
Физические модели и задачи - оценки в школьном эксперименте

Объединенный институт ядерных исследований
Учебно-научный центр

Физический факультатив для школьников

Одно из главных требований ФГОС: создание современной информационно-образовательной среды

- Комплекс информационно-образовательных ресурсов взамен традиционных предметных комплектов;
- Широчайшие возможности использования электронных ресурсов в образовательном процессе;
- Создание на этой основе открытой и информационно избыточной образовательной среды;
- Новые возможности организации практических и проектных работ с использованием сетевых ресурсов и, вместе с тем, **опасность вытеснения физического эксперимента и его замена “виртуальными образами” на электронных носителях.**

Место и роль экспериментальных заданий при изучении физики:

- составляют неотъемлемую часть изучаемой дисциплины;
- способствуют более глубокому пониманию и усвоению физических законов;
- помогают вырабатывать и совершенствовать экспериментальные умения и навыки учащихся;
- способствуют формированию ответственности и самостоятельности при проведении необходимых измерений.

I. Творческие задания

Практическое задание “Шагающий человек”

Цель работы: оценить мощность, развиваемую пешеходом при ходьбе;

Мощность в механике $N = \Delta A / \Delta t = F \cdot v$

$F = F_{\text{трения покоя}}$, v – скорость пешехода

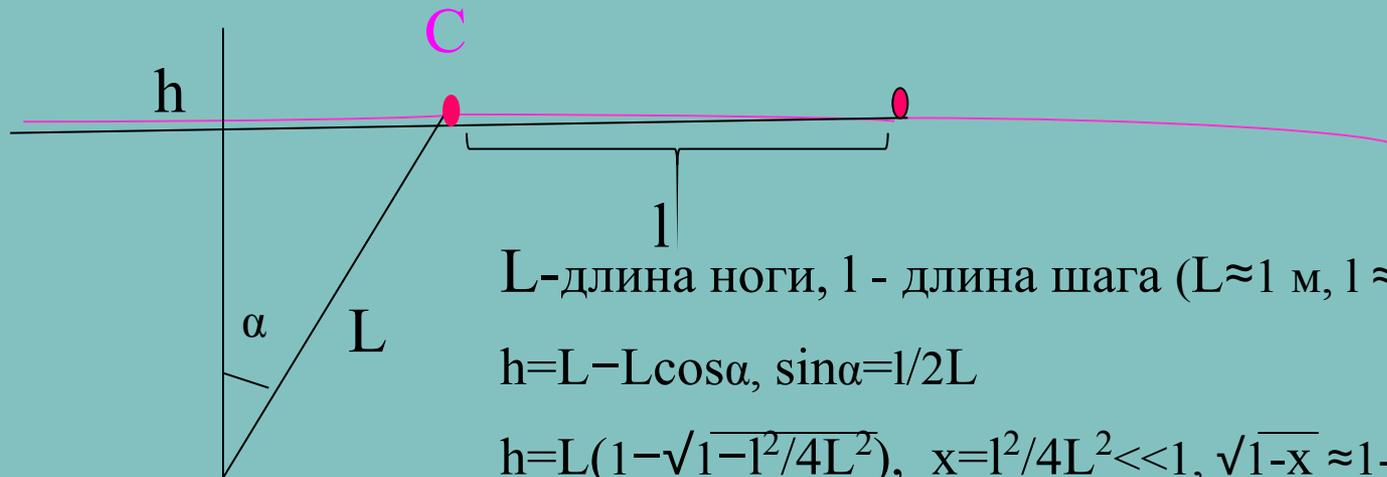
Сила трения покоя работу совершать не может!

Как оценивать мощность?

Физическая модель явления

Идея решения: когда человек делает шаг, его центр масс

С поднимается на некоторую высоту h .



L - длина ноги, l - длина шага ($L \approx 1$ м, $l \approx 0,7$ м)

$$h = L - L \cos \alpha, \sin \alpha = l / 2L$$

$$h = L(1 - \sqrt{1 - l^2 / 4L^2}), \quad x = l^2 / 4L^2 \ll 1, \quad \sqrt{1 - x} \approx 1 - x / 2$$

$$h \approx l^2 / 8L \approx 5 \text{ см}$$

Некоторые численные оценки

Если $v = 4$ км/ч, $t = 1$ мин, то пройденный путь $s \approx 66$ м.

Число шагов $n = s/l \approx 100$.

Механическая работа за указанное время $A = mghn$.

Механическая мощность $N = A/t = mghn/t = mglv/8L$

Если масса человека $m = 60$ кг, то развиваемая им мощность $N \approx 60$ Вт.

Практическая работа

«Взаимодействие магнита с железной пластиной»

Оборудование:

подковообразный магнит;

железная пластина;

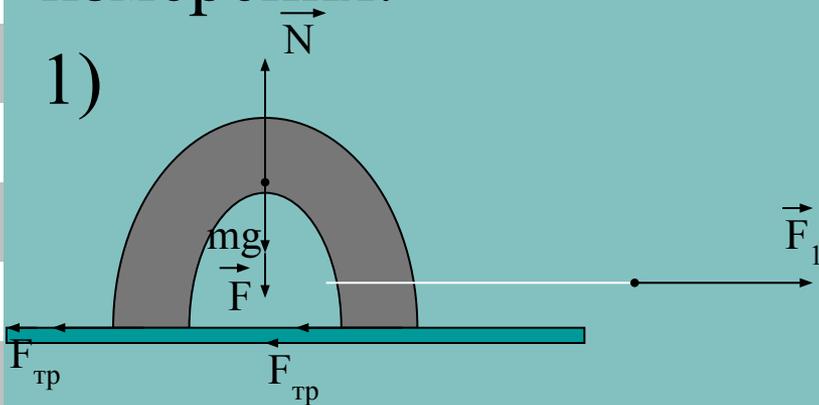
динамометр Бакушинского;

НИТЬ

Возможное решение: измерение №1

Задачу можно решить, проделав следующие три измерения:

1)



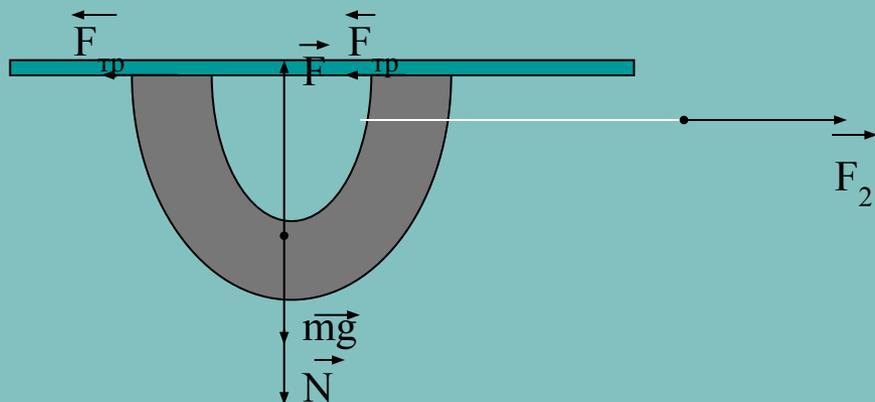
$$\begin{aligned} F_1 &= F_{тр1} \\ F_{тр1} &= \mu N = \mu(mg + F) \\ F_1 &= \mu(F + mg) \end{aligned} \quad (1)$$

μ – коэфф. трения;

m – масса магнита;

F – искомая сила.

