

**КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЮНЫЕ ТЕХНИКИ И ИЗОБРЕТАТЕЛИ»**

**Водяной барометр**

**Автор: Никитина Арина Тимофеевна  
Школа 1535, 8 класс**

**Научный руководитель: Наливайко Владимир Павлович  
к.ф.-м.н., доцент,  
педагог дополнительного образования  
ДНТТМ ГБПОУ «Воробьевы горы»**

Работа выполнена в рамках программы дополнительного образования  
детей  
«Физика и биофизика в природе» ДНТТМ

**Москва - 2015**

## Оглавление

Введение.....	3
1. Измерение атмосферного давления с помощью U-образного манометра .....	4
2. Водяной барометр с расширительным баком для воздуха.....	6
3. Расчет параметров водяного барометра.....	7
4. Анализ возможных систематических ошибок.....	10
Выводы.....	11
Список использованной литературы.....	11

## Аннотация

В работе предложена схема компактного водяного барометра, размер которого не превышает размер ртутного барометра Торричелли, а точность сопоставима с ним. Создание именно компактного водяного барометра с приемлемой точностью и составляет **новизну** данной работы.

В основе конструкции – U-образный манометр, одно из колен которого открыто, а другое, закрытое, состоит из последовательно соединенных бака для воды, измерительной трубки и бака для воздуха.

Создана действующая модель прибора. Барометр откалиброван в *мм.рт.ст.* и непосредственно показывает атмосферное давление. Процесс измерений атмосферного давления не требует дополнительных расчетов.

Прибор, отличающийся простотой конструкции, не является альтернативой барометру-анероиду, но может служить в качестве демонстрационного прибора в кабинете физики. Нам удалось опровергнуть «догму» о невозможности создания водяного барометра «разумных» размеров, помещающегося в кабинете физики.

Объем работы - 12 машинописных страниц, количество рисунков –

Количество использованных литературных источников – 5.

Приложение – сайт проекта, действующая модель проекта.

## Введение

При изучении на уроках физики темы «Измерение атмосферного давления» мы обратили внимание, что во многих учебниках и научно-популярной литературе утверждается, что для изготовления «водяного» барометра потребуется трубка высотой около 10,3 метра, поскольку давление водяного столба именно такой высоты равно нормальному атмосферному давлению [1-2].

В ряде работ, например [3, 4], предлагается методика определения атмосферного давления с помощью U-образного водяного манометра, который позволяет измерять в опыте не полное давление, а лишь его изменение при некотором известном изменении объема зафиксированной массы газа и затем, используя закон Бойля-Мариотта, рассчитать атмосферное давление.

Однако простую экспериментальную установку, основанную на методе [3], было бы неверно называть собственно «водяным барометром». И причины этому следующие:

- в данном методе атмосферное давление непосредственно не измеряется. Каждый раз для определения атмосферного давления приходится проводить измерения трех величин и потом рассчитывать атмосферное давление;

- точность этого метода, как мы покажем ниже, очень низкая. Фактически речь идет об оценках «по порядку величины».

**Цель данной работы:** сконструировать компактный водяной барометр, откалиброванный в *мм.рт.ст.*, точность которого сопоставима с точностью ртутного барометра. Слово «компактный» подразумевает, что размер проектируемого водяного барометра не должен превышать размеры классического ртутного барометра Торричелли, длина трубки которого около метра.

### Задачи работы:

- 1) исследовать причины очень низкой точности «водяного» метода [3, 4];
- 2) разработать способ повышения точности измерений данным методом;
- 3) разработать методику, при которой высота водяного столба «показывает» непосредственно атмосферное давление;
- 4) рассчитать оптимальные параметры монтажной схемы компактного прибора;
- 5) изготовить прибор и откалибровать его в *мм.рт.ст.*; провести тестовые измерения атмосферного давления с последующей оценкой достоинств и недостатков прибора при использовании его в качестве демонстрационного оборудования на уроках физики.

Мы не предполагаем, что проектируемый прибор будет альтернативой барометру-анероиду – компактному, удобному на практике и довольно точному прибору. Нам интересно опровергнуть «догму» о невозможности создания водяного барометра «разумных» размеров, помещающегося в кабинете физики.

Создание именно компактного водяного барометра и составляет **новизну** данной работы.

