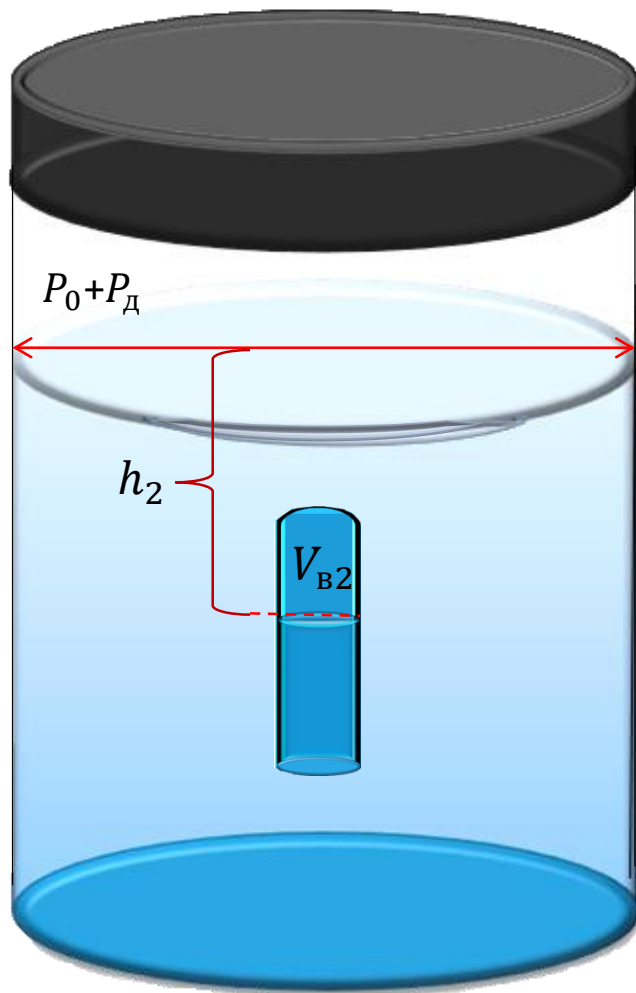
$m_0$  - масса пробирки

$V_{\text{ст}}$  - объем стекла пробирки

$l_1$  - критическая глубина погружения

$l_2$  - высота пузырька воздуха в пробирке в жидкости





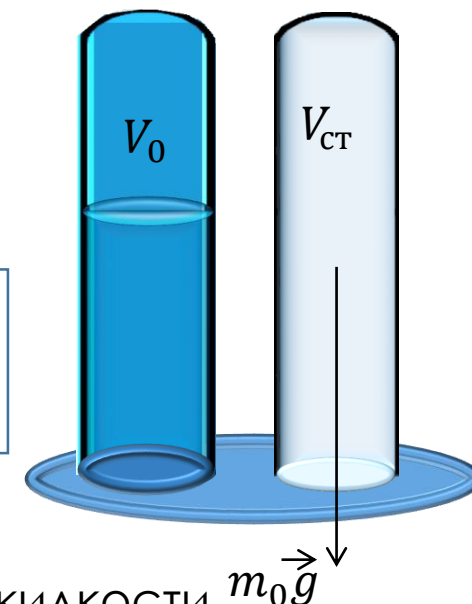
Закон Бойля- Мариотта:

$$P_0 V_0 = (P_0 + P_d + pgh_2) V_{B2} \quad (1) \Rightarrow V_{B2} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2} \quad (2)$$

Критическая глубина погружения:

$$m_0 g = \rho g (V_{B2} + V_{CT}) \quad (3) \Rightarrow V_{B2} = \frac{m_0 - \rho V_{CT}}{\rho} \quad (4)$$

$$V_{B2} = V_{B2} \Rightarrow \frac{m_0 - \rho V_{CT}}{\rho} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2}$$



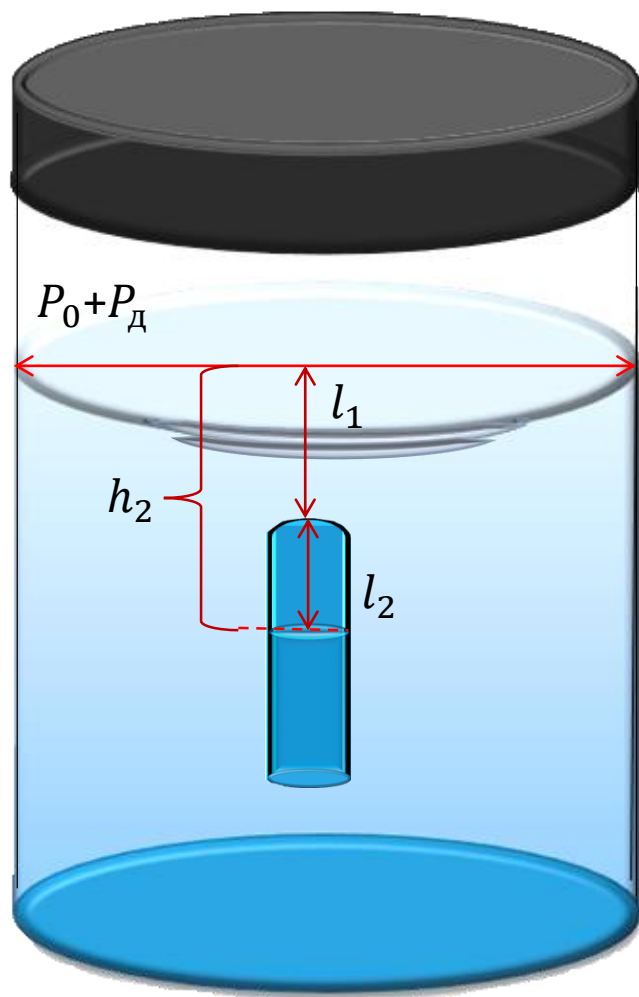
$V_{B2}$  - воздух в пробирке, плавающей в жидкости  
 $P_d$  - добавочное давление