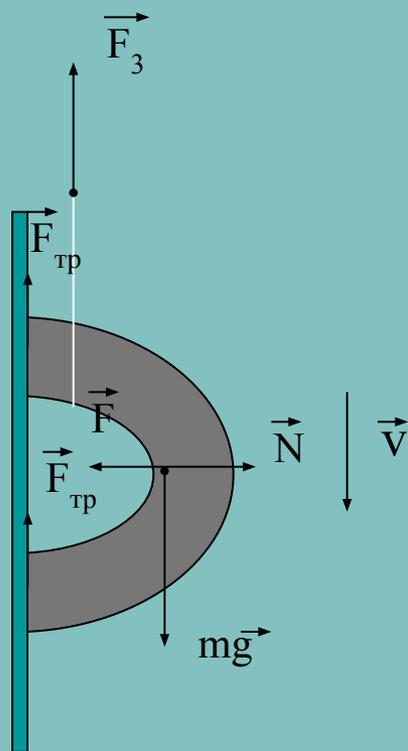
Измерение № 2:



$$\begin{aligned} F_2 &= F_{\text{тр}2} \\ F_{\text{тр}2} &= \mu N = \mu(F - mg) \\ F_2 &= \mu(F - mg) \end{aligned} \quad (2)$$

Примечание: опыт показывает, что если воздействовать на магнит с помощью динамометра вертикально вниз, то оторвать магнит от пластины невозможно.

Измерение №3:



$$F_3 + F_{тр} = mg$$

$$F_{тр} = \mu N = \mu F$$

$$F_3 = mg - \mu F \quad (3)$$

Система уравнений (1) – (3)
полностью решает поставленную
задачу

Практическая работа

“Оценка радиуса микропузырька в воде”

Оборудование: мензурка с водой; соль; линейка; секундомер; справочник физических величин

Некоторые обозначения:

r – радиус пузырька;

ρ – плотность воды;

v – скорость движения пузырьков;

η – вязкость воды

Физическая модель явления

Т. к. $v = \text{const}$, для пузырька выполняется условие равновесия: $F_A = F_c$

$F_A = \rho g v = 4/3 \pi r^3 \rho g$ – сила Архимеда

F_c – сила гидродинамического сопротивления воды

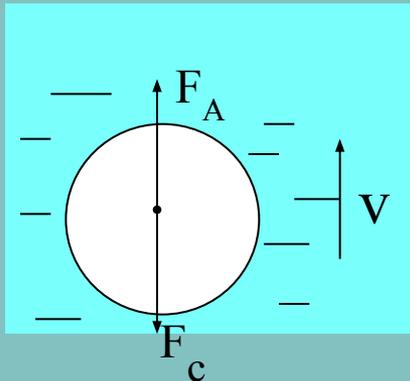
Метод размерностей: $F_c = r \eta v$

Точная формула $F_c = 6 \pi r \eta v$ (формула Стокса)

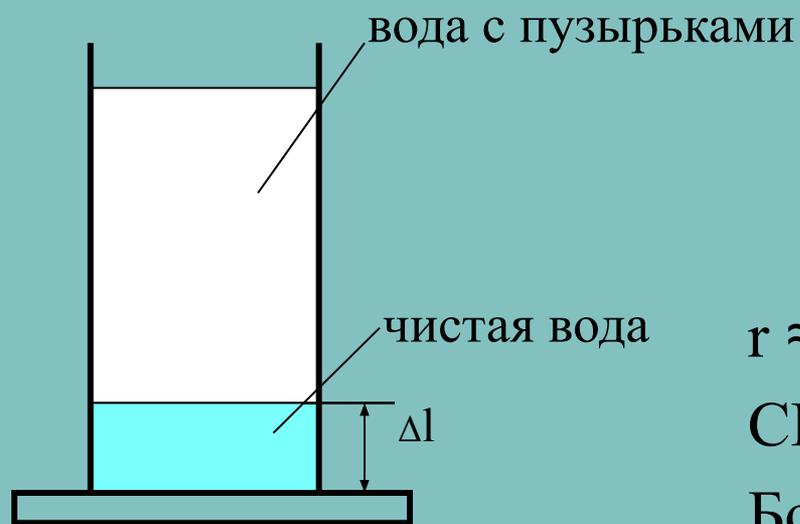
$$4/3 \pi r^3 \rho g = 6 \pi r \eta v$$

Оценка радиуса микропузырька

$$r = \sqrt{9 \eta v / 2 \rho g}$$



Численные оценки:



$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\eta = 10^{-3} \text{ Па с}$$

$$V = \Delta l / \Delta t \approx 0,1 - 1 \text{ мм/с}$$

$$r \approx \sqrt{10^{-3} v / (4 \cdot 10^3 \cdot 10)} \approx 0,5 \sqrt{10^{-7} v}$$

$$\text{СИ: } [r] = \text{м}; [v] = \text{м/с}$$

Более точная оценка:

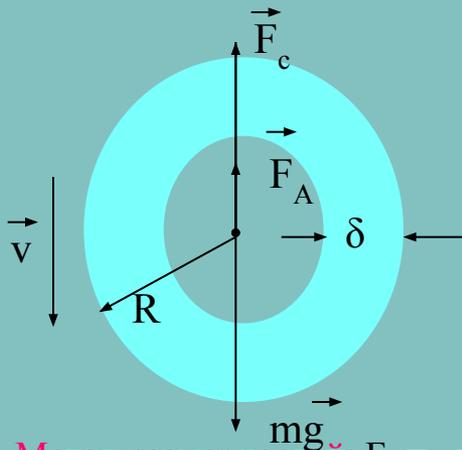
$$r \approx 2 \sqrt{10^{-7} v} \text{ м} \approx 6 - 20 \text{ мкм}$$

Практическая работа

“Оценка толщины стенки мыльного пузыря”

- Оборудование:
- мыльный пузырь, выдутый через трубочку;
- рулетка;
- секундомер;
- справочник физических величин

Физическая модель явления:



$$v = \text{const}$$

$mg = F_c + F_A$ - условие равновесия

$F_A = 4/3 \cdot \pi \rho_{\text{воз}} g R^3$ - сила Архимеда,

R - радиус пузыря

$\rho_{\text{воз}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха,

$m = 4\pi \rho_{\text{в}} \delta R^2$ - масса пузыря,

$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность воды,

δ - толщина стенки пузыря

Сила сопротивления воздуха $F_{\text{соп}} = ?$

Метод размерностей: $F_c = v \eta R$, $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - вязкость воздуха ($F_c = 6\pi v \eta R$ - точная формула)

Из условия равновесия получаем оценку для δ :

$$\delta = (9 v \eta + 2 \rho_{\text{воз}} g R^2) / 6 \rho_{\text{в}} g R$$

Численные оценки:

Высота падения пузыря $h \approx 2$ м,

время падения $t \approx 3$ с;

радиус пузыря $R \approx 3$ см;

скорость падения $v \approx 0,7$ м/с

Оценка толщины стенки:

$$\delta = (9 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 1,3 \cdot 10 \cdot 9 \cdot 10^{-4}) / (6 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 0,03) \approx \\ \approx 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 13 \text{ мкм}$$

Практическая работа “Плавающее сито”.