### 1.Измерение атмосферного давления с помощью U-образного манометра

Экспериментальная установка [3] состоит из вертикально закрепленной стеклянной трубки сечением  $S$ , соединенной шлангом длиной около метра со стеклянной воронкой (рис.1). Подняв воронку на уровень верхнего конца стеклянной трубки, заливаем воду (плотностью  $\rho$ ) в воронку. Установив перемещением воронки вниз уровень воды в

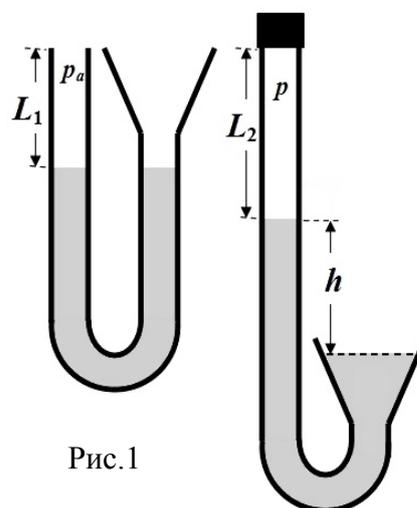


Рис.1

стеклянной трубке на расстоянии  $L_1$  от ее верхнего конца, закрываем пробкой отверстие в трубке. Опустив воронку максимально вниз, измеряем высоту  $L_2$  столба воздуха в трубке (при давлении  $p$ ), а также разность уровней  $h$  воды в трубке и воронке. Для зафиксированной массы воздуха в трубке запишем закон Бойля-Мариотта:

$$p_a L_1 S = p L_2 S \quad (1.1)$$

Учитывая, что

$$p = p_a - \rho g h, \quad (1.2)$$

из (1) и (2) получаем формулу для расчета атмосферного давления  $p_a$ :

$$p_a = \rho g h / (1 - L_1 / L_2) \quad (1.3)$$

Как оценить «чувствительность» прибора на изменение атмосферного давления?

Предположим, что мы проводим опыт в условиях, когда атмосферное давление равно  $p_{700} = 700 \text{ мм.рт.ст.}$ . Тогда при  $L_1 = 10 \text{ см}$ ,  $h = 70 \text{ см}$  из (1.3) получаем оценку высоты столба воздуха  $L_2 = 107,8 \text{ мм}$ . Повторяем опыт в условиях, когда атмосферное давление возросло до  $p_{800} = 800 \text{ мм.рт.ст.}$ . Тогда при тех же  $L_1 = 10 \text{ см}$  и  $h = 70 \text{ см}$  следует, что  $L_2 = 107,1 \text{ мм}$ .

Заметим, что цена деления измерительной линейки  $1 \text{ мм/дел}$ . Изменение показаний прибора на величину, меньшую цены деления невозможно зафиксировать.

Как же повысить точность измерений, не увеличивая высоту трубок и длину шланга?

«Чувствительность» прибора на изменение атмосферного давления определяется изменением приращения объема воздуха в трубке  $\Delta V = (L_2 - L_1)S$ . Мы предлагаем на стеклянную трубку сечением  $S$  ниже уровня  $L_1$  прикрепить трубку диаметром в  $n$  раз меньше, при этом разность  $(L_2 - L_1)$  возрастет в  $n^2$  раз!

## 2. Водяной барометр с расширительным баком для воздуха

Для создания водяного барометра мы предлагаем схему прибора, которая основана на трех новых конструкторских решениях.

**Во-первых**, чтобы повысить чувствительность прибора, мы предлагаем к одному из колен U-образной трубки подключить расширительный бак для воздуха (рис.2). Диаметр бака  $D$  в  $n$  раз больше, чем у трубки  $d$ . Высота трубок и бака одинакова –  $L$ .