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы



$$\frac{m_0 - pV_{\text{ст}}}{p} = \frac{P_0 V_0}{P_0 + P_d + pgh_2} \Rightarrow h_2 = \frac{\frac{pP_0 V_0}{(m_0 - pV_{\text{ст}})} - (P_0 + P_d)}{pg}$$

$$h_2 = l_1 + l_2$$

$$l_1 = h_2 - l_2 = \frac{\frac{pP_0 V_0}{(m_0 - pV_{\text{ст}})} - (P_0 + P_d)}{pg} - \frac{m_0 - pV_{\text{ст}}}{pS}$$

$V_{\text{в2}}$  - воздух в пробирке, плавающей в жидкости  
 $P_d$  - добавочное давление

Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

## Определение критического объема воздуха в пробирке



$$V_{\text{пробирки}} = 14 \text{ мл}$$

$$V_{\text{критич.}} = 6.5 \text{ мл}$$

Условие равновесия водолаза:  $mg = \rho_{\text{ж}} gV$

$$m_{\text{пр.}} + \rho_{\text{в}} (V_{\text{пр.}} - V_{\text{в.кр.}}) = \rho_{\text{ж.}} (V_{\text{ст.}} + V_{\text{пр.}})$$

$$V_{\text{в.кр.}} = V_{\text{пр.}} - \frac{\rho_{\text{ж.}} (V_{\text{ст.}} + V_{\text{пр.}}) - m_{\text{пр.}} + \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}$$

$V_{\text{в.кр.}}$  - критический объем воздуха в пробирке  
 $m_{\text{пр.}}$  - масса пробирки

Качественное  
описание

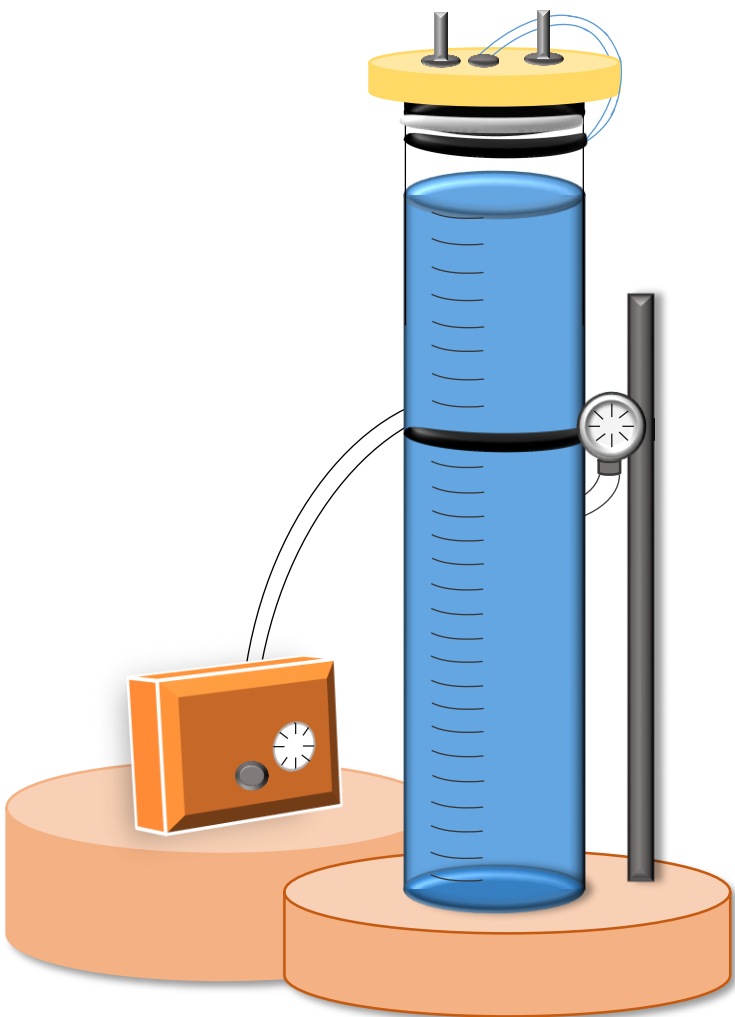
Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы

Параметры, влияющие на потопление водолаза:

- Объем воздуха в колбе
- Масса колбы
- Плотность жидкости
- Давление в трубке
- Атмосферное давление
- Форма водолаза



Качественное  
описание

Теория

Экспериментальная  
часть

Выводы