- Оборудование:
- металлическое сито;
- динамометр;
- линейки;
- набор грузов;
- сосуд с водой.

Силы поверхностного натяжения

- Силы поверхностного натяжения весьма малы: $F = \sigma L$, σ - коэффициент поверхностного натяжения. Например, для воды $\sigma = 73$ мН/м.
- Для границы длиной $L = 100$ м получаем значение $F = 7.3$ Н !

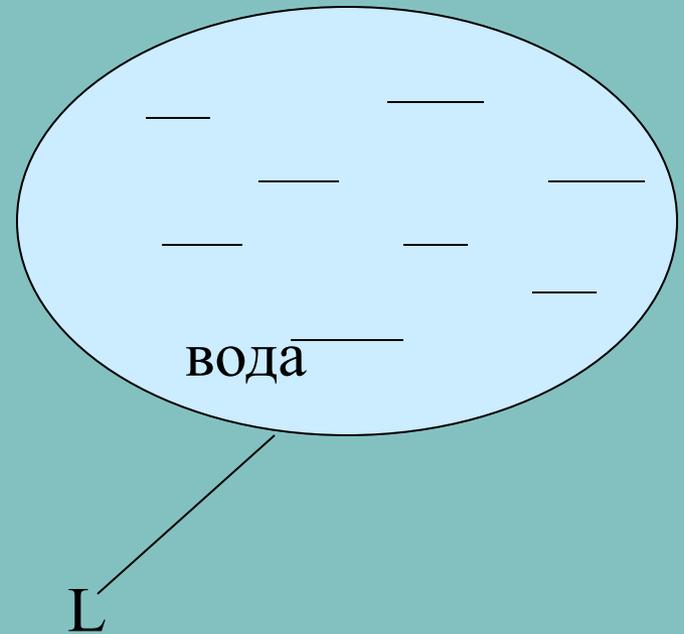
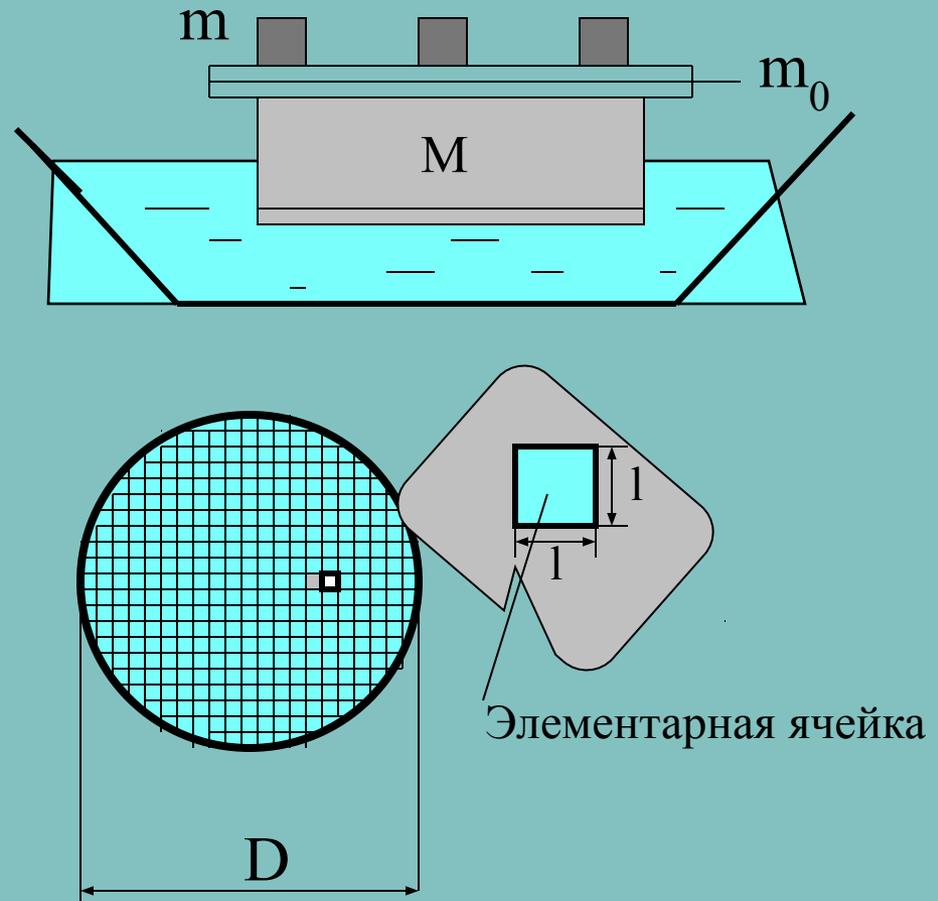


Схема опыта: сито как “усилитель” проявления сил поверхностного натяжения.

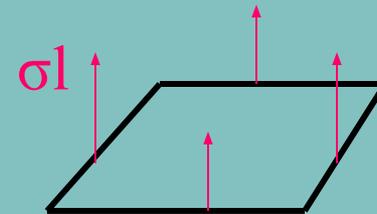
- Масса сита: $M=146$ г;
- Диаметр сита: $D=14.5$ см;
- Масса грузиков: $m=123$ г;
- Масса линеек: $m_0=18$ г;
- Размер элементарной ячейки: $s=1$ мм х 1 мм



Простые оценки:

Силы поверхностного натяжения поддерживают каждую элементарную ячейку:
 $F_0 = 4\sigma \cdot l$. Для всей поверхности решетки: $F = F_0 \cdot N$, $N = S/s_0$, N – число элементарных ячеек. Для данного опыта $s_0 = 1 \text{ mm}^2$, $S \approx 165 \text{ cm}^2$.

$N \approx 16500$! – фактор усиления поверхностных сил.



Оценка коэффициента поверхностного натяжения воды из условия плавания сита

Пренебрегая незначительным вкладом архимедовой выталкивающей силы, запишем условие равновесия сита:

$$4\sigma l \cdot N = P, \text{ где } P = (M+m+m_0)g -$$

вес всех тел, g – ускорение свободного падения.

Отсюда легко получить оценку коэффициента поверхностного натяжения: $\sigma_{\text{exp}} \approx 45 \text{ мН/м}$.

Табличное значение для воды: $\sigma = 73 \text{ мН/м}$.

Основная причина отличия приведенной оценки от табличного значения заключается в наличии частичного смачивания водой сетки решета.