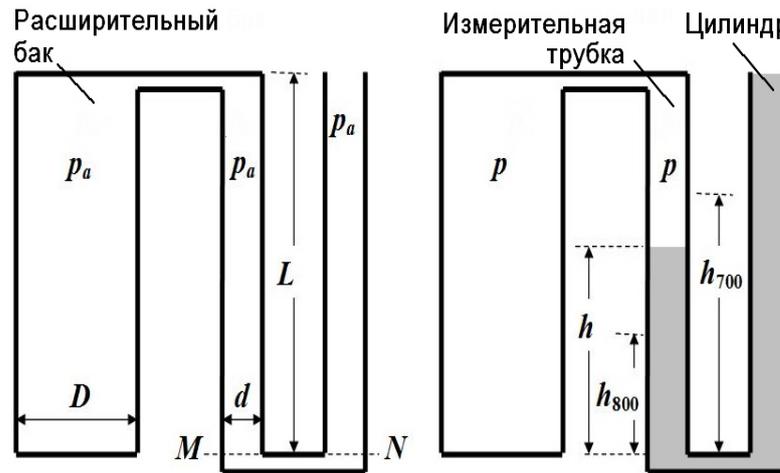


Рис.2

**Во-вторых**, чтобы в процессе измерений не приходилось менять высоту одного из колен прибора, мы предлагаем не уменьшать давление в измерительной трубке и баке, а увеличивать. С этой целью правое колено (открытый цилиндр произвольного сечения) заполняется водой полностью. При этом в левом колене (измерительной трубке) вода поднимается до высоты  $h$ , сжимая воздух от атмосферного давления  $p_a$  до давления  $p$  в трубке и баке для воздуха.

Из закона сообщающихся сосудов следует равенство давлений на уровне  $M-N$ :

$$p + \rho gh = p_a + \rho gL \quad (2.1)$$

Запишем закон Бойля-Мариотта для фиксированной массы воздуха в измерительной трубке и баке:

$$p_a (LS + Ln^2 S) = p [(L - h)S + Ln^2 S] \quad (2.2)$$

Откуда получаем формулу для расчета атмосферного давления:

$$p_a = \rho g h \left( \frac{L}{h} - 1 \right) \left[ \left( n^2 + 1 \right) \frac{L}{h} - 1 \right] \quad (2.3)$$

Из (2.3) следует, что для определения атмосферного давления необходимо измерить только уровень воды  $h$  в измерительной трубке, т.е. шкалу измерительной трубки можно откалибровать в единицах давления (мм.рт.ст.).

### 3. Расчет параметров водяного барометра

Необходимо выяснить и задать оптимальное соотношение  $n$  диаметров бака и трубки.

Решая уравнение (2.3) относительно  $h$ , мы рассчитали высоту подъема  $h$  воды в измерительной трубке в зависимости от  $n$  при нормальном атмосферном давлении, а также при нижней (700 мм.рт.ст) и верхней (800 мм.рт.ст) границах давления (рис.3). Высоту всех емкостей мы приняли равной  $L = 1$  м. Из рис.3 видно, что с увеличением  $n$  высота столба жидкости в измерительной трубке непрерывно нарастает.

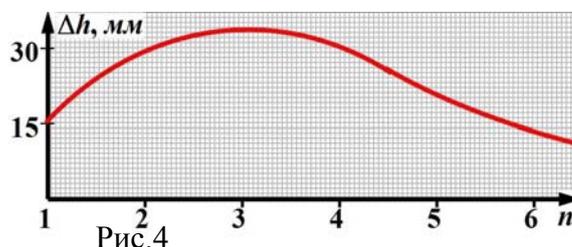
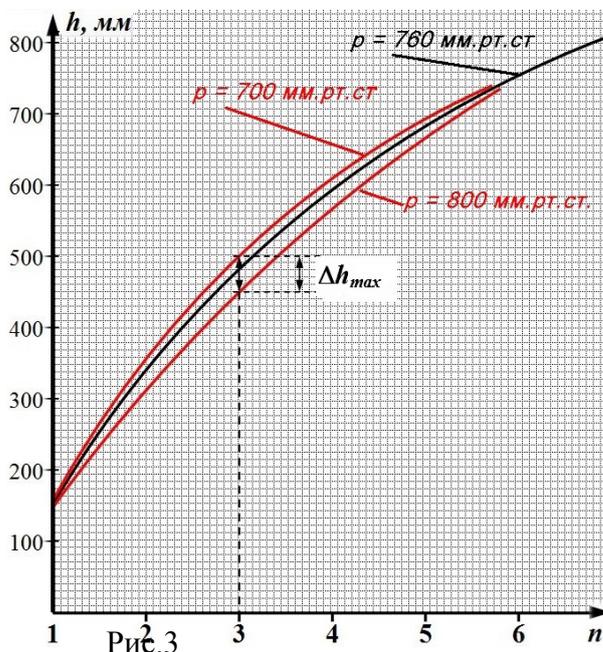
Цена деления шкалы измерительной трубки зависит от разности высот  $\Delta h = h_{700} - h_{800}$  подъема воды при изменении атмосферного давления в указанном диапазоне. На рис.4 приведены результаты расчета  $\Delta h$  при различных  $n$ . Оказалось, что зависимость разности  $\Delta h$  от  $n$ , в отличие от зависимости  $h$  от  $n$ , имеет совершенно другой характер. На графиках видно, что при соотношении  $n = 3 \div 3,2$  разность  $\Delta h$  достигает максимального значения  $\Delta h_{max} = h_{700} - h_{800} = 500 - 468 = 32$  мм.