Практическая работа

“Взаимодействие гладких стеклянных пластин”

Оборудование:

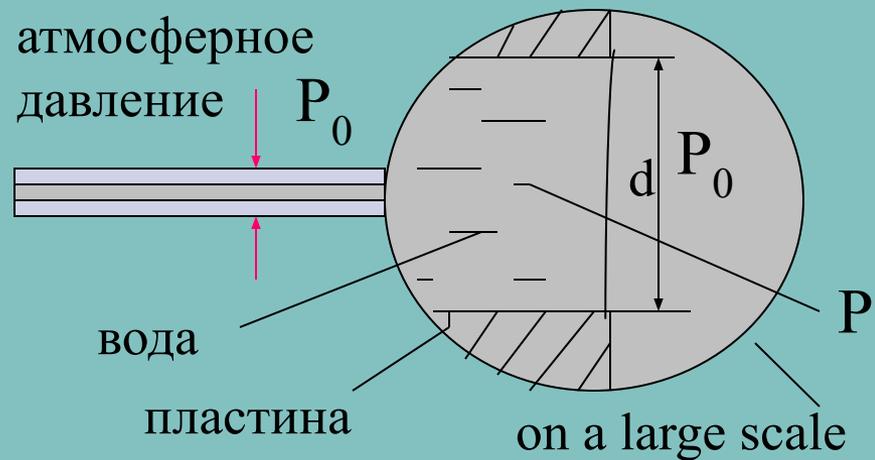
- две гладкие стеклянные пластины;
- линейка;
- микрометр;
- пипетка;
- вода.

■ Физическая картина явления

- В результате смачивания поверхностей пластин водой, боковые поверхности слоя воды между пластинами оказываются вогнутыми вовнутрь. Это приводит к уменьшению давления внутри жидкости по сравнению с внешним атмосферным давлением.

Давление под искривленной поверхностью:

Взаимное прижатие пластин обусловлено превышением внешнего давления над давлением внутри жидкости.



P - давление внутри воды;

$P = P_0 - 4\sigma/d$ (лапласово давление);

d – толщина слоя воды

Простые оценки:

$$P_0 = 10^5 \text{ Па}, P = P_0 - \Delta P,$$

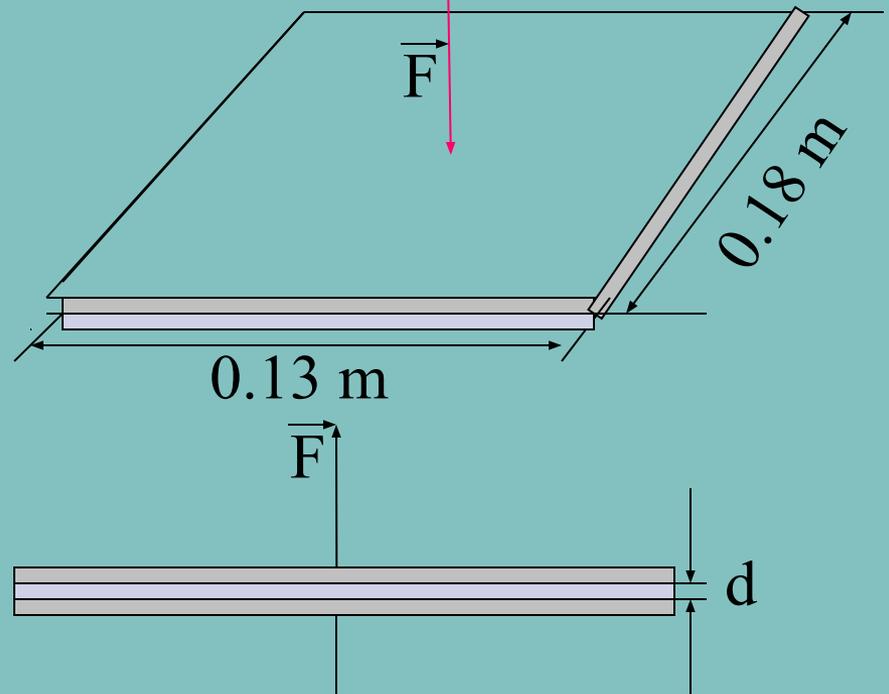
$$\Delta P = 4\sigma/d;$$

$$d \approx 0.04 - 0.1 \text{ мм};$$

$$F = \Delta P \cdot S, S = 0.13 \cdot 0.18 \text{ м}^2;$$

$$d_{\min} \approx 0.04 \text{ мм} \longrightarrow$$

$$F_{\max} \approx 170 \text{ Н}!$$



Можно удержать пудовую гирю! — 16 kg !

Проект “Жизнь мыльного пузыря”:

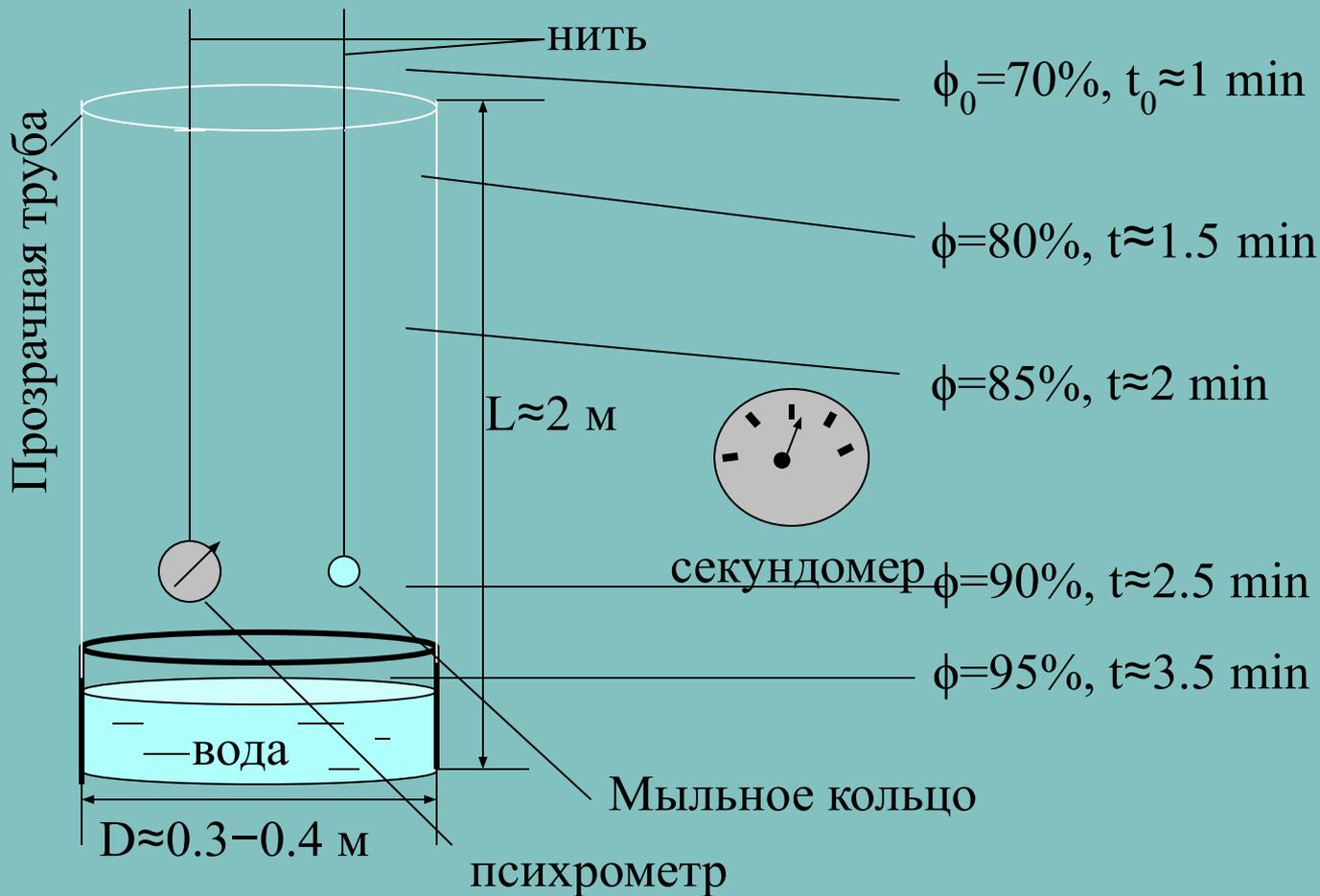
1. Зависимость времени жизни мыльной пленки от влажности воздуха

Вопросы: а) какие главные факторы влияют на время жизни мыльной пленки? б) можно ли создать долгоживущие мыльные пузыри?

Оборудование:

- цилиндрическая труба из полиэтилена;
- психрометр (гигрометр);
- цилиндрический сосуд с водой;
- проволочное кольцо, затянутое мыльной пленкой;
- секундомер.

Схема эксперимента



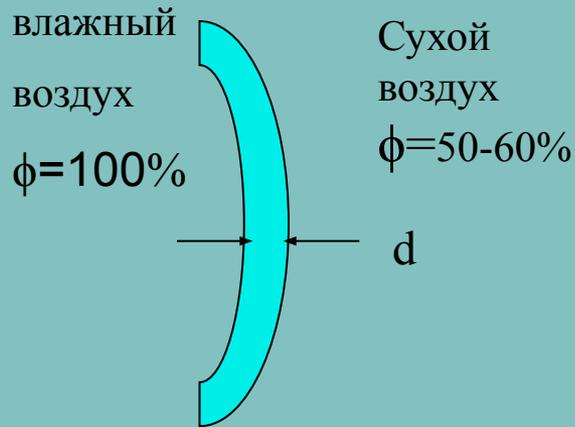
Анимация эксперимента

Зависимость времени жизни мыльной пленки от влажности воздуха

`vremya_zhizni_puz.exe`

Простая модель явления

d — толщина мыльной пленки



$$V_d = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд}};$$

$$V_{\text{конд}} \propto n_{\text{пара}} \propto \phi; (\phi=100\% \longrightarrow V_{\text{исп}} = V_{\text{конд}})$$

$$\phi=50\% \longrightarrow V_d = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд}} = 1/2 V_{\text{исп}}$$

$$\phi_1 \longrightarrow V_{d1} = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд1}} = (1 - \phi_1) V_{\text{исп}}$$

$$\phi_2 \longrightarrow V_{d2} = V_{\text{исп}} - V_{\text{конд2}} = (1 - \phi_2) V_{\text{исп}}$$

$$t \propto 1/V_d$$

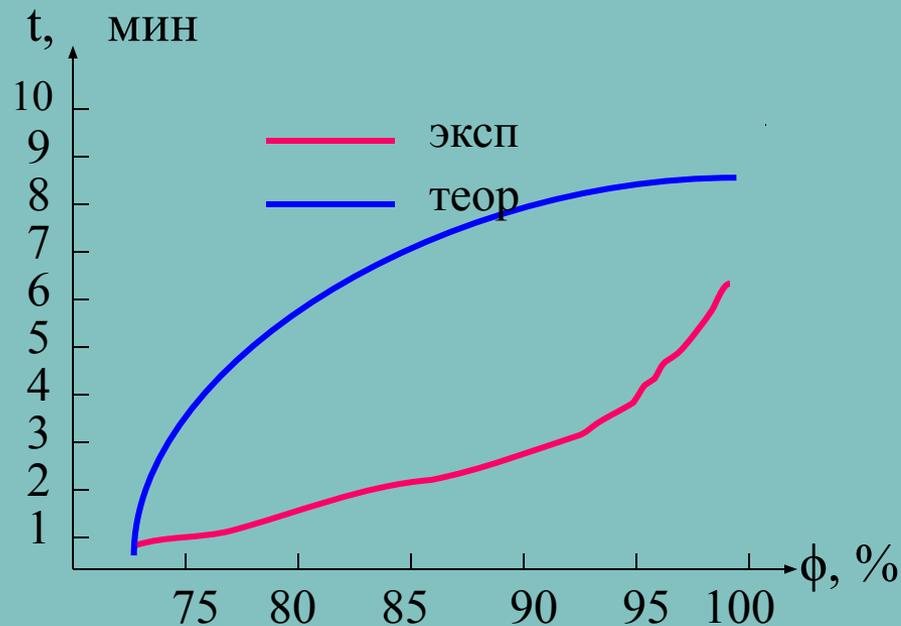
$$V_{d1}/V_{d2} = (1 - \phi_1)/(1 - \phi_2); \quad V_{d1}/V_{d2} = t_2/t_1$$

$$t = t_0(1 - \phi_0)/(1 - \phi)$$

Сравнение результатов расчетов с ОПЫТНЫМИ ДАННЫМИ

При относительной влажности воздуха вне трубы $\phi_0 \approx 70\%$, $t_0 \approx 1$ мин.
В рамках упрощенной модели согласно формуле:

$$t = t_0 \cdot (1 - \phi_0) / (1 - \phi), \quad \phi - \text{влажность воздуха вдоль трубы}$$



Некоторые выводы

Предположим, что для мыльного пузыря созданы идеальные условия (отсутствуют воздушные потоки, пылинки, относительная влажность $\phi=100\%$ и т.п.)

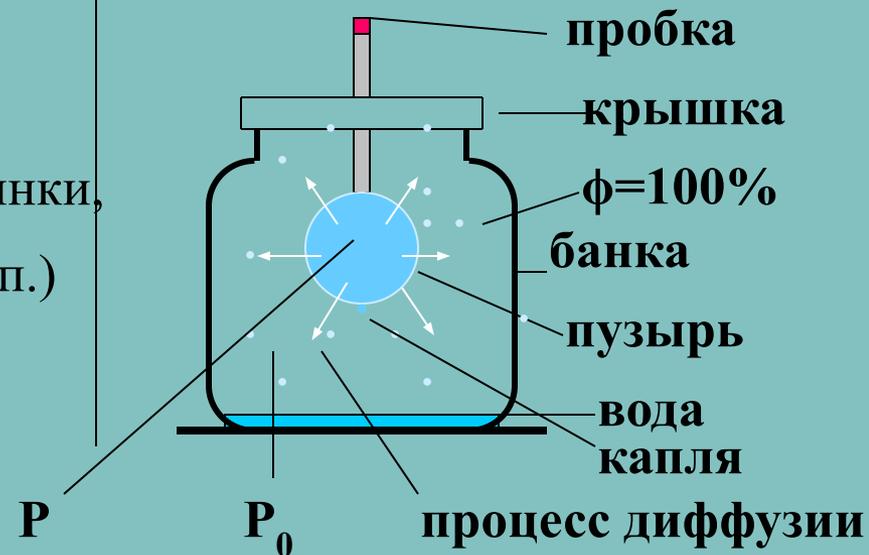
Вопрос: может ли пузырь жить вечно?