Вспомним, что в [3] аналогичный диапазон «отклика» U-образного манометра составляет лишь 0,7 мм, т.е. нам удалось увеличить его почти в 50 раз!

Поскольку высота всех емкостей при расчетах полагалась одинаковой, то оптимальное соотношение объемов бака для воздуха и трубки равно  $n^2 \approx 10$ .

Цена деления шкалы водяного барометра в этом случае равна (при высоте открытой трубки равной 1 м):

$$C = (800-700)/(h_{700} - h_{800}) = 3,12 \text{ мм.рт.ст. на 1мм обычной линейки.}$$



И, наконец, суть **третьего нового конструкторского решения**: для уменьшения высоты прибора мы предлагаем заменить нижнюю часть измерительной трубки на расширительный бак для воды, объем которого равен объему нижней части трубки заполняемой водой при атмосферном давлении 800 мм.рт.ст.

На рис.5 представлена итоговая схема водяного барометра.

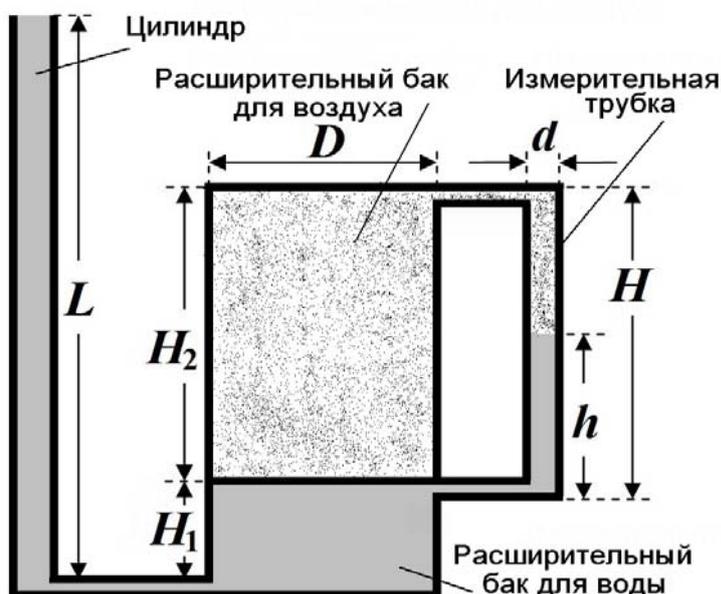


Рис.5

**Вывод:** наименьшая цена деления прибора достижима, если при конструировании барометра выполняется соотношение:  $V_2/(V_1 + V_{mp}) \approx 10$  (объем бака для воздуха примерно в 10 раз превышает суммарный объем трубки и бака для воды).

Мы изготовили несколько пробных моделей. В первой модели (рис.6) был выбран слишком малый диаметр трубки (3 мм) и в ней присутствовали пузырьки воздуха благодаря силам поверхностного натяжения, которые необходимо учитывать при этих масштабах. Во второй модели (рис.7) мы увеличили диаметр трубки до 8 мм. Однако при высокой чувствительности барометра не удавалось получить стабильных показаний. Причина в том, что при работе пластиковые бутылки и гибкая трубка не обеспечивали постоянный объем.

На рис. 8 представлена модель из жестких конструкций. Однако, она изготовлена из непрозрачных материалов и при стабильных показаниях такая модель не дает наглядного представления работы прибора.



Рис.6



Рис.7



Рис.8

На рис. 9 представлена фотография модели водяного барометра, изготовленного из трубок и цилиндров из прозрачного оргстекла.  $L = 1$  м – высота цилиндра для столба воды, создающего разность давлений.  $H_1 = 30$  мм – высота расширительного бака для воды.  $H_2 = 360$  мм – высота расширительного бака для воздуха.