Ответ очевиден: **нет, не может.**

$P = P_0 + 4\sigma/r$, r – радиус пузыря
■ P_0 – атмосферное давление

1) диффузионное увядание; 2) образование капли внизу пузыря

Согласно наблюдениям, время жизни мыльного пузыря в закрытом сосуде может достигать суток и более.



Проект «Жизнь мыльного пузыря»:

2. Время сдувание мыльного пузыря

sduvanie_puzirya.exe

Part 2: the intensification of undulatory movement

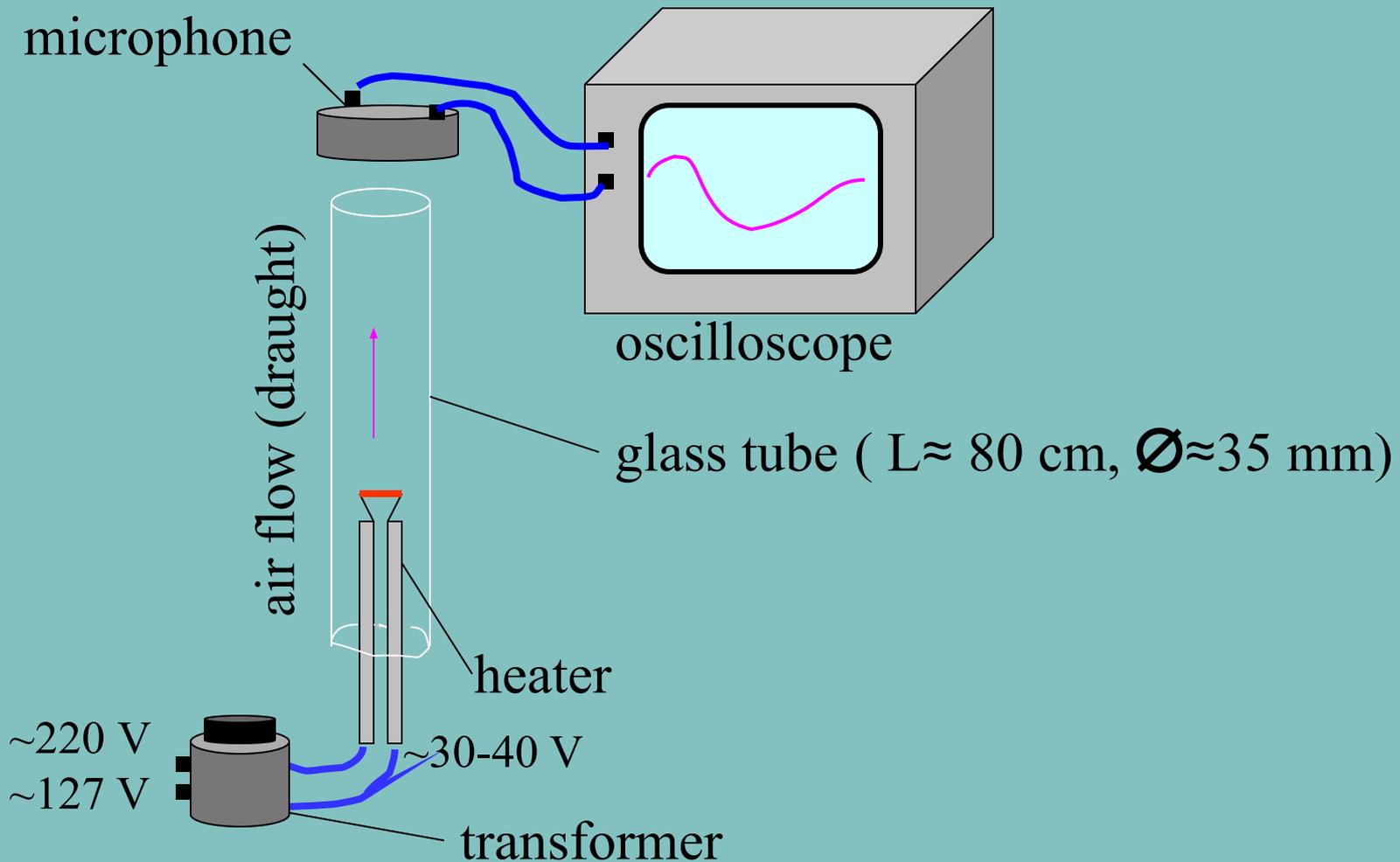
The objects of investigations are the air and water streams. There are the opportunities to intensificate the oscillations of air stream inside glass tube and to display the structure of water stream. In addition we can discuss the influence of sound field on the water stream.

Sounding tube – the thermal autogenerator of sound

Equipment:

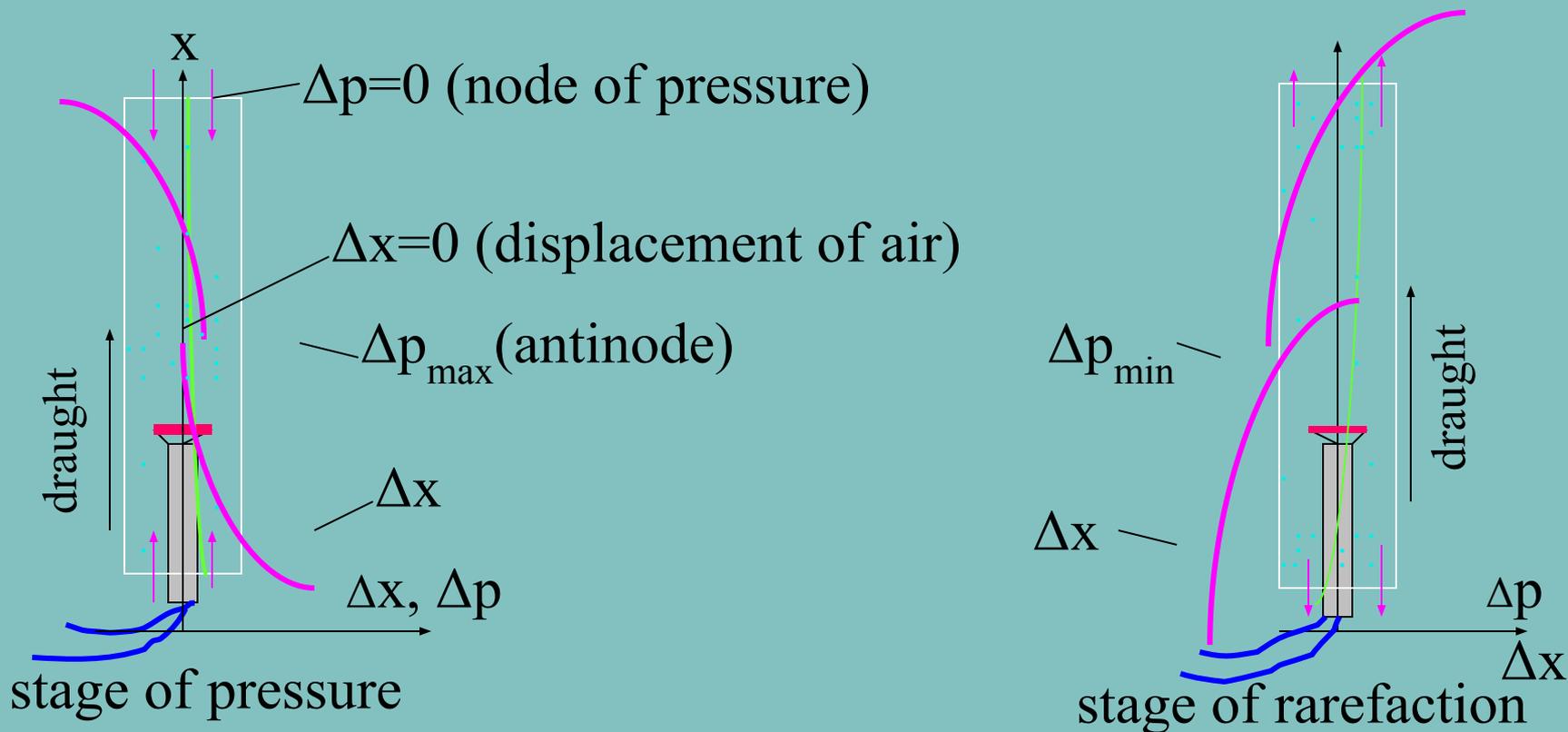
- glass tube about 80 – 100 cm;
- small heater about $P \sim 100 - 200$ W;
- transformer for AC (voltage about 30 – 40 V);
- laboratory support;
- oscilloscope (not obligatory);
- microphone (not obligatory).

Set-up of experiment



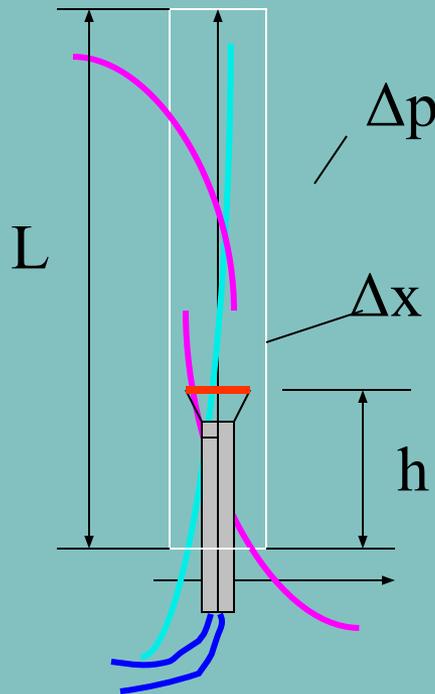
Sounding tube – the resonance system with positive reverse connection.

There's air flow through the tube → forming of the **standing wave** inside the tube. The heater provides the positive reverse connection.



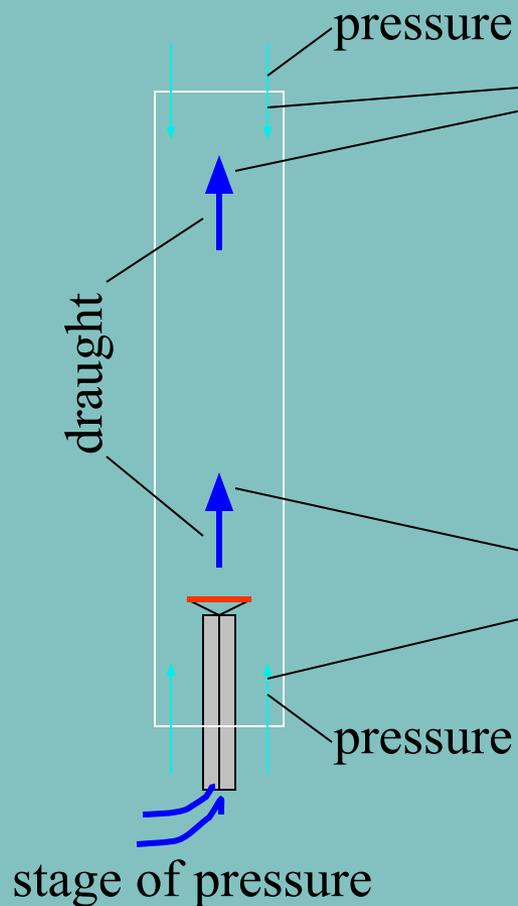
Some results

The positive reverse connection depends on extremality of location the heater. There's effect (sound) in case **only** the heater's located in **lower** part of the tube.



In accordance with experiments $h=L/4$.
 $\lambda=2L$ – the wave-length of standing wave;
 c – the velocity of sound in the air;
 $f_0 = c/\lambda = c/2L$ – the frequency of main harmonic;

Some discussion

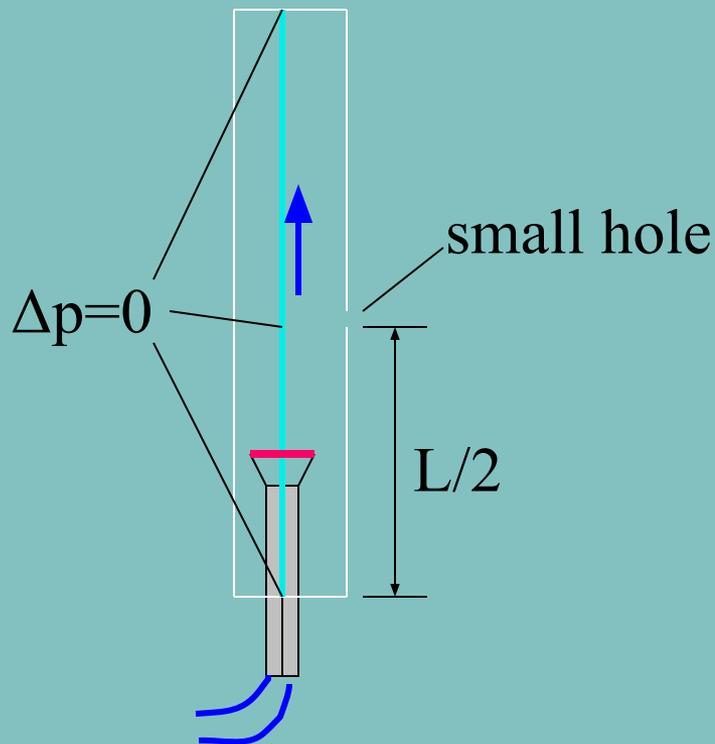


The directions are opposite: there's the **negative** reverse connection → the oscillations of air will be suppressed.

The directions are the same: there's the **positive** reverse connection → the oscillations of air wont be suppressed.

One remark

There isn't effect of the sounding tube. This experiment demonstrates that there's really the pressure antinode in the centre of the tube. The positive reverse connection is absent.