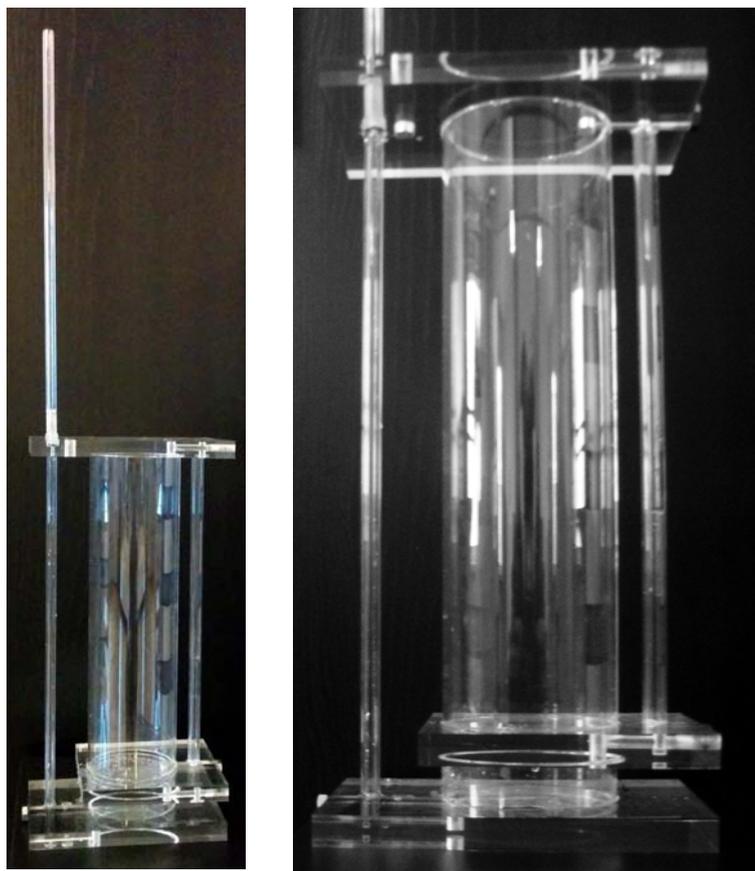


Рис. 9

#### **4. Анализ возможных систематических ошибок**

Систематические ошибки при измерениях нашим прибором могут быть обусловлены наличием не учтенных нами ранее сил поверхностного натяжения воды. Однако систематической ошибки вследствие действия сил поверхностного натяжения удастся избежать. Поскольку сила поверхностного натяжения постоянна по модулю и направлена постоянно в одну сторону (либо вертикально вверх, либо вертикально вниз в зависимости от того, смачивает вода поверхность стенки трубки или нет), то влияние этих сил проявится в симметричном сдвиге шкалы прибора на всем ее протяжении. Мы предполагаем калибровать прибор с помощью барометра-анероида, при этом начало отсчета, определяемое опытным путем, будет зафиксировано с учетом указанного сдвига.

Мы разработали и разместили на сайте-презентации проекта [5] описание по конструированию водяного барометра и методике работы с ним.

## Выводы

1. Причина низкой точности «водяного» метода [3] измерений атмосферного давления в использовании трубок одинакового сечения в обоих коленах.

2. Подключение «расширительного бака» для воздуха к одному из колен позволит увеличить точность измерений примерно в 50 раз по сравнению с методом [3], что немного уступает точности ртутного барометра.

3. Предлагаемый метод позволяет сконструировать прибор, откалиброванный непосредственно в *мм.рт.ст.*

4. Для уменьшения размеров прибора большую часть высокой измерительной трубки можно заменить низким «расширительным баком» для воды.

5. При высоте открытой трубки в 1 м наименьшая цена деления водяного барометра  $C = 3,2$  *мм.рт.ст* на 1 мм линейки достижима при условии, что объем бака для воздуха примерно в 10 раз превышает суммарный объем трубки и бака для воды.

6. Основные достоинства метода:

- простота в изготовлении и в использовании барометра;

- точность водяного барометра сопоставима с точностью ртутного барометра.

Основные недостатки:

- при каждом новом измерении необходимо заново наполнять барометр водой;

- для увеличения точности измерения необходимо увеличивать высоту трубки водяного столба, т.е. увеличивать размер барометра.

## Список использованной литературы

1. Перышкин А.В., Родина Н.А. Физика 7. М.: Просвещение, 2012.

2. Громцева О.И. Контрольные работы по физике. 7 класс. М.: Экзамен, 2013

3. Кабардин О.Ф., Орлов В.А. Экспериментальные задания по физике. – М.: Вербум, 2001, с.89-92.

4. Соснова Е.А., Кабир Т. Е. Универсальный измерительный прибор.

<https://sites.google.com/site/ltdmeter/home>

5. Никитина А.Т. Сайт проекта.

<https://sites.google.com/site/waterbarometer/>