The water streams

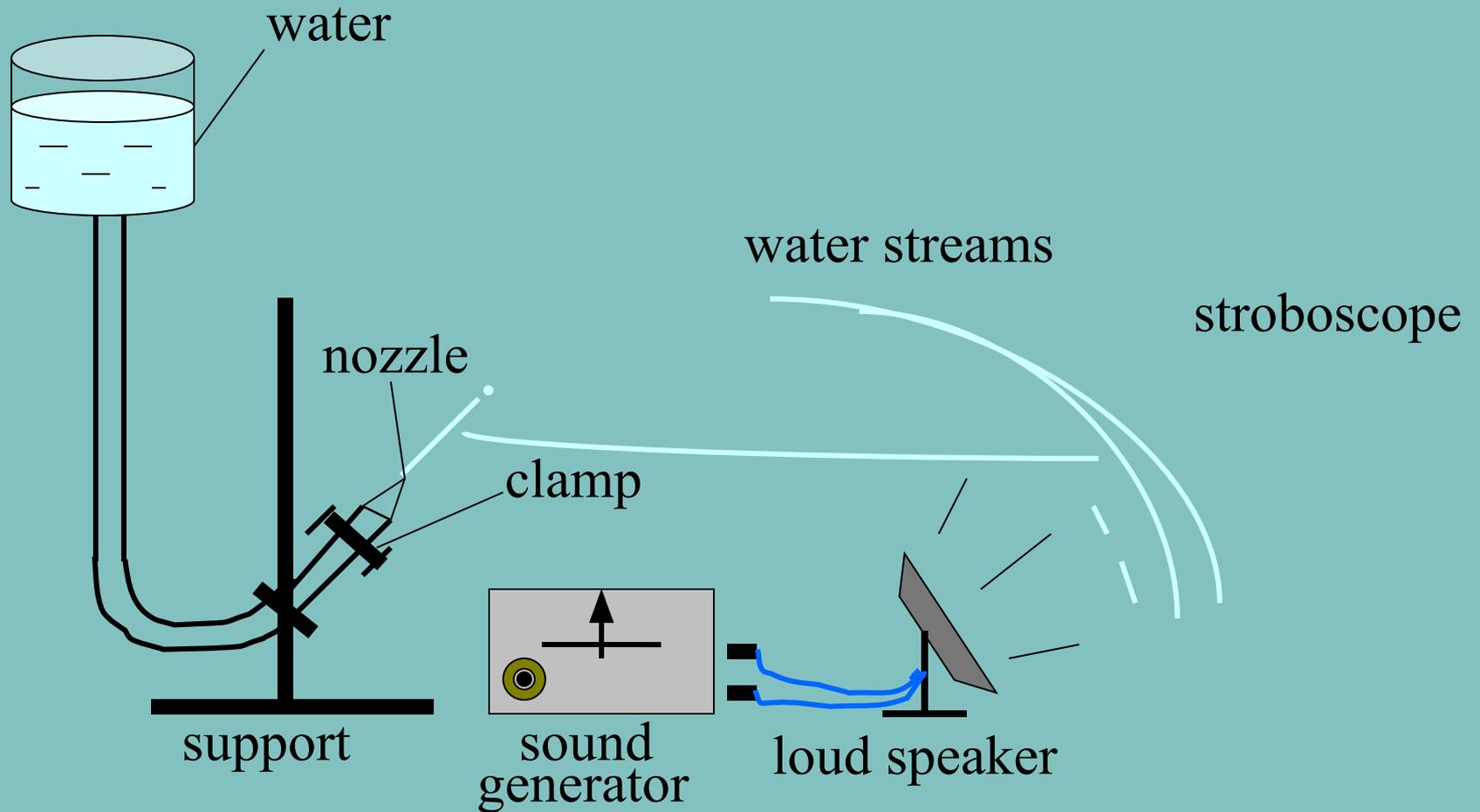
Introduction:

There are some questions: a) can we observe the process of disintegration (dropping) water stream?
b) can we influence on this process? c) can we extract some physical quantities from these observations?

Equipment:

- volume about 5 litres (vessel for water);
- rubber or plastic hose about 2 m, $\varnothing=10-15$ mm;
- medicine dropper (nozzle);
- clamp;
- loupe;
- stroboscope;
- sound generator;
- loud speaker;
- support.

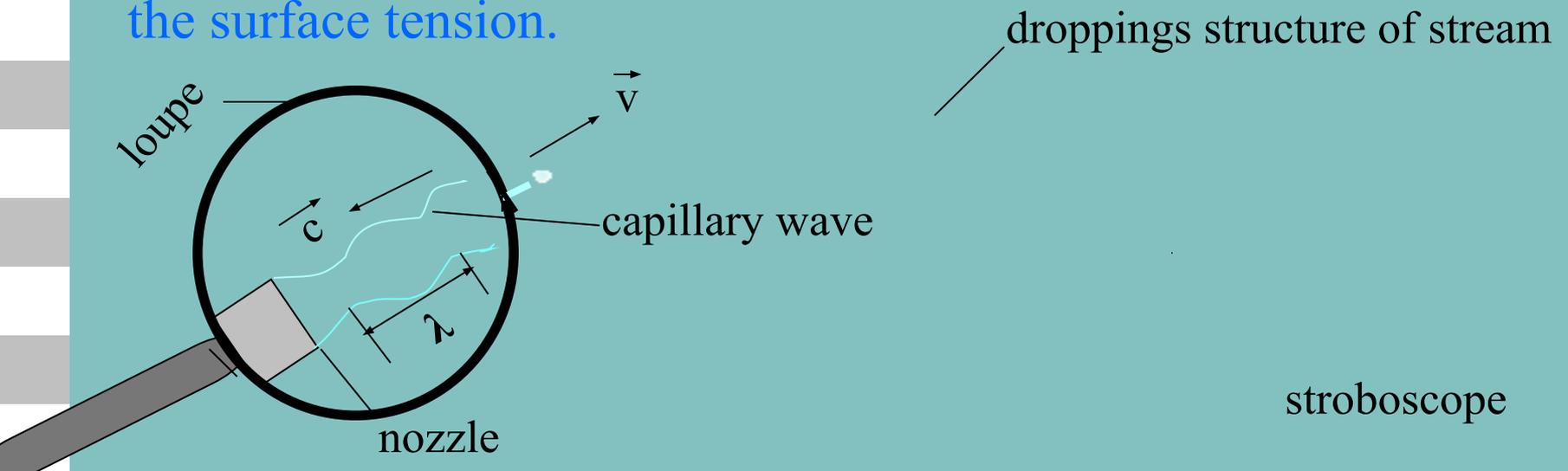
Set-up of experiment:



Some discussion.

It's necessary to have a **stroboscope** to observe the dropping structure of water stream.

There's the capillary wave on the surface of water stream. The direction of motion the capillary wave is opposite the water stream one. But the velocity of capillary wave always equals the water stream one: $c = v$. Hence we can observe the capillary wave like the standing wave. The reason of existence the capillary waves is **the surface tension**.



Some estimations:

There's the simple estimation for λ : $\lambda > 9/2 \cdot r$, $r \approx 0.5$ mm – radius of the nozzle. Hence $\lambda > 2.25$ mm.

It's easy to determine the velocity of the stream: $v \approx 2$ m/s, hence $c \approx 2$ m/s.

According to the observations the resonance frequency of the dropping process is about 300 Hz: $f_{\text{res}} \approx 300$ Hz. Therefore we can calculate the wave-length of the capillary wave: $\lambda = c/f_{\text{res}}$, $\lambda_{\text{obs}} \approx 6.6$ mm.









